



**EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE DESCONTAMINACIÓN
ATMOSFÉRICA PARA EL SECTOR TRANSPORTE – REGIÓN
METROPOLITANA**
ID Licitación: 611134-8-LE24

Estudio solicitado por Subsecretaría del Medio Ambiente

INFORME FINAL

Santiago, 26 de diciembre de 2024

Título del Proyecto

Evaluación de Medidas de Descontaminación Atmosférica para el Sector Transporte – Región Metropolitana

Autores:

Jefe de proyecto: Rocío Herrera

Experto asesor: Luis Cifuentes

Ingeniero Senior de proyecto: Valentina Strappa

Ingeniero de proyecto: Carolina Moya, María Fernanda Arellano, Catalina Irrarrázaval, Sayén Santander, Lucas Villagra

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna N° 4860, Macul – Santiago

Datos Mandante

Razón Social: Subsecretaría del Medio Ambiente

RUT: 61.979.930-5

Dirección: San Martín 73, Santiago

Resumen

El presente estudio tiene por objetivo general determinar medidas de reducción de emisiones de material particulado, sus precursores y otros gases para el sector transporte en ruta y fuera de ruta, además de generar los insumos necesarios para llevar a cabo el Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) sobre estas medidas, en el marco de la actualización del PPDA RMS. En este contexto, se presenta un análisis cualitativo de las medidas actuales del PPDA RMS y de otras normativas asociadas al sector transporte, y un diagnóstico cuantitativo de las medidas actuales del capítulo de Fuentes Móviles del PPDA RMS. Además, se realiza una proyección del inventario de emisiones del sector transporte, y se estiman costos y potencial de reducción de emisiones de las medidas.

Cuerpo del informe

184 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

26/12/2024

Información Contractual

Correlativo Contrato:

OC N°: 611134-30-SE24

Contraparte técnica

Nombre: Diego Ramírez

Cargo: Profesional Área de Calidad del Aire y Cambio Climático, Seremi del Medio Ambiente de la Región Metropolitana

E-mail: dramirez@mma.gob.cl

Sr. Luis Cifuentes

Director GreenLab

Dictuc S.A.

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	I
Lista de Tablas	V
Lista de Figuras.....	VI
Acrónimos y Abreviaturas	IX
1. Antecedentes y justificación del estudio	1
2. Objetivos del estudio	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos	2
2.3 Alcance de este informe	2
3. Análisis cualitativo de las medidas actuales del PPDA RMS y de otras normativas asociadas al sector transporte que tengan injerencia en las emisiones atmosféricas, que permita identificar sinergias con la actualización del presente Plan	4
3.1 Revisión de estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)”	4
3.1.1 Medida 1: Zona de baja emisión.....	4
3.1.2 Medida 2: Aplicación Euro VI/EPA2010 para buses de Transantiago	8
3.1.3 Medida 3: Tecnología de cero y baja emisión para Transantiago.....	10
3.1.4 Medida 4: Restricción vehicular	12
3.1.5 Medida 5: Límites finales ASM.....	14
3.1.6 Medida 6: Límites de emisión con RSD ("limpio y sucio") para vehículos livianos y pesados	15
3.1.7 Medida 7: Programa reducción emisiones para maquinaria construcción	17
3.1.8 Medida 8: Implementación corredores transporte público	18
3.2 Revisión de estudio “Revisión de las Medidas del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana de Santiago – PPDA” para evaluar qué medidas deberían mantenerse, retirarse o modificarse en la actualización del PPDA RMS	26
3.2.1 Medidas que se mantienen	26
3.2.2 Medidas que se eliminan	34
3.2.3 Medidas en Revisión	35

3.2.4	<i>Medidas No Abordadas en Reuniones</i>	35
3.3	Levantamiento de información y revisión de normativas asociadas al sector transporte que tengan injerencia en las emisiones atmosféricas de la RM.....	37
3.3.1	<i>D.S N° 211/1991 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones</i>	37
3.3.2	<i>D.S N° 41/2019 del Ministerio del Medio Ambiente</i>	37
3.3.3	<i>D.S N° 54/1994 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones</i>	37
3.3.4	<i>D.S N°39/2020 del Ministerio del Medio Ambiente</i>	38
3.3.5	<i>D.S N° 104/2000 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones</i>	38
3.3.6	<i>D.S N°32/2017 del Ministerio del Medio Ambiente</i>	38
3.3.7	<i>D.S N°55/1994 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones</i>	38
3.3.8	<i>D.S N°50/2023 del Ministerio de Medio Ambiente</i>	38
3.3.9	<i>D.S N° 4/1994 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.....</i>	38
3.3.10	<i>D.S N° 130/2001 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones</i>	39
4.	Diagnóstico cuantitativo de las medidas actuales del capítulo de Fuentes Móviles del PPDA RMS, y proyección del inventario de emisiones del sector transporte, tanto en ruta como fuera de ruta	40
4.1	Revisión de la estimación de potenciales de reducción en estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)”	40
4.1.1	<i>Modelación de emisiones.....</i>	40
4.1.2	<i>Fuentes de información.....</i>	41
4.1.3	<i>Construcción de escenarios.....</i>	41
4.2	Recopilación y análisis de información cuantitativa referente al cumplimiento de las medidas de los artículos 8, 9 y 120 del PPDA RMS.....	46
4.2.1	<i>Artículo 8 – Programa de implementación de Zona de baja emisión en la RM....</i>	46
4.2.2	<i>Artículo 9 – Límites de emisión para vehículos livianos y medianos.....</i>	52
4.2.3	<i>Artículo 120 – Restricción vehicular permanente en periodo de GEC.....</i>	79
4.3	Evaluación de las medidas de los artículos de las medidas de los artículos 8, 9 y 120 del PPDA RMS	87
4.4	Proyección del inventario de transporte en ruta, a 15 años, y de inventario de MMFR, a 16 años	89
4.4.1	<i>Proyección de emisiones de transporte en ruta.....</i>	89

4.4.2	<i>Proyección de emisiones de MMFR.....</i>	101
5.	Propuesta de medidas nuevas y/o una mantención o modificación de las medidas actuales, para la actualización del PPDA RMS	116
5.1	Revisión de antecedentes nacionales e internacionales sobre medidas de reducción de emisiones atmosféricas de fuentes móviles no incluidas en el actual PPDA	116
5.2	Propuesta de medidas	127
5.2.1	<i>Stage V al 2030 para MMFRF</i>	<i>127</i>
5.3	Estimación de costos incrementales de inversión, operación y mantención de cada medida	128
5.3.1	<i>Modificación Artículo 9 – Límites de emisión EPA</i>	<i>129</i>
5.3.2	<i>MMFR – Estándar emisión Stage V.....</i>	<i>130</i>
6.	Determinación del potencial de reducción de emisiones de las medidas propuestas, con una proyección de 15 años a partir del año base 2022.....	133
6.1	Metodología para determinar los potenciales de reducción de emisiones de las medidas propuestas.....	133
6.1.1	<i>Modificación Artículo 9 – Límites de emisión EPA</i>	<i>133</i>
6.1.2	<i>Stage V al 2030 para MMFR</i>	<i>135</i>
6.2	Resultados de potenciales de reducción de emisiones con proyección a 15 años	135
6.2.1	<i>Modificación Artículo 9 – Límites de emisión EPA</i>	<i>135</i>
6.2.2	<i>Stage V al 2030 para MMFR</i>	<i>136</i>
6.3	Análisis y priorización de medidas propuestas en términos de costos, potencial de reducción y dificultad de implementación	140
6.4	Recomendaciones de implementación de las medidas propuestas	141
6.4.1	<i>Modificación Artículo 9 – Límites de emisión EPA</i>	<i>141</i>
6.4.2	<i>Stage V al 2030 para MMFR</i>	<i>142</i>
7.	Conclusiones.....	144
8.	Bibliografía	146
9.	Anexos.....	148
9.1	Anexo 1: Renombre de columnas en base de datos SGPRT 2012-2022.....	148
9.2	Anexo 2: Registros cuya clasificación inicial fue corregida manualmente en el análisis cuantitativo del Artículo 9	149
9.3	Anexo 3: Categorías vehiculares que se dejaron fuera del análisis cuantitativo del Artículo 9.....	150

9.4	Anexo 4: Histogramas de antigüedad del Parque Vehicular INE.....	151
9.5	Anexo 5: Asignación de tecnología al parque vehicular INE.....	155
9.6	Anexo 6: Factores de emisión de MMFR	160
9.7	Anexo 7: Factor de ajuste transitorio MMFR.....	163
9.8	Anexo 8: Herramienta de evaluación de medidas actuales y de posibles escenarios para medidas propuestas.....	164
9.8.1	<i>Transporte en ruta</i>	164
9.8.2	<i>MMFR</i>	168

Lista de Tablas

Tabla 2-1 Actividades abordadas en el presente informe	3
Tabla 3-1 Medidas evaluadas en estudio, incluidas en el PPDA RMS	4
Tabla 3-2 Perfil de Costos medida Zona de Baja Emisión	6
Tabla 3-3 Perfil de Costos medida Aplicación Euro VI/EPA 2010	9
Tabla 3-4 Perfil de Costos medida Tecnología de cero y baja emisión para Transantiago	11
Tabla 3-5 Perfil de Costos medida Restricción Vehicular	13
Tabla 3-6 Perfil de Costos medida Límites ASM	14
Tabla 3-7 Perfil de Costos medida Límites con RSD.....	16
Tabla 3-8 Perfil de Costos medida Maquinaria Construcción.....	17
Tabla 3-9 Resumen de Eficiencia de Abatimiento y Criterios de Factibilidad para las Medidas Evaluadas	20
Tabla 4-1 Revisión de medidas de artículos 8, 9 y 120 del PPDA RMS	46
Tabla 4-2 Fiscalizaciones realizadas en el marco del Programa de Fiscalización, año 2022 y 2023	47
Tabla 4-3 Resultados análisis econométrico de la renovación del parque de camiones en la Región Metropolitana	51
Tabla 4-4 Descripción de los campos de la base de datos PRT 2012-2022.	54
Tabla 4-5 Categorías vehiculares asignadas para el análisis del Artículo 9.	56
Tabla 4-6 Verificaciones realizadas en la base de datos y acciones tomadas para su corrección.	57
Tabla 4-7 Porcentaje de registros afectados en el chequeo de datos.....	58
Tabla 4-8 Cantidad de mediciones con valor igual a cero o no existente para cada contaminante, modo ASM y tipo de revisión técnica.	59
Tabla 4-9 Porcentaje de registros inconsistentes respecto al resultado ASM.	65
Tabla 4-10 Parque de vehículos en la primera revisión técnica por año calendario.....	66
Tabla 4-11 Tasas de rechazo históricas por emisión de gases ASM según categoría vehicular... ..	66
Tabla 4-12 Parques de vehículos según el resultado en su revisión técnica.....	68
Tabla 4-13 Emisión total de HC [ppm] en el modo 5015 según parques de resultados.	70
Tabla 4-14 Emisión total de HC [ppm] en el modo 5015 para el parque total.....	70
Tabla 4-15 Emisión total de CO [%Volumen] en el modo 5015 según parques de resultados.	72
Tabla 4-16 Emisión total de CO [%Volumen] en el modo 5015 para el parque total.	72
Tabla 4-17 Emisión total de NO [ppm] en el modo 5015 según parques de resultados.....	74
Tabla 4-18 Emisión total de NO [ppm] en el modo 5015 para el parque total.	74
Tabla 4-19 Reducción de emisiones HC [ppm] en el modo 5015 por la reparación del parque completo de rechazados.....	75
Tabla 4-20 Reducción de emisiones CO [%Volumen] en el modo 5015 por la reparación del parque completo de rechazados.....	76
Tabla 4-21 Reducción de emisiones NO [ppm] en el modo 5015 por la reparación del parque completo de rechazados.....	76

Tabla 4-22 Tasas de rechazo históricas por emisión de gases ASM según categoría vehicular...	77
Tabla 4-23 Cantidad de vehículos con antigüedad superior a 25 años.	80
Tabla 4-24 Homologación de categoría vehicular INE con tipo de vehículo.	82
Tabla 4-25 Vehículos ≤ 25 años sin asignación de certificación Euro.....	83
Tabla 4-26 Reducción porcentual de emisiones por contaminante [%].....	89
Tabla 4-27 Reducción de emisiones por contaminante [ton/año].....	89
Tabla 4-28 Resultados de modelos lineales de las tasas de retiro en función de la antigüedad del vehículo, por tipo de vehículo.	94
Tabla 4-29 Distancia promedio recorrida anualmente por tipo de vehículo	98
Tabla 4-30 Participación nacional y de la RM por rubro	103
Tabla 4-31 Maquinas retiradas del parque de MMFR.....	103
Tabla 4-32 Porcentaje de máquinas descartadas del parque.	104
Tabla 4-33 Parque base a proyectar	104
Tabla 4-34 Distribución de potencia del parque de MMFR.....	105
Tabla 4-35 Factores de emisión (g/kW-hr) según rango de potencia y estándar de emisión....	110
Tabla 4-36 Parámetro A según estándar de emisión y contaminante.	112
Tabla 4-37 Nivel de actividad y factores de carga por tipo de maquinaria	113
Tabla 4-38 Vida media de MMFR según rango de potencia.....	113
Tabla 4-39 Comparación emisiones NOx y PM con (CALAC+, 2021a)	115
Tabla 5-1 Recopilación de medidas de descontaminación atmosférica sector Transporte.....	117
Tabla 5-2 Modificaciones propuestas a medidas existentes en PPDA	127
Tabla 5-3 Costo unitario por actividad de fiscalización [CLP/act]	129
Tabla 5-4 Costos de inversión Tier 4F/Stage V	131
Tabla 5-5 Maquinaria afectada por propuesta normativa	132
Tabla 6-1 Potencial de reducción de emisiones de propuesta normativa MMFR [ton/año]	139
Tabla 6-2 Costo-eficiencia de medidas propuestas [M UF/ton reducida].....	141
Tabla 9-1 Renombre de columnas en base de datos SGPRT 2012-2022.....	148
Tabla 9-2 Cantidad de registros de vehículos cuya clasificación inicial fue corregida manualmente	149
Tabla 9-3 Cantidad de registros y categorías vehiculares que no se incluyeron en el análisis del Artículo 9.....	150
Tabla 9-4 Diccionario de asignación de tecnología para el parque vehicular INE.....	155
Tabla 9-5 Factores de ajuste transitorio según tipo de maquinaria.....	163

Lista de Figuras

Figura 4-1 Cantidad de vehículos pesados > 12 años, 2018-2022.....	48
Figura 4-2 Porcentaje de tecnología por año en vehículos pesados > 12 años, 2018-2022.	49
Figura 4-3 Evolución de camiones nuevos a nivel nacional y Región Metropolitana, 2013-2024.	50

Figura 4-4 Porcentaje de registros con emisión cero para el CO Modo 5015 según código de certificación y tipo de revisión técnica.	60
Figura 4-5 Porcentaje de registros con emisión cero para el NO Modo 5015 según inercia equivalente y tipo de revisión técnica.	61
Figura 4-6 Porcentaje de registros con emisión NA para el HC Modo 5015 según planta de revisión técnica tipo A2.	62
Figura 4-7 Porcentaje de registros con emisión NA para el HC Modo 5015 en las plantas tipo B según año de revisión técnica.	63
Figura 4-8 Emisión en el rechazo vs. Reducción absoluta para el HC en el modo 5015.	69
Figura 4-9 Tasa de rechazo de vehículos livianos de pasajeros por antigüedad y año de revisión técnica, para límites actuales y el escenario evaluado.	78
Figura 4-10 Tasa de rechazo de vehículos livianos de pasajeros por año de modelo del vehículo y año de revisión técnica, para límites actuales y el escenario evaluado.	79
Figura 4-11 Antigüedad del parque vehicular para tres regiones de Chile (2018, 2020, 2022)...	81
Figura 4-12 Renovación tecnológica en el tiempo, 2019-2022.	84
Figura 4-13 Renovación tecnológica por región, 2019-2022.	85
Figura 4-14 Esquema y diagrama de flujo del modelo de Analytica realizado para estimación de emisiones asociadas al parque vehicular.	88
Figura 4-15 Parque vehicular de la región Metropolitana por tipo de vehículo, 2018-2022.	91
Figura 4-16 Distribución del parque vehicular según norma de emisión, 2018-2022.	92
Figura 4-17 Evolución de la cantidad de vehículos.	93
Figura 4-18 Ventas anuales de vehículos livianos en la Región Metropolitana, datos históricos y proyección.	95
Figura 4-19 Ventas anuales de vehículos medianos en la Región Metropolitana, datos históricos y proyección.	96
Figura 4-20 Ventas anuales de camiones en la RM, datos históricos y proyección.	96
Figura 4-21 Ventas anuales de buses en la Región Metropolitana, datos históricos y proyección.	97
Figura 4-22 Ventas anuales de motos en la Región Metropolitana, datos históricos y proyección.	98
Figura 4-23 Proyección del parque vehicular de la RM por norma de emisión, 2022-2038.	99
Figura 4-24 Emisiones de NOx de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2038 [ton/año]	100
Figura 4-25 Emisiones de HC de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2038 [ton/año]	101
Figura 4-26 Emisiones de CO de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2038 [ton/año]	101
Figura 4-27 Distribución de estándar de emisión en importaciones anuales.	104
Figura 4-28 Regresión lineal de importaciones anuales.	106
Figura 4-29 Proyección importaciones de la RM.	107
Figura 4-30 Proyección parque de MMFR por rubro.	108
Figura 4-31. Proyección parque de MMFR por estándar de emisión.	109

Figura 4-32 Emisiones de HC de MMFR proyectadas para el periodo 2022-2037 [ton/año]	114
Figura 4-33 Emisiones de CO de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2037 [ton/año]	114
Figura 4-34 Emisiones de NOx de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2037 [ton/año]	115
Figura 4-35 Emisiones de MP de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2037 [ton/año]	115
Figura 5-1 Porcentaje de importaciones según estándar normativo – Escenario Base	128
Figura 5-2 Porcentaje de importaciones según estándar normativo – Escenario propuesto	128
Figura 5-3 Proyección de costos asociados a la implementación de límites EPA [UF/año]	130
Figura 5-4 Costos anuales de inversión [UF]	132
Figura 6-1 Parque de vehículos medianos y livianos proyectado, 2022-2038	134
Figura 6-2 Parque de vehículos rechazados por límites de emisión EPA y límites actuales PPDA	134
Figura 6-3 Proyección de la reducción de emisiones de NOx [ton/año] – Artículo 9	135
Figura 6-4 Proyección de la reducción de emisiones de CO [ton/año] – Artículo 9	136
Figura 6-5 Proyección de la reducción de emisiones de HC [ton/año] – Artículo 9	136
Figura 6-6 Factores de emisión para Tier 4f y Stage V para HC	137
Figura 6-7 Factores de emisión para Tier 4f y Stage V para CO	137
Figura 6-8 Factores de emisión para Tier 4f y Stage V para NOx	138
Figura 6-9 Factores de emisión para Tier 4f y Stage V para MP	138
Figura 6-10 Emisiones de MP para los distintos escenarios.	139
Figura 9-1 Antigüedad del parque vehicular INE por región para los años 2018, 2020 y 2022 .	155
Figura 9-2 Factores de emisión para HC.	161
Figura 9-3 Factores de emisión para CO.	161
Figura 9-4 Factores de emisión para NOx.	162
Figura 9-5 Factores de emisión para MP.	162
Figura 9-6 Modelo de parque vehicular y emisiones de transporte en ruta	164
Figura 9-7 Índices del modelo de transporte en ruta	165
Figura 9-8 Lectura de datos en modelo de transporte en ruta	166
Figura 9-9 Nodo “Calendario norma en ruta”	167
Figura 9-10 Módulo de análisis de escenarios propuestos ASM	168
Figura 9-11 Modelo de parque y emisión de MMFR	169
Figura 9-12 Módulo de lectura de datos de MMFR	169
Figura 9-13 Modulo de cálculo de factor de deterioro (FD) de MMFR	170
Figura 9-14 Módulo de proyección del parque de MMFR	171
Figura 9-15 Nodo de escenarios normativos futuros para MMFR	171

Acrónimos y Abreviaturas

Instituciones

DIPRES:	Dirección de Presupuestos, Ministerio de Hacienda, Gobierno de Chile
OCDE:	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
USEPA:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

Programas y Estudios

PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
--------	--

Países

EE.UU.:	Estados Unidos de América
UE:	Unión Europea

Monedas

CAD:	Dólares de Canadá
CLP:	Pesos de Chile
EUR:	Euros
MUSD:	Millones de Dólares de Estados Unidos
MXN:	Pesos de México
USD:	Dólares de Estados Unidos

Abreviaturas

ACB:	Análisis Costo Beneficio
ACE:	Análisis Costo Efectividad
AGIES:	Análisis General del Impacto Económico y Social
BS:	Beneficio Social
BSN:	Beneficio Social Neto
COI:	Costo de Tratamiento Médico, por sus siglas en inglés “Cost of illness”
DAP:	Disposición a Pagar
FE:	Factores de Emisión
FEC:	Factores Emisión-Concentración
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
IPC:	Ingreso Per Cápita

MMFR:	Maquinaria móvil fuera de ruta
PPDA:	Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental
PYMES:	Pequeñas y Medianas Empresas
SIC:	Sistema Interconectado Central
SING:	Sistema Interconectado del Norte Grande
TIR:	Tasa Interna de Retorno
VAN:	Valor Actual Neto
VET:	Valor Económico Total
WTP:	Disposición a Pagar, por sus siglas en inglés "Willingness to Pay"

Prefijos

T: Tera (10^{12})
G: Giga (10^9)
M: Mega (10^6)
K: Kilo (10^3)
m: Mili (10^{-3})
 μ : Micro (10^{-6})
n: Nano (10^{-9})

Unidades Básicas

A: Ampere (Corriente eléctrica)
m: Metro (Longitud)
Kg: Kilogramo (Masa)
S: Segundo (Tiempo)
°C: Celsius (Temperatura)

Unidades Derivadas

m²: Metro cuadrado m² (Superficie o área)
m³: Metro cúbico (Volumen)
m/s: Metro por segundo (Velocidad)
m/s²: Metro por segundo al cuadrado (Aceleración)
J: Joule (Energía, Trabajo)
W: Watt (Potencia)

Formato

"." separador decimal
"," separador de miles

1. Antecedentes y justificación del estudio

El D.S. N°31/2016 del MMA, del 24 de noviembre de 2017, que establece el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago (en adelante PPDA), tiene por objetivo dar cumplimiento a las normas primarias de calidad ambiental de aire, asociadas a los contaminantes Material Particulado Respirable (MP10), Material Particulado Fino Respirable (MP2,5) y Ozono (O₃), en un plazo de 10 años.

Mediante Resolución Exenta N°1442 del MMA, de 24 de noviembre de 2022, se da inicio al proceso de revisión y actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana. Para lo anterior se requiere contar con el inventario de emisiones de contaminantes locales de los distintos sectores identificados en el PPDA vigente.

Durante el año 2023, se realizó un estudio denominado “INVENTARIO DE EMISIONES SECTOR TRANSPORTE EN LA REGIÓN METROPOLITANA” (de ahora en adelante, “Estudio 2023”¹) encargado por la Secretaría Regional Ministerial de la Región Metropolitana (SEREMI MA RM). En este estudio se desarrolló el inventario de emisiones del sector Transporte en ruta para la Región Metropolitana.

El estudio mencionado previamente es la base para poder avanzar en la evaluación de medidas de descontaminación atmosférica para la RMS en el sector transporte, sin embargo, para la priorización de dichas medidas se requiere adicionalmente realizar una evaluación detallada del potencial de reducción de emisiones en cada caso, además de evaluar los costos asociados a estas medidas, que es lo que se busca en el presente estudio.

Los resultados que se buscan en este estudio son de gran importancia para poder realizar el Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) que tendrá el nuevo Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) de la RMS, insumo esencial en el proceso de actualización de este instrumento.

¹ Disponible en: <https://airerm.mma.gob.cl/documentos/>

2. Objetivos del estudio

2.1 Objetivo general

Determinar medidas de reducción de emisiones de material particulado, sus precursores y otros gases para el sector transporte en ruta y fuera de ruta, además de generar los insumos necesarios para llevar a cabo el Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) sobre estas medidas, en el marco de la actualización del PPDA RMS.

2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar un análisis cualitativo de las medidas actuales del PPDA RMS y de otras normativas asociadas al sector transporte que tengan injerencia en las emisiones atmosféricas, que permita identificar sinergias con la actualización del presente Plan.
- b) Hacer un diagnóstico cuantitativo de las medidas actuales del capítulo de Fuentes Móviles del PPDA RMS, para luego obtener una proyección del inventario de emisiones del sector transporte, tanto en ruta como fuera de ruta.
- c) Proponer medidas nuevas y/o una mantención o modificación de las medidas actuales, para la actualización del presente Plan, donde se indique descripción, justificación y costos asociados a cada una de ellas.
- d) Determinar el potencial de reducción de emisiones de las medidas propuestas, con una proyección de 15 años a partir del año base 2022. Lo anterior puede ser para medidas por separado o grupos de ellas, considerando la interacción entre medidas.

2.3 Alcance de este informe

El presente informe contiene el desarrollo de todas las actividades asociadas al cumplimiento los objetivos específicos a), b), c) y d), en los términos descritos en las Bases Técnicas. En la Tabla 2-1 se presenta la sección en la cual se aborda cada actividad.

Tabla 2-1 Actividades abordadas en el presente informe

Actividad del objetivo específico	Sección del Informe
a.1) Revisar estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)”	Sección 3.1
a.2) Revisar el estudio “Revisión de las Medidas del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana de Santiago – PPDA” para evaluar qué medidas deberían mantenerse, retirarse o modificarse en la actualización del PPDA RMS	Sección 3.2
a.3) Levantamiento de información y revisión de normativas asociadas al sector transporte que tengan injerencia en las emisiones atmosféricas de la RM	Sección 3.3
b.1) Revisar estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)”	Sección 4.1
b.2) Recopilar y analizar información cuantitativa referente al cumplimiento de las medidas de los artículos 8, 9 y 120 del PPDA RMS	Sección 4.2
b.3) Desarrollar una herramienta que permita evaluar las medidas de los artículos señalados, en términos de reducción de emisiones reales	Sección 4.3
b.4) Proyección del inventario de transporte en ruta, a 15 años, y de inventario de MMFR, a 16 años	Sección 4.4
c.1) Revisión de antecedentes nacionales e internacionales sobre medidas de reducción de emisiones atmosféricas de fuentes móviles no incluidas en el actual PPDA	Sección 5.1
c.2) Proponer medidas (nuevas y/o mantención o modificación de las actuales) para actualizar el PPDA RMS	Sección 5.2
c.3) Identificar y calcular los costos incrementales de inversión, operación y mantención de cada medida	Sección 5.3
d.1) Establecer una metodología para determinar los potenciales de reducción de emisiones de las medidas propuestas y aplicar a herramienta construida en Actividad b.3)	Sección 6.1
d.2) Aplicar la herramienta construida y obtener los potenciales de reducción de emisiones de las medidas propuestas	Sección 6.2
d.3) Proyectar los potenciales de reducción de emisiones y los costos de cada medida y sus escenarios	Sección 6.2
d.4) Analizar y priorizar las medidas propuestas en términos de costos, potencial de reducción y dificultad de implementación	Sección 0
d.5) Realizar recomendaciones de implementación de las medidas propuestas considerando escenarios de gradualidad en la implementación	-

Fuente: Elaboración propia

3. Análisis cualitativo de las medidas actuales del PPDA RMS y de otras normativas asociadas al sector transporte que tengan injerencia en las emisiones atmosféricas, que permita identificar sinergias con la actualización del presente Plan

3.1 Revisión de estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)”

Se realizó una revisión del estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)” (Geasur, 2015), enfocada especialmente en las medidas que con posterioridad se incluyeron en el actual PPDA RMS, presentadas en la Tabla 3-1. La revisión de las medidas incluye aspectos de perfil de costos, eficiencia de abatimiento por contaminante, así como otros aspectos de factibilidad y criterios de selección.

Tabla 3-1 Medidas evaluadas en estudio, incluidas en el PPDA RMS

Medida evaluada en estudio	Medida en PPDA RMS	Artículo
Zona de baja emisión	Zona de baja emisión ² en la Región Metropolitana de Santiago, con restricción al ingreso de vehículos pesados con antigüedad superior a 12 años.	8
Aplicación Euro VI/EPA2010 para buses de Transantiago	Exigencia de norma Euro VI a flota del Transantiago.	4
Restricción vehicular para vehículos con sello verde	Restricción permanente por antigüedad a vehículos con Sello Verde, entre mayo y agosto.	120
Aplicación límites finales ASM	Mayor exigencia en control de emisiones en plantas de revisión técnica.	9
Programa de reducción de emisiones para maquinaria de construcción	Uso de filtros de partículas cerrados para el total de la maquinaria móvil fuera de ruta de construcción que tenga una potencia superior a 56 kW e inferior o igual a 560 kW.	18

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

A continuación, se detalla la información recopilada para cada medida.

3.1.1 Medida 1: Zona de baja emisión

La medida restringe la circulación de camiones con una antigüedad de más de 12 años o 18 años si cuenta con Filtro de Partículas y cuentan con estándar mínimo Euro III. Esto se propone en el

² Vías ubicadas al interior del anillo Américo Vespucio, con excepción de las autopistas y las vías de paso.

estudio (Geasur, 2015) considerando principalmente los efectos de MP2.5 en la salud de las personas, ya que puede generar agravamiento de las alergias y el asma, incremento de las bronquitis, además de tener un carácter cancerígeno. Además, estudios demuestran que muchos ataques cardíacos se deben a la alta concentración de partículas cerca de las calles de tráfico denso (Hoffmann, 2006).

En el estudio que, mediante el DS 18/2001 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, se estableció una restricción vehicular en Santiago para camiones dentro del Anillo Américo Vespucio, basada en la antigüedad del vehículo y su nivel de opacidad, con fines de mejorar la seguridad, evitar el deterioro de los pavimentos y controlar la congestión vehicular y la contaminación atmosférica. El estudio evalúa la posibilidad de mejorar esta medida con la implementación de la zona de baja emisión (en adelante, ZBE), enfocándose en reducir las emisiones contaminantes.

A continuación, se expone el perfil de costos, la eficiencia de abatimiento por contaminante, aspectos de factibilidad, entre otros criterios de selección.

3.1.1.1 Perfil de Costos

- Costo Camiones con Tecnologías Euro III y Euro V:
 - Vehículos nuevos con Tecnología Euro V: Se asume que las empresas afectadas adquirirán vehículos nuevos para evitar la restricción de circulación en la zona de baja emisión. Para estimar el costo incremental, se utilizó una muestra de 341 precios de venta de camiones, agrupados en categorías (livianos, medianos y pesados), y se aplicó una regresión lineal para asignar precios a cada estándar tecnológico según su antigüedad.
 - Camiones con Tecnología Euro III o IV: Los camiones que cuenten con filtro de partículas requerirán un costo de mantenimiento anual de USD 600 para los livianos y medianos, y USD 1,070 para los pesados.
 - Camiones con Tecnología Euro V: Estos camiones requerirán un costo de mantenimiento anual considerablemente más alto, de USD 7,500 para los livianos, USD 4,700 para los medianos, y USD 1,100 para los pesados, principalmente por el suministro de aditivo necesario para el sistema de control de emisiones SCR.
- Costo adquisición de filtro de partículas: Dependerá netamente del rango de potencia del motor. Además, existen costos de mantención asociados a estos filtros.
- Costo aditivo SCR: Se estima que el precio del aditivo SCR es de CLP \$840 por litro, y su consumo es proporcional al consumo de combustible a una tasa del 5%.
- Costo Fiscalización: Se estima que el costo de fiscalización de la medida requerirá una inversión inicial de MMUSD 12 en un sistema de cámaras para monitoreo del Centro Estratégico del Programa Nacional de Fiscalización del Ministerio de Transportes.
- Costos anuales de administración: Se contempla un costo anual de MMUSD 1,4 para la administración del sistema de monitoreo.
- Costos de consumo de combustible.

A continuación, en la Tabla 3-2, se presenta un resumen del perfil de costos ya mencionado. Se considera el valor del dólar estadounidense vigente en la fecha de publicación del estudio, noviembre de 2015, el cual era de \$704 CLP.

Tabla 3-2 Perfil de Costos medida Zona de Baja Emisión

Perfil de Costos ZBE	Costos	Unidad
Costo adquisición filtro de partículas motor <18 kW	564	USD
Costo adquisición filtro de partículas motor 18 kW - 37 kW	676	USD
Costo adquisición filtro de partículas motor 37 kW - 75 kW	845	USD
Costo adquisición filtro de partículas motor 75 kW - 130 kW	1.015	USD
Costo adquisición filtro de partículas motor 130 kW - 560 kW	1.409	USD
Camiones-Liviano con Tecnología Euro III	9.158.188	CLP
Camiones-Mediano con Tecnología Euro III	16.591.000	CLP
Camiones-Pesado con Tecnología Euro III	28.386.000	CLP
Camiones-Liviano con Tecnología Euro V	12.767.218	CLP
Camiones-Mediano con Tecnología Euro V	20.151.000	CLP
Camiones-Pesado con Tecnología Euro V	36.666.667	CLP
precio del aditivo SCR	840	CLP/litro
Costo de Fiscalización	12	MMUSD
	1,4	MMUSD/año
Costos Anuales de Administración	2,2	MMUSD/año
Costos Combustible		
Camiones Livianos Diésel Sin norma	79,3	CLP\$/km
Camiones Livianos Diésel Euro I	63,5	CLP\$/km
Camiones Livianos Diésel Euro II	61,2	CLP\$/km
Camiones Livianos Diésel Euro III	64,4	CLP\$/km
Camiones Livianos Diésel Euro IV	64,4	CLP\$/km
Camiones Livianos Diésel Euro V	61,8	CLP\$/km
Camiones Livianos Diésel Euro III con filtro	65,7	CLP\$/km
Camiones Medianos Diésel Sin norma	118,8	CLP\$/km
Camiones Medianos Diésel Euro I	104,2	CLP\$/km
Camiones Medianos Diésel Euro II	100,9	CLP\$/km
Camiones Medianos Diésel Euro III	105,5	CLP\$/km
Camiones Medianos Diésel Euro IV	102,6	CLP\$/km
Camiones Medianos Diésel Euro V	99,3	CLP\$/km
Camiones Medianos Diésel Euro III con filtro	107,7	CLP\$/km
Camiones Pesados Diésel Sin norma	191,8	CLP\$/km
Camiones Pesados Diésel Euro I	166,9	CLP\$/km
Camiones Pesados Diésel Euro II	162,7	CLP\$/km

Perfil de Costos ZBE	Costos	Unidad
Camiones Pesados Diésel Euro III	168,6	CLP\$/km
Camiones Pesados Diésel Euro IV	164,6	CLP\$/km
Camiones Pesados Diésel Euro V	158,6	CLP\$/km
Camiones Pesados Diésel Euro III con filtro	172	CLP\$/km
Mantenimiento filtro partículas		
Camiones Livianos Diésel Euro III con filtro	9,8	CLP\$/km
Camiones Medianos Diésel Euro III con filtro	8,97	CLP\$/km
Camiones Pesados Diésel Euro III con filtro	12,67	CLP\$/km

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

3.1.1.2 Eficiencia de Abatimiento

Para la zona de baja emisión se plantean diversas alternativas tecnológicas de abatimiento que podrían ser permitidas dentro de la zona para reducir las emisiones contaminantes. Actualmente existe una normativa de certificación de filtro de partículas en los buses de transporte público la cual se podría extender a los camiones. Una de las recomendaciones además es el reacondicionamiento de camiones particularmente en una segunda fase de exigencia para motores estándares Euro III, que debe incluir la instalación de filtro de partículas diésel (DPF), tecnología que permite la reducción del 97% del material particulado ultrafino.

Con respecto al sistema de certificación de tecnología de abatimiento, es fundamental así regular que los filtros de PDF instalados cumplan con los altos estándares de calidad, considerando el efecto a la salud de las personas que significa la exposición a este contaminante. No todos los filtros disponibles garantizan una eficiencia por lo que se recomienda una implementación sistema de certificación riguroso, considerando certificación internacional y pruebas locales de compatibilidad, asegurando su funcionalidad en la región de estudio.

Con la tecnología, se proyecta una eficiencia significativa, con valores de disminución del 76,80% en las emisiones de MP2.5 y una disminución del 37,10% en las emisiones de NOx, contribuyendo significativamente a la mejora de la calidad del aire dentro de la ZBE y a la protección de la salud pública.

3.1.1.3 Factibilidad

Con respecto a la factibilidad, la experiencia de Estocolmo con la definición de una ZBE da una visión esperanzadora, ya que la zona redujo significativamente las emisiones de contaminantes. La zona afecta 30% de la población, y demostró su efectividad en un estudio del 2000, donde se reveló que después de su implementación, disminuyeron las emisiones de NOx en un 10% y de MP en un 40%, proveniente de vehículos pesados. Esto significó que, a nivel de contaminación general, se redujeron el 1,3% de NOx y el 3% de MP en comparación a un escenario sin ZBE.

Además, considerando el transporte de carga urbano en Santiago, un estudio de 1995 mostró que 1,7% de los viajes de carga en la ciudad no tiene origen y destino dentro de la zona de baja emisión, lo que sugiere que gran proporción de los vehículos de carga se verían directamente afectados por la medida. Los sectores de construcción, alimentación e industria destacan como los que tienen mayor participación en términos de número de vehículos y capacidad de carga, lo que destaca la importancia de considerar estas actividades en la implementación de la ZBE.

3.1.1.4 Criterios de Selección identificados en el estudio

A continuación, se listan los criterios de selección identificados en estudio revisado (Geasur, 2015):

- Existencia de Alternativas de tecnología de abatimiento.
- Experiencia internacional.
- Existencia de sistemas de certificación de las tecnologías de abatimiento.

3.1.2 Medida 2: Aplicación Euro VI/EPA2010 para buses de Transantiago

La norma Euro VI establece límites más estrictos para emisiones de NOx y MP. Brasil, el principal proveedor de buses para Transantiago para el 2019 tenía contemplado implementar Euro 6 en sus buses, reemplazando la norma Euro 5, que tiene como principal dificultad las altas emisiones de NOx durante su operación, especialmente en zonas urbanas, a pesar de estar homologado bajo regulaciones más estrictas. Este problema se debe al bajo rendimiento del sistema de reducción catalítica selectiva (SCR) a bajas temperaturas, algo que no se refleja en las pruebas de homologación, ya que no simulan adecuadamente las condiciones reales de operación urbana ni incluyen mediciones con el motor en frío.

Además, los motores Euro V siguen emitiendo niveles elevados de material particulado, ya que las normativas hasta ese nivel solo regulan la masa de partículas y no la cantidad de nanopartículas. Aunque se ha reducido la masa total, el número de partículas ha permanecido alto, resultando en emisiones de partículas más pequeñas, que son más respirables y perjudiciales para la salud.

3.1.2.1 Perfil de Costos

- Costos adquisición EURO VI: El costo de implementar la medida para actualizar la flota vehicular a tecnologías Euro VI o Euro VI-Híbrido incluye el costo incremental de reemplazar un bus con estándar Euro V por uno con un estándar tecnológico superior. Según los datos proporcionados por los distribuidores (Kaufmann y Volvo Chile), los costos de los buses Euro VI son entre un 15% a 20% mayores que los de los Euro V.
- Costo adquisición de filtro de partículas: Dependerá netamente del rango de potencia del motor. Además, existen costos de mantenimiento asociados a estos filtros.

- Costos de consumo de combustible: A pesar del mayor costo inicial, los buses Euro VI han demostrado ser más eficientes en términos de consumo de combustible, logrando una reducción del 4%-8% respecto a los Euro V.
- Costo aditivo SCR: Se estima que el precio del aditivo SCR es de CLP \$840 por litro, y su consumo es proporcional al consumo de combustible a una tasa del 5%.

La Tabla 3-3 muestra un resumen del perfil de costos previamente mencionado, utilizando como referencia el valor del dólar estadounidense de noviembre de 2015, que se situaba en \$704 CLP.

Tabla 3-3 Perfil de Costos medida Aplicación Euro VI/EPA 2010

Perfil de Costos	Costos	Unidad
Costos adquisición Euro IV RÍGIDO	230.000	USD
Costos adquisición Euro IV ARTICULADO	310.500	USD
Costo Instalación filtro motor < 18 kW	564	USD
Costo Instalación filtro motor 18 kW - 37 kW	676	USD
Costo Instalación filtro motor 37 kW - 75 kW	845	USD
Costo Instalación filtro motor 75 kW - 13 kW	1.015	USD
Costo Instalación filtro motor 130 kW - 560 kW	1.409	USD
Costo mantención filtro motor < 18 kW	338 * FA	USD/1.000 horas
Costo mantención filtro motor 18 kW - 37 kW	507 * FA	USD/1.000 horas
Costo mantención filtro motor 37 kW - 75 kW	902 * FA	USD/1.000 horas
Costo mantención filtro motor 75 kW - 13 kW	1.240 * FA	USD/1.000 horas
Costo mantención filtro motor 130 kW - 560 kW	2.198 * FA	USD/1.000 horas
Costo consumo combustible Buses licitado urbanos-Articulado	17,4	CLP/km
Costo consumo combustible Buses Urbanos-Rígido	13,5	CLP/km
Costo consumo combustible Buses Urbanos-Turismo	9,9	CLP/km
Precio Aditivo SCR	840	CLP/litro

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

3.1.2.2 Eficiencia de Abatimiento

Los buses Euro VI tienen un límite de emisiones de NOx significativamente más bajo en comparación con Euro V. Esto reduce la formación de NO₂, que es un contaminante con efectos directos en la salud pública, y también disminuye la generación de ozono troposférico.

Para el material particulado, la norma Euro VI establece un límite que es 2-3 veces más bajo que Euro V, lo que contribuye a una menor emisión de este contaminante tan importante para la calidad del aire y la salud. Respecto a las partículas emitidas, Euro VI introduce un límite para el número de aquellas, un aspecto que no estaba regulado en Euro V, lo que mejora la eficiencia en la reducción de partículas ultrafinas. Para dichos contaminantes, se proyecta una disminución de emisiones de 78,70% para MP2.5 y 63,30% para NOx.

3.1.2.3 Factibilidad

Una ventaja es la disponibilidad de distribuidores de buses, pues Kaufmann y Volvo Chile han confirmado la disponibilidad de tecnologías Euro VI en Chile, aunque actualmente se aplica principalmente en camiones.

Sin embargo, también existen desafíos logísticos ya que la adaptación a buses implica la implementación de motores avanzados OM936 y OM471, fabricados en Europa y ensamblados en Brasil. La dependencia de ambos países podría generar demoras y encarecer el proceso.

3.1.2.4 Criterios de Selección identificados en el estudio

- Impacto en la salud pública.
- Euro VI alineada con regulaciones ambientales más estrictas, facilitando cumplimiento normativo.
- Eficiencia energética.

3.1.3 Medida 3: Tecnología de cero y baja emisión para Transantiago

La electrificación del tren de potencia se presenta como la solución definitiva para lograr emisiones cero en el sistema de transporte público, sin embargo, las mejoras en la reducción de emisiones dependen directamente del nivel de hibridización del vehículo, que puede variar desde un sistema "mini-híbrido" hasta un "híbrido completo", además de depender del rango de operación en modo eléctrico (All Electric Range), que determina cuánto tiempo el vehículo puede funcionar exclusivamente con electricidad.

Para evaluar los efectos reales de estas tecnologías, se debe estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y consumo de combustibles fósiles en un análisis que cubra todo el ciclo de vida, conocido como "well-to-wheel", considerando la fuente de energía para los vehículos también pueden generar impacto ambiental y daño en la salud de la población.

3.1.3.1 Perfil de Costos

- Precios por buses: La tecnología de buses híbridos y eléctricos implica costos significativamente mayores en comparación con los buses tradicionales Euro V. Por ejemplo, un bus híbrido Euro V cuesta un 35% más (aproximadamente US\$270.000 frente a US\$200.000), mientras que un bus 100% eléctrico como el ByD K9c tiene un costo 2,25 veces superior al de un bus diésel de tamaño similar.
- Costo adquisición de filtro de partículas: Dependerá netamente del rango de potencia del motor. Además, existen costos de mantención asociados a estos filtros.
- Costo aditivo SCR: Se estima que el precio del aditivo SCR es de CLP \$840 por litro, y su consumo es proporcional al consumo de combustible a una tasa del 5%.

- Costos combustible híbridos.
- Arriendo baterías: Para los buses híbridos, se consideró un costo adicional de operación por el arriendo de las baterías, que es parte del modelo de negocio utilizado por fabricantes como Volvo. Este costo se estimó en 0,137 USD por kilómetro, con un recorrido promedio anual de 70,000 km por bus, según el estudio [Sistemas Sustentables 2013].

La Tabla 3-4 ofrece un resumen del perfil de costos descrito anteriormente, tomando en cuenta el tipo de cambio del dólar estadounidense vigente en noviembre de 2015, equivalente a \$704 CLP.

Tabla 3-4 Perfil de Costos medida Tecnología de cero y baja emisión para Transantiago

Perfil de Costos	Costos	Unidad
Precios 2015, Buses por tipo y por norma		
DIESEL / ELECTRICO (HIBRIDO) EURO V Rígido	280.000	USD
DIESEL / ELECTRICO (HIBRIDO) EURO V Articulado	350.000	USD
DIESEL / ELECTRICO (HIBRIDO) EURO VI Rígido	322.000	USD
DIESEL / ELECTRICO (HIBRIDO) EURO VI Articulado	402.500	USD
COSTOS AD-BLUE CAMIONES Y BUSES CON SCR		
Costos combustible Buses licitado urbanos-Articulado Euro V - HIBRIDO	12,7	CLP/km
Costos combustible Buses licitado urbanos-Articulado Euro VI - HIBRIDO	12,2	CLP/km
Costos combustible Buses licitado urbanos-Rígidos Euro V - HIBRIDO	9,8	CLP/km
Costos combustible Buses licitado urbanos-Rígidos Euro V - HIBRIDO	9,4	CLP/km
Costos combustible Buses licitado urbanos-Turismo Euro V - HIBRIDO	7,2	CLP/km
Costos combustible Buses licitado urbanos-Turismo Euro V - HIBRIDO	14,1	CLP/km
Costo mantención filtro partículas Buses Urbanos-Articulado Euro VI - HIBRIDO	8,3	CLP/km
Costo mantención filtro partículas Buses Urbanos-Rígidos Euro VI - HIBRIDO	4,68	CLP/km
Costo mantención filtro partículas Buses Urbanos-Turismo Euro VI - HIBRIDO	4,68	CLP/km
COSTO CONSUMO DE COMBUSTIBLE		
Buses licitado urbanos-Articulado Euro V - Híbrido	180,9	CLP/km
Buses licitado urbanos-Articulado Euro VI - Híbrido	173,7	CLP/km
Buses licitado urbanos-Rígido Euro V - Híbrido	140,4	CLP/km
Buses licitado urbanos-Rígido Euro VI - Híbrido	134,8	CLP/km
Buses licitado urbanos Euro V - Híbrido	102,6	CLP/km
Buses licitado urbanos Euro VI - Híbrido	201,1	CLP/km
Arriendo baterías eléctricas	0,137	USD/km
Costo Instalación filtro motor < 18 kW	564	USD
Costo Instalación filtro motor 18 kW - 37 kW	676	USD
Costo Instalación filtro motor 37 kW - 75 kW	845	USD
Costo Instalación filtro motor 75 kW - 13 kW	1.015	USD

Perfil de Costos	Costos	Unidad
Costo Instalación filtro motor 130 kW - 560 kW	1.409	USD

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

3.1.3.2 Eficiencia de Abatimiento

La incorporación de tecnología híbrida o eléctrica reduce considerablemente la dependencia de los combustibles fósiles, aunque su efectividad varía según el nivel de hibridación y el rango de operación en modo eléctrico (All Electric Range). En cuanto a la proyección de eficiencia de estas medidas, se consideraron dos escenarios de modelamiento: el primero, sin corredores segregados exclusivos para buses Transantiago, prevé una reducción del 78,9% en MP2.5 y un 63,5% en NOx; mientras que el segundo, con corredores exclusivos para buses, mejoraría las reducciones a un 82,0% en MP2.5 y un 70,3% en NOx.

3.1.3.3 Factibilidad

En Chile, solo Volvo ofrece un bus híbrido en el mercado, similar a los buses B2 de Transantiago. Para la tecnología 100% eléctrica, el ByD K9c es el único modelo disponible que es homologable a un bus tipo B1 o B2. Ambos aspectos muestran que la disponibilidad de distribuidores buses existe, pero limitada. La viabilidad económica también para ser un desafío pues, los costos incrementales de la tecnología híbrida y eléctrica debieran ser cubiertos mediante tarifas, subsidios o incentivos como la extensión de los contratos de concesión. (ejemplo: una extensión de seis meses en el contrato para las empresas que adopten tecnologías más eficientes, lo que podría aplicarse a un 5% de la flota, generando un ahorro del 1.5% en el consumo total de combustible.)

3.1.3.4 Criterios de Selección identificados en el estudio

- Eficiencia energética.
- La electrificación y la hibridización pueden reducir significativamente las emisiones de GEI y mejorar la calidad del aire en zonas urbanas.

3.1.4 Medida 4: Restricción vehicular

Aunque la restricción vehicular comenzó en 1986 para reducir la contaminación, tras 25 años se ha visto que afecta poco a los autos sin convertidor catalítico, que ahora representan solo el 2% del tráfico y las emisiones. Además, los autos con sello verde más antiguos emiten más contaminación de lo esperado, lo que sugiere la necesidad de rediseñar la medida, enfocándola en ciertos tipos de vehículos. A partir de 2016, la restricción vehicular en Santiago se amplió para incluir, entre el 1 de mayo y el 31 de agosto, a vehículos de más de 7 años de uso, incluidas motocicletas, autos livianos y medianos, incluso aquellos con sello verde. Los nuevos vehículos deben cumplir con los estándares de emisiones Euro 5 para autos y Euro 3 para motocicletas.

3.1.4.1 Perfil de Costos

- Precios Sociales 2015 de automóviles livianos, medianos y motocicletas:** Los costos considerados para esta medida corresponden a la compra de vehículos nuevos, según precios sociales asociados a renovación de parque vehicular. Para estimar el costo de motocicletas y vehículos livianos, se utilizó una muestra de 234 precios de venta y datos del avalúo del Servicio de Impuestos Internos. Se realizaron regresiones lineales en función de la antigüedad de los vehículos, y luego se ajustaron a precios sociales, eliminando el IVA y los aranceles, siguiendo las recomendaciones del Ministerio de Desarrollo Social (2015). Para calcular el costo anual del vehículo nuevo, se consideró una vida útil de 8 años, una tasa de descuento del 6%, y un valor residual del 20% del valor inicial al final de su vida útil (20 años).

El perfil de costos, resumido en la Tabla 3-5, considera el valor del dólar estadounidense en noviembre de 2015, cuando la cotización era de \$704 CLP.

Tabla 3-5 Perfil de Costos medida Restricción Vehicular

Tipo vehículo	Precio social 2015
Automóviles medianos diesel	15.200
Automóviles medianos gasolinero	13.200
Automóviles livianos diesel	13.000
Automóviles livianos gasolinero	8.800
Motocicletas diesel	0
Motocicletas gasolinera	3.500

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

3.1.4.2 Eficiencia de Abatimiento

En su primera aplicación, la restricción vehicular tuvo un impacto notable la disminución de emisiones, sin embargo, su efectividad ha disminuido con el tiempo ya que actualmente los autos sin convertidor catalítico sólo representan el 2% del tráfico y las emisiones y los vehículos con sello verde más antiguo están creando más contaminación de lo estimado. Sin embargo, considerando la proyección de la medida planteada, se observa una gran disminución en los contaminantes, con un 76,9% para las emisiones de MP2.5 y disminución de 24,5% para NOx.

3.1.4.3 Factibilidad

Dado que la restricción vehicular ya se encuentra vigente, el desafío actual es adaptarla y modificarla, algo que no parece de gran dificultad ya que ha sido modificada en el pasado para incluir o excluir cierto tipo de vehículos. Dado que los autos con convertidor catalítico más antiguos están emitiendo más de lo previsto, existe la necesidad de actualizar las reglas para reflejar mejor la realidad actual del parque vehicular.

3.1.4.4 Criterios de Selección identificados en el estudio

- Renovación acelerada del parque vehicular, lo cual implica la sustitución de vehículos más antiguos por vehículos nuevos con estándares tecnológicos superiores.
- Inicialmente, la restricción vehicular tuvo un impacto significativo en la reducción de emisiones.

3.1.5 Medida 5: Límites finales ASM

En septiembre de 2008, se introdujo en la Región Metropolitana un nuevo método de control de emisiones vehiculares en las Plantas de Revisión Técnica, conocido como ASM, basado en los límites recomendados por la Agencia Ambiental de Estados Unidos (EPA). Sin embargo, aún no se han implementado los límites finales recomendados por la EPA, pero en el PPDA busca establecer estos estándares finales.

Estos límites de emisión se encuentran definidos en 6 tablas en el Decreto Supremo 149/2009, donde las primeras cinco tablas clasifican los vehículos según su inercia equivalente y el año de fabricación, y asigna límites de emisión específicos para ellos. Por otro lado, la sexta tabla del DS aplica a los vehículos que no están en las primeras cinco, y sus límites dependen de la cilindrada del motor, el tipo de vehículo y el año de fabricación.

3.1.5.1 Perfil de Costos

- Costo convertidor catalítico de reposición.
- Costo mano de obra.
- Costo de diagnóstico de vehículos.
- Costo de implementación y administración RSD: La aplicación de RSD en la Región Metropolitana implica la adquisición e instalación de equipos de monitoreo que utilizan rayos ultravioletas e infrarrojos para medir las emisiones vehiculares en tiempo real, sin necesidad de detener los vehículos. Aparte de la inversión inicial, existen costos recurrentes asociados con el mantenimiento de los equipos RSD y la operación del sistema de monitoreo (incluye el reemplazo de componentes, calibración regular de los sensores, y la supervisión continua de las mediciones).

La Tabla 3-6 sintetiza el perfil de costos previamente mencionado, considerando el tipo de cambio del dólar estadounidense en noviembre de 2015, fijado en \$704 CLP.

Tabla 3-6 Perfil de Costos medida Límites ASM

Perfil de Costos	Costos	Unidad
Convertidor catalítico de reposición	121	USD/km
Mano de obra	17	USD/km

Perfil de Costos	Costos	Unidad
Costo de diagnóstico	37	USD/km
Costos de implementación y administración RSD	2,2	MMUSD/año

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

3.1.5.2 Eficiencia de Abatimiento

La implementación de los límites finales del ASM está diseñada para reducir drásticamente las emisiones de los vehículos en circulación, mejorando así la calidad del aire. Los vehículos que no cumplan con estos nuevos estándares serán rechazados en las Plantas de Revisión Técnica (PRT), incentivando tanto la reparación como el retiro de los vehículos más contaminantes. Se estima que esta medida estricta incrementará las tasas de rechazo en la PRT, lo que contribuirá a reducir los factores de emisión (FE) de la flota vehicular, ya que solo los vehículos más limpios podrán pasar la revisión. Esto se respalda con la modelación de emisiones, donde las proyecciones indican una disminución del 48,40% en las emisiones de MP2.5 y del 10,20% en las emisiones de NOx.

3.1.5.3 Factibilidad

Para ser implementado, las PRT deben estar equipadas con tecnologías necesarias para medir los límites de emisión recomendados por la EPA, por lo que se requiere una viabilidad técnica, considerando además una transición que se implemente tanto en el sector público y privado. La medida puede ser viable para los propietarios de vehículos más nuevos que están más cerca de cumplir con los nuevos estándares. Sin embargo, para propietarios de vehículos más antiguos, la medida podría resultar en la necesidad de reparaciones costosas o en la salida del vehículo del parque automotor, lo cual puede ser un desafío financiero.

3.1.5.4 Criterios de Selección identificados en el estudio

- Mejora significativamente la capacidad de detectar vehículos con altas emisiones.

3.1.6 Medida 6: Límites de emisión con RSD ("limpio y sucio") para vehículos livianos y pesados

Esta medida implementa la medición de las concentraciones de Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos (HC), Monóxidos de Nitrógeno (NO) y Material Particulado en los gases de escape, mediante la tecnología Remote Sensing Device (en adelante, RSD por sus siglas en inglés) que permite un monitoreo continuo y a tiempo real.

3.1.6.1 Perfil de Costos

- Costo de implementación y administración RSD: Costo de implementación y administración RSD: La aplicación de RSD en la Región Metropolitana implica la

adquisición e instalación de equipos de monitoreo que utilizan rayos ultravioletas e infrarrojos para medir las emisiones vehiculares en tiempo real, sin necesidad de detener los vehículos. Aparte de la inversión inicial, existen costos recurrentes asociados con el mantenimiento de los equipos RSD y la operación del sistema de monitoreo (incluye el reemplazo de componentes, calibración regular de los sensores, y la supervisión continua de las mediciones). Se observa el perfil en la Tabla 3-7, considerando el tipo de cambio de dólar estadounidense vigente en noviembre del 2015, fijado en \$704 CLP.

Tabla 3-7 Perfil de Costos medida Límites con RSD

Perfil de Costos	Costos	Unidad
Costos de implementación y administración RSD	2,2	MMUSD/año

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

3.1.6.2 Eficiencia de Abatimiento

La implementación del RSD puede complementar y optimizar la eficiencia del sistema actual de Inspección y Mantenimiento (I/M) en la Región Metropolitana. Al identificar inconsistencias y vehículos que superan las revisiones técnicas a pesar de emitir altos niveles de contaminación, se mejora el control sobre las emisiones de los vehículos. Según la proyección, se espera una reducción del 28,40% en las emisiones de MP2.5 y del 10,20% en las emisiones de NOx.

3.1.6.3 Factibilidad

La factibilidad de esta medida depende netamente de la tecnología RSD, existiendo principalmente desafíos técnicos, ya que la calibración precisa de los equipos y la necesidad de colocarlo en ubicación estratégica es fundamental para su funcionalidad. También existen barreras institucionales relacionadas con la integración de esta tecnología en el sistema regulatorio vigente y la coordinación entre distintas entidades responsables. Por último, la implementación del RSD puede encontrar resistencia si no se comunica adecuadamente a la población, por lo que es esencial llevar una campaña de difusión que explique cómo esta tecnología nos puede beneficiar a todos.

3.1.6.4 Criterios de Selección identificados en el estudio

- Mejora significativamente la capacidad de detectar vehículos con altas emisiones. Los análisis realizados por instituciones como DICTUC han revelado problemas significativos en la consistencia de los resultados de las Plantas de Revisión Técnica (PRT), con registros de dióxido de carbono, oxígeno, y balance de masa que no concuerdan con los valores esperados. Esto resalta la necesidad de una tecnología como RSD para complementar y validar los resultados obtenidos por el sistema actual.

3.1.7 Medida 7: Programa reducción emisiones para maquinaria construcción

Esta medida considera que las maquinarias del sector construcción pertenecientes a proyectos públicos - con potencias superiores o iguales a 56[kW] - son reacondicionadas con filtros de partículas. Esta medida se basa en ejemplos internacionales como Suiza, donde se exige el uso de filtros de partículas (DPF) para toda la maquinaria de construcción, y en otros países como Austria y Suecia, que aplican esta medida en áreas específicas. Además, se considera la implementación de esquemas de construcción completamente limpios, aplicados mediante planes que abarcan no solo la maquinaria, sino también otras fuentes de partículas y polvo, emisiones de ruido y aspectos de seguridad, como se aplica en Londres.

3.1.7.1 Perfil de Costos

- Costo adquisición filtro de partículas.
- Costo mantención filtro de partículas para maquinaria de construcción.
- Costo de combustible con y sin filtro.

En la Tabla 3-8 se detalla el perfil de costos ya mencionado, empleando como referencia el valor del dólar estadounidense vigente en noviembre de 2015, de \$704 CLP.

Tabla 3-8 Perfil de Costos medida Maquinaria Construcción

Perfil de Costos	Costos	Unidad
Costo adquisición filtro de partículas motor <18 kW	564	USD
Costo adquisición filtro de partículas motor 18 kW - 37 kW	676	USD
Costo adquisición filtro de partículas motor 37 kW - 75 kW	845	USD
Costo adquisición filtro de partículas motor 75 kW - 130 kW	1.015	USD
Costo adquisición filtro de partículas motor 130 kW - 560 kW	1.409	USD
Costo mantención Filtro Maquinaria Construcción		
19 ≤ kW < 37	177,55	CLP/hr
37 ≤ kW < 56	246,59	CLP/hr
56 ≤ kW < 75	315,64	CLP/hr
75 ≤ kW < 130	374,82	CLP/hr
130 ≤ kW < 300	601,69	CLP/hr
300 ≤ kW < 560	769,37	CLP/hr
Costos combustible S/Filtro		
19 ≤ kW < 37 (4,41 lt/hr)	2.648,49	CLP/hr
37 ≤ kW < 56 (6,18 lt/hr)	3.705,34	CLP/hr
56 ≤ kW < 75 (7,64 lt/hr)	4.585,42	CLP/hr
75 ≤ kW < 130 (15,99 lt/hr)	9.592,93	CLP/hr
130 ≤ kW < 300 (33,09 lt/hr)	19.854,65	CLP/hr
300 ≤ kW < 560 (66,27 lt/hr)	39.761,85	CLP/hr
Costos combustible C/Filtro		

Perfil de Costos	Costos	Unidad
$19 \leq kW < 37$ (4,5 lt/hr)	2.701,46	CLP/hr
$37 \leq kW < 56$ (6,3 lt/hr)	3.779,44	CLP/hr
$56 \leq kW < 75$ (7,8 lt/hr)	4.677,13	CLP/hr
$75 \leq kW < 130$ (16,31 lt/hr)	9.784,79	CLP/hr
$130 \leq kW < 300$ (33,75 lt/hr)	20.251,74	CLP/hr
$300 \leq kW < 560$ (67,60 lt/hr)	40.557,09	CLP/hr

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

3.1.7.2 Eficiencia de Abatimiento

La implementación de filtros de partículas en la maquinaria de construcción se espera que reduzca de manera significativa las emisiones de MP2.5, que actualmente constituyen el 22% de las emisiones del sector transporte. Estos filtros tienen una alta eficiencia, con la capacidad de disminuir hasta el 90% de las partículas emitidas. En la modelación de emisiones se proyecta que la medida logrará una reducción del 35% en las emisiones de MP2.5.

Aunque los filtros de partículas no están diseñados específicamente para reducir NOx, que representa un 12% de las emisiones del sector, su uso junto con otras tecnologías de control de emisiones puede contribuir a una disminución notable de estos contaminantes.

3.1.7.3 Factibilidad

La medida se basa en esquemas ya implementados en países europeos como Suiza, Austria, y el Reino Unido, lo que demuestra su viabilidad técnica. La experiencia internacional demuestra un desafío financiero, por lo que sugiere que la adopción de esta medida pueda ser costeaable mediante incentivos fiscales y/o programas de financiamiento para la adquisición instalación de filtros.

3.1.7.4 Criterios de Selección identificados en el estudio

- Dado que la maquinaria de construcción opera en áreas urbanas densamente pobladas, la reducción de sus emisiones tiene un impacto directo en la calidad del aire local.

3.1.8 Medida 8: Implementación corredores transporte público

Infraestructura diseñada exclusivamente para servicios de transporte público de pasajeros, segregada físicamente del tráfico vehicular general. Esta medida optimiza la asignación del espacio vial al considerar que el transporte público masivo es más eficiente en términos de uso del espacio y emisiones por cada pasajero transportado.

3.1.8.1 Perfil de Costos

- Costo inversión: La creación de corredores segregados para buses implica una inversión significativa en infraestructura. Los costos principales incluyen la construcción de los corredores exclusivos, que estarán físicamente separados del flujo vehicular general, y la instalación de paraderos con sistemas de pago extravehicular. Estos costos han sido estimados en base a los valores sociales reportados en el Plan Maestro de Transporte Santiago 2025, y se han ajustado para incluir solo los corredores adicionales a los ya planificados para el periodo 2011-2015.

La evaluación indica que la inversión es de aproximadamente 6.358 millones de pesos chilenos por kilómetro construido.

3.1.8.2 Eficiencia de Abatimiento

Al incentivar el uso del transporte público masivo a través de corredores segregados, se mejora la eficiencia en el uso del espacio vial y se reducen las emisiones de contaminantes por pasajero transportado, lo cual es relevante considerando que la congestión vehicular contribuye significativamente a la contaminación del aire. Además, al separar los buses del público, se reduce la necesidad de frenados y aceleraciones constantes, lo que no sólo mejora la eficiencia del combustible sino que también reduce las emisiones de contaminantes locales. Según la modelación de emisiones realizada para este estudio, se estima una disminución del 50,40% en las emisiones de MP2.5 y del 17,80% en las emisiones de NOx.

3.1.8.3 Factibilidad

Al analizar la viabilidad de esta medida, se destacan principalmente las barreras para su implementación. Estas incluyen elevados costos asociados a la inversión del proyecto, falta de terrenos disponibles, y la necesidad de una planificación a largo plazo. Además, existen obstáculos institucionales, dado que en la actualidad no hay una definición clara sobre quién debe asumir la responsabilidad de la instalación y el mantenimiento.

3.1.8.4 Criterios de Selección identificados en el estudio

- Aumento en la Velocidad Comercial
- Reducción de Tiempos de Viaje

Recopilando todas las medidas, en la Tabla 3-9 se presenta un resumen considerando los aspectos de factibilidad, criterios de selección, eficiencia de reducción en porcentaje y potencial de reducción para el MP y NOx.

Tabla 3-9 Resumen de Eficiencia de Abatimiento y Criterios de Factibilidad para las Medidas Evaluadas

Número Medida	Medida	Descripción medida	Factibilidad	Criterios de Selección	Eficiencia MP 2.5	Eficiencia NOx	Potencial de Reducción MP	Potencial de Reducción NOx
1	Zona de Baja Emisión	Se restringirá la circulación de camiones con una antigüedad de más de 12 años o 18 años si cuenta con Filtro de Partículas y cuentan con estándar mínimo Euro III.	Abarca área significativa de la RM: sólo el 1,7% de los viajes no tiene origen ni destino en la ZBE	Existencia de Alternativas de tecnología de abatimiento	76,80%	37,10%	682,3 TON	8339,6 TON
			Estocolmo redujo 40% de emisiones de MP2.5 con ZBE					
			Estocolmo redujo 10% de emisiones de NOx con ZBE	Existencia de sistemas de certificación de las tecnologías de abatimiento				
2	Aplicación Euro VI/EPA 2010 para Buses Transantiago	Aplicación de la norma Euro VI donde se establecen menores emisiones de NOx y PM.	Disponibilidad comercial de ambos distribuidores (Kaufmann y Volvo Chile)	Los buses Euro VI tienen un límite de emisiones de NOx significativamente más bajo en comparación con Euro V.	78,70%	63,30%	116,7 TON	16537,6 TON
				La norma Euro VI establece un límite de PM que es 2-3 veces más bajo que Euro V				

Número Medida	Medida	Descripción medida	Factibilidad	Criterios de Selección	Eficiencia MP 2.5	Eficiencia NOx	Potencial de Reducción MP	Potencial de Reducción NOx
			Desafíos Logísticos: Motores importados de Europa y ensamblado en Brasil	Euro VI introduce un límite para el número de partículas emitidas (PN), un aspecto que no estaba regulado en Euro V.				
3	Cero y Baja emisión Transantiago	Electrificación del tren de potencia como la solución definitiva de cero emisiones. Mejoras dependen del grado de hibridización.	Disponibilidad Comercial: Actualmente, en Chile, solo Volvo ofrece un bus híbrido en el mercado, similar a los buses B2 de Transantiago.	La electrificación del tren de potencia, especialmente en buses completamente eléctricos, permite alcanzar cero emisiones locales.	ESCENARIO 1 (Sin corredores segregados)			
			Disponibilidad Comercial: Para la tecnología 100% eléctrica, el ByD K9c es el único modelo disponible que es homologable a un bus tipo B1 o B2.		78,90%	63,50%	117,1 TON	16588,6 TON
			Viabilidad económica: Los costos incrementales de la tecnología híbrida y eléctrica deberán ser cubiertos mediante tarifas, subsidios o incentivos como la extensión de los contratos de concesión.	La consideración de las emisiones "well-to-wheel" es crucial para entender el impacto real de estas tecnologías.	ESCENARIO 2 (Con corredores segregados)			
			Viabilidad económica: Se ha propuesto una extensión de seis meses en el contrato para las empresas que adopten		82,00%	70,30%	126,75 TON	18539,1 TON

Número Medida	Medida	Descripción medida	Factibilidad	Criterios de Selección	Eficiencia MP 2.5	Eficiencia NOx	Potencial de Reducción MP	Potencial de Reducción NOx
			tecnologías más eficientes, lo que podría aplicarse a un 5% de la flota, generando un ahorro del 1.5% en el consumo total de combustible.					
4	Restricción vehicular	Medidas que se aplica a sólo ciertos vehículos: Euro 5 para livianos y medianos, y Euro 3 para motocicletas.	La restricción vehicular es una medida adaptable y ha sido modificada en el pasado para incluir o excluir ciertos tipos de vehículos.	<p>Renovación acelerada del parque vehicular, lo cual implica la sustitución de vehículos más antiguos por vehículos nuevos con estándares tecnológicos superiores.</p> <p>Inicialmente, la restricción vehicular tuvo un impacto significativo en la reducción de emisiones</p>	76,90%	24,50%	2113,1 TON	37112,0 TON

Número Medida	Medida	Descripción medida	Factibilidad	Criterios de Selección	Eficiencia MP 2.5	Eficiencia NOx	Potencial de Reducción MP	Potencial de Reducción NOx
5	Límites ASM	Plantas de Revisión Técnica bajo el método ASM, para lo cual se aplicaron los límites iniciales recomendados por la Agencia Ambiental de Estados Unidos.	Viabilidad Técnica: Las PRT deben estar equipadas con la tecnología necesaria para medir y aplicar los límites de emisión recomendados por la EPA.	Mejora significativamente la capacidad de detectar vehículos con altas emisiones	48,40%	10,20%	0 TON	18326,2 TON
			La medida puede ser viable para los propietarios de vehículos más nuevos que están más cerca de cumplir con los nuevos estándares.					
			Para propietarios de vehículos más antiguos, la medida incluye recambio de vehículos nuevos que se encuentran					

Número Medida	Medida	Descripción medida	Factibilidad	Criterios de Selección	Eficiencia MP 2.5	Eficiencia NOx	Potencial de Reducción MP	Potencial de Reducción NOx
			disponibles en el mercado automotriz chileno					
			Para propietarios de vehículos más antiguos, la medida incluye reparaciones que se encuentran disponibles en el mercado automotriz chileno					
6	LÍMITES DE EMISIÓN CON RSD ("LIMPIO Y SUCIO") PARA VEHÍCULOS LIVIANOS Y PESADOS.	Medición de las concentraciones de Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos (HC), Monóxidos de Nitrógeno (NO) y Material Particulado en los gases de escape.	Desafíos técnicos: La calibración precisa de los equipos y la necesidad de colocarlos en ubicaciones estratégicas	Mejora significativamente la capacidad de detectar vehículos con altas emisiones	48,40%	10,20%	0 TON	18326,2 TON
7	PROGRAMA REDUCCIÓN EMISIONES PARA MAQUINARIA CONSTRUCCIÓN	Esta medida considera que las maquinarias del sector construcción pertenecientes a proyectos públicos - con potencias superiores o iguales a 56[kW] - son reacondicionadas con filtros de partículas	Experiencia Internacional	Dado que la maquinaria de construcción opera en áreas urbanas densamente pobladas, la reducción de sus emisiones tiene un impacto directo en la calidad del aire local.	35%	-	1617,1 TON	-
			Suiza					
			Austria					

Número Medida	Medida	Descripción medida	Factibilidad	Criterios de Selección	Eficiencia MP 2.5	Eficiencia NOx	Potencial de Reducción MP	Potencial de Reducción NOx
			Reino Unido					
8	IMPLEMENTACIÓN CORREDORES TRANSPORTE PÚBLICO	Infraestructura dedicada exclusivamente a servicios de transporte público de pasajeros, separados físicamente del flujo vehicular.	Barreras de implementación: Altos costos de inversión, falta de terrenos, planificación a largo plazo, barreras institucionales.	Aumento en la Velocidad Comercial y Reducción de Tiempos de Viaje	50,40%	17,80%	66,6 TON	3367,7 TON

Fuente: Elaboración propia en base a (Geasur, 2015)

3.2 Revisión de estudio “Revisión de las Medidas del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana de Santiago – PPDA” para evaluar qué medidas deberían mantenerse, retirarse o modificarse en la actualización del PPDA RMS

Se realizó una revisión del estudio “Revisión de las Medidas del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana de Santiago – PPDA” (ECOS, 2023), en lo que respecta al sector transporte, para evaluar qué medidas deberían mantenerse, retirarse o modificarse en la actualización del PPDA RMS.

El estudio (ECOS, 2023) detalla el estado de avance de las medidas dirigidas a fuentes móviles, distribuidas entre 13 organismos sectoriales. En particular, se examinaron 31 medidas del capítulo correspondiente, evaluando su grado de conformidad a través de los avances y dificultades observadas durante el periodo 2018-2022.

Para realizar este análisis, se sistematizó la información en una hoja de cálculo, donde se incluyó:

- La medida revisada
- La criticidad de la medida
- Evaluaciones cualitativa y cuantitativa
- Nivel de conformidad
- Brechas identificadas
- Oportunidades de mejora

Además, la sistematización de la información evaluada por el estudio se complementó con aportes adicionales provenientes de las reuniones del Subcomité Operativo de fuentes móviles y del Informe de Estado de Avance del PPDA del año 2023, incorporando datos específicos sobre logros y desafíos en la implementación de las medidas en el sector transporte.

A continuación, se presenta una síntesis de los hallazgos agrupados por las medidas que se mantienen, eliminan, las que están en revisión y las no abordadas, de acuerdo a las reuniones del Subcomité Operativo.

3.2.1 Medidas que se mantienen

Varias medidas cumplen con los criterios de efectividad y nivel de conformidad, por lo que se recomienda mantenerlas en su forma actual. En general, estas medidas han mostrado avances en el cumplimiento de los objetivos y alcanzan un nivel de conformidad "Parcialmente conforme" o "Conforme". A continuación, se profundiza en cada medida a mantener.

3.2.1.1 Límites motores de buses locomoción colectiva urbana en Santiago, San Bernardo y Puente Alto – Artículo 4

La medida permanente “Límite de motores de buses de locomoción colectiva urbana en Santiago, San Bernardo y Puente Alto” establece que los buses destinados a la locomoción colectiva en estas zonas deben contar con motores cuyas emisiones contaminantes no superen los niveles máximos permitidos. La medida busca asegurar que los buses utilizados en el transporte urbano cumplan con normas de emisión que contribuyan a la reducción de la contaminación en la Región Metropolitana, limitando las emisiones de los motores a estándares específicos, como el Euro 6 en la Zona A.

Actualmente, mediante reuniones del Comité Operativo, se establece que esta medida se encuentra en estado de cumplimiento y se mantiene, pero se han identificado oportunidades de mejora. En el estudio (ECOS, 2023) se propone extender la aplicación del límite de emisiones a toda la Región Metropolitana, dado que, en la actualidad, esta norma se aplica principalmente al transporte público en la Zona A, mientras que en otras áreas de la región aún rige la norma Euro 5. Esta ampliación permitiría una regulación más uniforme y acorde con los objetivos del PPDA en toda la región.

El organismo responsable de esta medida es el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, y se clasifica como una regulación de carácter permanente en el Informe estado avance al 2023. El estudio (ECOS, 2023), en términos de criticidad, indica que la medida es de nivel medio, con una evaluación cualitativa "buena" y un nivel de conformidad "Parcialmente conforme". También, entre las brechas identificadas, se observa la falta de claridad en los avances y medidas de verificación, lo que dificulta una evaluación precisa del cumplimiento. Se recomienda no solo extender la obligación a toda la Región Metropolitana, sino también mejorar el sistema de verificación. Aunque el indicador actual permite visualizar la introducción de nuevas tecnologías en el transporte, no es suficiente para garantizar la verificación completa de la medida. Por ello, se sugiere incluir la cuantificación de los buses dados de baja o reacondicionados y contrastar esta cifra con el total de buses registrados que no cumplen con el estándar Euro 6.

3.2.1.2 Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para vehículos de STP – Artículo 5

La Medida Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para Vehículos de Sistemas de Transporte Público (STP), tiene como objetivo la creación de un programa de incentivos para reducir las emisiones y mejorar la eficiencia energética en la flota de vehículos que operan en el transporte público de pasajeros. Esta medida busca alinear los objetivos del sector transporte con la estrategia de buses eléctricos impulsada por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), aunque actualmente presenta algunas limitaciones.

El estado actual establecido en Reuniones del Comité Operativo indica que la medida se mantiene, pero con áreas de mejora identificadas por el estudio (ECOS, 2023). No existen

incentivos específicos ni una exigencia de reporte al MTT por parte de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). Se recomienda, por lo tanto, explicitar metas concretas que permitan una mejor alineación con la estrategia de electromovilidad del MTT. Además, se señala la necesidad de abordar el transporte rural, que actualmente no está cubierto por esta medida. El organismo responsable es el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, y se clasifica como una política pública de carácter permanente. En términos de eficacia, la medida presenta una criticidad alta, con una evaluación cualitativa de "bueno" y un nivel de conformidad considerado "conforme" (ECOS, 2023).

A pesar de estos avances, la medida requiere metas más específicas para incentivar la adopción de flotas Euro VI y eléctricas. Esta política se sustenta en el Decreto 130/2002, que establece la normativa de emisiones para buses, y se complementa con otras estrategias nacionales, como la Estrategia Energética 2050, la Estrategia de Electromovilidad y el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026.

3.2.1.3 Programa de Seguimiento Anual de las emisiones vehiculares del Sistema de Buses Transantiago – Artículo 6

Este programa, generado a los seis meses de la entrada en vigencia del Plan, tiene como objetivo realizar un seguimiento continuo de las emisiones vehiculares del sistema de transporte público de buses en Santiago. Es desarrollado por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) mediante la colaboración de SECTRA y DTPM.

En la segunda reunión del Comité de evaluación, llevado a cabo el 20 de marzo de 2024, se sugirió ajustar la fecha de entrega del reporte anual de emisiones vehiculares (actualmente solicitado en enero) para garantizar un tiempo suficiente para procesar los datos del año anterior. También se propuso cambiar el orden de responsabilidades, asignando a la DTPM como principal encargada con el apoyo de SECTRA.

Este programa es parte de una política pública de carácter permanente, orientada a mejorar el monitoreo y la evaluación de las emisiones contaminantes, y ha mostrado avances en su implementación. A pesar de contar con un Programa de Seguimiento Ambiental, se identificaron vacíos en los reportes de avance, disponibles sólo para los años 2018, 2020 y 2021, lo que dificulta la evaluación integral de las medidas.

Para abordar esta limitación, (ECOS, 2023) sugiere mejorar la disponibilidad y manejo de la información conforme a los lineamientos del Acuerdo de Escazú, facilitando así la verificación transversal de las evaluaciones realizadas y optimizando el proceso de mejora continua de los indicadores.

3.2.1.4 Límites máximos de emisión de la RM para vehículos livianos y medianos – Artículo 9

Se establecen límites máximos de emisiones permitidos para los vehículos livianos y medianos que circulan en la Región Metropolitana de Santiago, los cuales entrarán en vigor 12 meses después de la publicación del decreto correspondiente. En la tercera reunión del comité operativo, realizada el 3 de abril de 2025, se constató que esta medida ha sido cumplida y se mantiene su vigencia.

No obstante, (ECOS, 2023) propone avanzar hacia la adopción de límites finales de emisión basados en las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Aunque se dispone de registros para los años 2020, 2021 y 2022, se ha detectado falta de claridad en la documentación, lo que dificulta la verificación adecuada de la medida.

Debido a esta situación, no fue posible calcular el indicador correspondiente, lo que hace necesario mejorar la calidad y presentación de los registros. Se recomienda que los documentos sean autoexplicativos e incluyan información esencial como siglas y unidades de medida, facilitando así su interpretación y validación.

3.2.1.5 Marco normativo de estándares de Eficiencia Energética para parque vehicular – Artículo 10

En un plazo de 12 meses desde la entrada en vigencia del decreto, el Ministerio de Energía junto con el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) promoverán el establecimiento de un marco normativo para definir los estándares de eficiencia energética aplicables al parque vehicular. Este marco tiene como objetivo mejorar la eficiencia energética de los vehículos que circulan en el país.

Durante la tercera reunión de evaluación, realizada el 3 de abril de 2024, se informó que esta medida ha sido cumplida y se mantiene vigente sin modificaciones adicionales. Las importadoras de vehículos son las principales responsables de cumplir con los requisitos establecidos en esta normativa. No se identificaron nuevas acciones o ajustes en la normativa, ya que se considera que la medida ha alcanzado sus objetivos. Tampoco se dispone de información adicional o cambios significativos desde la implementación de la medida.

3.2.1.6 Incentivos compra vehículos cero y baja emisión – Artículo 11

El Ministerio de Hacienda, en un plazo de 12 meses desde la entrada en vigencia del decreto, se comprometió a establecer una estrategia para generar incentivos que fomenten la compra de vehículos de cero y baja emisión. Esta medida tiene como objetivo promover la transición hacia un parque vehicular más limpio y reducir las emisiones contaminantes asociadas al transporte.

Durante la tercera reunión de evaluación, realizada el 3 de abril de 2024, se informó que la medida ha sido cumplida y se mantiene en vigencia. La implementación de estos incentivos forma

parte de una política pública, aunque de carácter no permanente, y se considera una medida concluida. A pesar de ello, (ECOS, 2023) observa que no se cuenta con un documento específico que detalle la estrategia. En su lugar, se ha utilizado la Reforma Tributaria de 2014 (Impuesto Verde a los vehículos motorizados nuevos), el Green Bond Framework (bonos verdes), el marco de bonos vinculados a la sostenibilidad y la estrategia financiera al cambio climático como medios de verificación. Sin embargo, no se dispone de documentación específica correspondiente al año 2022.

El mismo estudio recomienda mantener disponibles resúmenes o extractos de la documentación justificativa de los criterios y consideraciones utilizadas para el cumplimiento de esta medida. Aunque se reconoce la existencia de una estrategia que aborda temas como impuestos y bonos verdes, así como la estrategia financiera para el cambio climático, estos no responden directamente al indicador planteado.

3.2.1.7 Inscripciones taxis exclusivas para vehículos eléctricos – Artículo 12

Los concursos para nuevas inscripciones de taxis deberán considerar, al menos, un 5% de cupos para vehículos impulsados exclusivamente por electricidad. Esta medida busca incentivar la electrificación del parque vehicular de taxis y contribuir a la reducción de emisiones contaminantes en el sector del transporte público.

Durante la tercera reunión del Comité Operativo, realizada el 3 de abril de 2024, se informó que la medida ha sido parcialmente cumplida y se mantiene en vigencia. A pesar de algunos avances, se recomienda evaluar mecanismos para mejorar la aplicación del artículo y asegurar una mayor participación de vehículos eléctricos en futuras licitaciones.

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones es el encargado de implementar esta política pública, la cual es de carácter permanente. En el estudio (ECOS, 2023) se indica que, si bien existen resoluciones exentas disponibles entre los años 2013 y 2023 que detallan las bases y llamados a concurso, hay años en los que no se cuenta con información (2016, 2018 y 2021), lo que dificulta la verificación completa del avance de la medida en los periodos mencionados. Se sugiere fortalecer las acciones relacionadas con la incorporación de vehículos eléctricos, en especial con el fin de apoyar la Estrategia Climática de Largo Plazo del país, y seguir incentivando la adopción de tecnologías limpias en el sector del transporte público.

3.2.1.8 Emisión continua de humo visible negro – Artículo 14

No se permite la emisión continua de humo visible negro, gris o azul a través del tubo de escape de vehículos motorizados en las vías públicas de la Región Metropolitana (RM). Para los vehículos con motor diésel, la emisión continua de humo no puede superar los 5 segundos. Esta medida busca reducir la contaminación atmosférica causada por los vehículos que emiten gases visibles y nocivos, mejorando la calidad del aire en la región.

Durante la cuarta reunión de evaluación, el 17 de abril de 2024, se reportó que la medida ha sido parcialmente cumplida y se mantiene en vigencia. Se sugiere mantener el artículo, pero explorar alternativas para simplificar la aplicación del estándar de la escala de Ringelmann, y para los motores diésel, considerar una inspección visual más directa como parte de las campañas de fiscalización vehicular.

Carabineros de Chile es el organismo encargado de hacer cumplir esta regulación, que es de carácter permanente. Sin embargo, el cumplimiento de la medida ha enfrentado dificultades debido a la falta de recursos para ejecutar la fiscalización de manera adecuada. No se dispone de información ni de medios de verificación para los años 2018, 2019, 2020 y 2022. En 2021, se realizó un registro de vehículos, pero la evidencia disponible se basa en un correo electrónico, lo que impide visualizar de forma completa el medio de verificación.

Ante esta situación, se recomienda establecer lineamientos, procedimientos o fichas de registro (preferiblemente electrónicas) para que Carabineros de Chile integre esta verificación de humo visible en sus procedimientos de fiscalización habituales. Además, se sugiere explorar la posibilidad de contar con apoyo y recursos adicionales del Ministerio de Transportes para ampliar el alcance de las campañas de fiscalización.

3.2.1.9 Métodos de control de emisiones del número de partículas en la vía pública de vehículos diésel – Artículo 15

Dentro de los 24 meses desde la entrada en vigencia del presente decreto, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) en conjunto con el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) evaluarán la implementación de métodos de control de emisiones del número de partículas en la vía pública para vehículos diésel. Esta medida busca reducir la emisión de partículas contaminantes por parte de vehículos diésel, mejorando así la calidad del aire en zonas urbanas.

Durante la cuarta reunión del Comité Operativo, el 17 de abril de 2024, se informó que la medida ha sido cumplida y se mantiene en marcha. No se requieren cambios en la medida, ya que se ha iniciado el desarrollo de una norma nacional que regula el control de emisiones de partículas en vehículos diésel, lo que fortalece el cumplimiento de la política pública.

El MMA es el organismo encargado de liderar esta política, que, aunque ha sido temporal, concluye con la elaboración de la mencionada norma. Sin embargo, no se cuenta con información adicional ni medios de verificación detallados en los informes de estado de avance. La evaluación de la medida refleja una participación activa en las mesas de trabajo, pero aún no se dispone de documentos que reflejen formalmente los avances en dichas instancias.

Para mejorar la transparencia y seguimiento, (ECOS, 2023) recomienda crear un repositorio o lista de verificación por cada medida, que contenga un registro documental de los avances y cualquier impedimento encontrado. Aunque esta acción puede ser gestionada internamente por

los actores involucrados, se sugiere que el MMA, como ente coordinador de las actividades del PPDA, comparta este repositorio con los demás actores, asegurando así una mayor claridad y coordinación en la implementación de la medida.

3.2.1.10 Revisión normas ingreso de vehículos livianos y medianos – Artículo 16

En un plazo de 12 meses desde la entrada en vigencia del decreto, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) iniciará la revisión de las normas de ingreso de vehículos livianos y medianos, con el objetivo de implementar la norma Euro 6 y su equivalente en la EPA, aplicable desde septiembre de 2020, para los vehículos que ingresen al parque vehicular en la Región Metropolitana. Durante la cuarta reunión, el 17 de abril de 2024, se informó que la medida ha sido cumplida y se mantiene sin necesidad de modificaciones adicionales. Las normas Euro 6 para vehículos livianos y medianos ya están en vigor, cumpliendo así con los estándares internacionales más estrictos en materia de emisiones.

El Ministerio del Medio Ambiente ha liderado la implementación de esta política pública, que, si bien ha sido temporal, ha concluido exitosamente con la entrada en vigor de estas regulaciones. No se cuenta con información adicional o medios de verificación detallados más allá de la norma que ya se encuentra vigente y operativa.

La evaluación (ECOS, 2023) de la medida refleja un nivel bajo de complejidad, ya que el objetivo fue alcanzado de acuerdo con lo previsto, aunque el impacto regular del cambio normativo se ha considerado conforme a los estándares definidos en la Euro 6.

3.2.1.11 Etiqueta con indicación de los niveles de emisiones de gases de escape – Artículo 17

Dentro de un plazo de 12 meses desde la entrada en vigencia del decreto, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) deben establecer las características e información de una etiqueta que indique los niveles de emisiones de gases de escape obtenidos durante el proceso de homologación, de acuerdo con el D.S. N°54 de 1997. Esta etiqueta debe incluir mecanismos para la difusión de la información a los consumidores. Durante la cuarta reunión del Comité Operativo, lleva a cabo el 17 de abril de 2024, se determinó que la medida no ha sido cumplida y se mantiene en proceso. Se sugiere incluir información sobre el estándar de emisión en la documentación de los vehículos o implementar un sistema de colores que indique las emisiones asociadas a cada estándar.

El Ministerio del Medio Ambiente ha liderado esta política pública, que es de carácter no permanente y se considera terminada en términos de desarrollo normativo, aunque no se ha cumplido completamente en su implementación. Actualmente, no se cuenta con información adicional sobre el avance de la medida.

La evaluación (ECOS, 2023) indica que la medida revela un nivel alto de complejidad, dado que, según los comentarios de los actores en los reportes de avance, se dispone de una etiqueta, pero esta no indica adecuadamente los niveles de emisión. Por lo tanto, no se puede evaluar completamente la efectividad de la medida. Se recomienda incorporar la información necesaria para identificar claramente los niveles de emisión y evaluar otros antecedentes relevantes que puedan no haber sido solicitados en la medida o el indicador. Por ejemplo, se sugiere realizar una proyección de las emisiones considerando cortes de tres años y conectar esta información con la comparación de vehículos de menor antigüedad. Además, sería beneficioso incluir el requerimiento de conversión en el permiso de circulación.

3.2.1.12 Filtros de partículas cerrados para maquinaria móvil fuera de ruta de obras de construcción – Artículo 18

A partir del año 2020, el Ministerio de Obras Públicas (MOP), el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y el Ministerio de Salud (MINSAL) deben usar filtros de partículas cerrados para maquinaria móvil fuera de ruta en la ejecución de obras de construcción, específicamente para equipos con potencia superior a 56 kW e inferior a 560 kW.

Durante la séptima reunión del Comité Operativo, realizada el 12 de junio de 2024, se concluyó que la medida no ha sido cumplida y se mantiene en proceso. Se sugiere evaluar la aplicación completa de la normativa, considerando problemas operacionales detectados durante el piloto. Los actores responsables de esta política pública incluyen la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo, el Ministerio de Salud y el Ministerio de Obras Públicas. Esta medida es de carácter no permanente y actualmente no se ha iniciado la implementación total. La documentación necesaria para su evaluación incluye certificados de instalación de filtros de partículas y de garantía de las maquinarias.

En el estudio (ECOS, 2023) se recomienda establecer un repositorio para cada medida, donde se incluya un listado de la documentación asociada. Esto facilitaría el seguimiento del estado de avance y los impedimentos que se hayan presentado. Esta sugerencia puede ser de carácter interno del actor generador de contenido, pero se recomienda compartirla con el actor que encabeza las actividades del Plan de Prevención de la Contaminación del Aire (PPDA) del MMA.

3.2.1.13 Restricción Vehicular en episodios críticos - Artículo 120

La medida establece una restricción vehicular de carácter permanente durante el período de Gestión de Episodios Críticos por MP10 y MP2,5, comprendido entre el 1 de mayo y el 31 de agosto de cada año.

En la quinta reunión del Comité Operativo el 2 de mayo de 2024, y en la sexta reunión, el 15 de marzo de 2024, se concluyó que la medida ha sido cumplida y se mantiene en vigor. Se sugiere mantener la medida y mejorar la fiscalización. Además, se debe evaluar cómo incorporar factores

de deterioro para vehículos antiguos y garantizar que la medida siga promoviendo la renovación del parque vehicular.

Los responsables de la implementación de esta política pública son la Secretaría Regional Ministerial de Transportes. Esta medida es de carácter permanente y se espera que continúe vigente, como indica el informe de estado de avance del PPDA. El medio de verificación incluye citaciones por infracción a la restricción vehicular, que ascienden a un total de 128.492 casos. La evaluación (ECOS, 2023) indica que la medida es considerada de alta complejidad y se clasifica como buena, con un estado conforme y sin observaciones registradas.

3.2.2 Medidas que se eliminan

3.2.2.1 Prohibición de operación del motor de vehículos detenidos por más de 5 minutos – Artículo 13

A partir de la entrada en vigencia del presente Decreto, se prohíbe la operación del motor de un vehículo comercial, incluyendo transporte de carga y pasajeros, así como furgones escolares, cuando este se encuentre detenido por un período mayor a 5 minutos.

En el estudio (ECOS, 2023) se señala que, aunque se entiende que el objetivo de esta medida es disminuir las emisiones generadas por la combustión de motores en situaciones de detención prolongada, se recomienda evaluar alternativas, como el uso de recursos tecnológicos (monitoreo mediante cámaras) y la identificación de lugares donde se produce con mayor frecuencia. Además, se sugiere también implementar un plan comunicacional para difundir la medida.

Posteriormente, en la cuarta reunión de seguimiento el 17 de abril de 2024, se concluyó que la medida no ha sido cumplida y se propone su eliminación debido a las dificultades para su implementación y fiscalización. La falta de capacidad en recursos para verificar la ocurrencia de la no conformidad fue uno de los motivos identificados.

3.2.2.2 Límites máximos de emisiones gaseosas y particuladas para maquinaria móvil fuera de ruta nueva – Artículo 19

La maquinaria móvil fuera de ruta nueva deberá cumplir con límites máximos de emisión de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), hidrocarburos no metánicos (HCNM), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (MP).

En el estudio (ECOS, 2023) se recomienda reevaluar el indicador propuesto, que actualmente se vincula al número de fiscalizaciones, para establecer una relación más clara entre estas actividades y la reducción de emisiones de este tipo de fuentes. Se sugiere considerar alertas desde las revisiones técnicas cuando se detecten problemas en la composición de los gases emitidos por estos vehículos.

En la séptima reunión, el 12 de junio de 2024, se determinó que la medida ha sido cumplida y se sugiere su eliminación, ya que los límites de emisión para maquinaria nueva están abordados por la normativa nacional vigente. La Superintendencia del Medio Ambiente es la entidad responsable de esta normativa.

3.2.3 Medidas en Revisión

3.2.3.1 Programa de Implementación de una Zona de Baja Emisión en la RM – Artículo 8

El MTT, en conjunto con el MMA, establecerá, a los 12 meses de la entrada en vigencia del decreto, un programa de implementación de una zona de baja emisión en la Región Metropolitana de Santiago, que aplicará restricción al ingreso de vehículos pesados con más de 12 años de antigüedad. La zona será las vías al interior del anillo de Américo Vespucio.

En la reunión 3, realizada el 3 de abril de 2024, se indicó que no hay información disponible sobre esta medida, que actualmente se encuentra en revisión. Se ha incluido en las fiscalizaciones actuales bajo el Decreto 18 del MTT, pero se requiere una evaluación más detallada con bases de datos para medir el cumplimiento de la norma.

El estudio (ECOS, 2023) establece que esta medida también tiene un nivel de criticidad alta y se ha reportado una evaluación cualitativa buena, aunque parcialmente conforme en la evaluación cuantitativa. Se menciona un informe llamado "Anteproyecto 2022", que incluye presupuesto para el Modelo de Fiscalización Automatizada para la zona de baja emisión, pero se desconoce el estado de la implementación. Se sugiere proporcionar información pública sobre el estado de avance e implementación de la medida, considerando que plantea hitos de cumplimiento que deberían formar parte de un reporte de avance.

3.2.4 Medidas No Abordadas en Reuniones

3.2.4.1 Plan de Desarrollo Intermodal para la RM – Artículo 106

El Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT) tiene un plazo de 12 meses desde la vigencia del decreto para proponer este plan. Actualmente, esta medida, que se clasifica como política pública, se encuentra terminada.

La evaluación (ECOS, 2023) del plan muestra una criticidad alta, con una evaluación cualitativa calificada como regular y un nivel de conformidad considerado conforme. No se han identificado brechas ni oportunidades de mejora en su implementación.

3.2.4.2 Pistas Solo Bus – Artículo 107

El Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT) se encarga de la coordinación y gestión de la construcción de 60 km de carriles exclusivos para buses en el área de cobertura de Transantiago. En este momento, esta medida, catalogada como política pública, ha sido completada.

La evaluación (ECOS, 2023) del plan indica una criticidad alta, con una calificación cualitativa considerada regular y un nivel de conformidad que se considera adecuado. No se han detectado brechas ni oportunidades de mejora en su implementación.

3.2.4.3 Zona Verde para el Transporte en Santiago (ZVTS) – Artículo 108

El Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT) brindan apoyo a la Ilustre Municipalidad de Santiago para la implementación de la Zona Verde para el Transporte en Santiago (ZVTS). Esta iniciativa se utiliza como una acción de mitigación nacionalmente apropiada (NAMA). Catalogada como política pública no permanente, la medida ya ha comenzado y se ha reportado mediante una minuta que detalla el respaldo técnico del MTT, a través de SECTRA, al Plan Integral de Movilidad de la comuna de Santiago, para los proyectos priorizados por la Ilustre Municipalidad de Santiago. La evaluación muestra una criticidad alta y una calificación cualitativa regular, con un estado considerado no conforme. Las brechas identificadas indican que, según el comentario del actor principal en el informe de avance, no ha habido progresos en la medida.

Como oportunidad de mejora, (ECOS, 2023) sugiere iniciar un plan para la ejecución de la medida que incluya al menos un cronograma, la necesidad de reuniones entre las partes involucradas, los temas a tratar en cada encuentro y las fechas previstas para llevar a cabo la medida. Además, se recomienda mantener un repositorio documental para registrar las actividades generadas, ya sea a través de actas de reunión, comunicaciones, oficios u otros documentos, identificando también los posibles obstáculos o justificaciones para el retraso en la ejecución de estas actividades o de la medida en general.

3.2.4.4 Fiscalización cumplimiento DS N°18/2002 – Artículo 120

Fiscalización de la Prohibición de Circulación de Vehículos de Carga por Antigüedad en el Interior del Anillo Américo Vespucio.

Se lleva a cabo la fiscalización de la prohibición de circulación de vehículos de carga según su antigüedad en el área interna del anillo Américo Vespucio. Aunque esta medida no se ha discutido en las reuniones, se presenta con una alta criticidad en la evaluación (ECOS, 2023). La evaluación realizada muestra resultados positivos, con un nivel de conformidad considerado como conforme. Además, no se han identificado observaciones ni oportunidades de mejora en este proceso.

3.2.4.5 Plan de Gestión de Tránsito en episodios críticos - Artículo 120

La Secretaría Regional Ministerial de Transportes y Telecomunicaciones es responsable de la implementación del Plan de Gestión de Tránsito en episodios críticos. Esta medida se clasifica como política pública y es permanente. Se ha reportado la actividad mediante el "Informe Plan Operacional GEC 2023", con un total de una actividad registrada. La medida presenta una alta criticidad, con una evaluación cualitativa calificada como buena. Actualmente, el estado de la medida es conforme, y no se han registrado observaciones ni oportunidades de mejora.

3.3 Levantamiento de información y revisión de normativas asociadas al sector transporte que tengan injerencia en las emisiones atmosféricas de la RM

Se sistematizó información relevante de las normativas asociadas al sector transporte que tengan injerencia en las emisiones de la RM. Esto se encuentra disponible en el anexo digital "TRANSRM2-RevisionNormativas3.3.xlsx". A continuación, se presenta un resumen de cada una.

3.3.1 D.S N° 211/1991 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

El Decreto Supremo N° 211 de 1991, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, establece las primeras normas para regular las emisiones de los vehículos motorizados livianos que circulan en la Región Metropolitana. Esta normativa busca limitar los contaminantes emitidos por automóviles particulares con el fin de reducir la contaminación del aire en esta zona. Fue promulgada el 18 de octubre de 1991 y publicada en el Diario Oficial el 11 de diciembre del mismo año.

3.3.2 D.S N° 41/2019 del Ministerio del Medio Ambiente

El Decreto Supremo N° 41 de 2019, emitido por el Ministerio del Medio Ambiente, modifica el decreto anterior para actualizar los estándares de emisión aplicables a vehículos livianos. La actualización tiene un alcance nacional y responde a la necesidad de modernizar las normas para ajustarlas a nuevas exigencias ambientales. Fue promulgado el 27 de noviembre de 2019 y su publicación se realizó el 30 de septiembre de 2020.

3.3.3 D.S N° 54/1994 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

El Decreto Supremo N° 54 de 1994, también del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, establece las normas específicas para las emisiones de vehículos motorizados medianos en la Región Metropolitana. Este decreto busca controlar los niveles de contaminación generados por vehículos de tamaño intermedio, asegurando que cumplan con estándares ambientales adecuados. Se promulgó el 8 de marzo de 1994 y fue publicado el 3 de mayo de ese año.

3.3.4 D.S N°39/2020 del Ministerio del Medio Ambiente

El Decreto Supremo N° 39 de 2020, del Ministerio del Medio Ambiente, introduce una regulación específica para las emisiones de maquinarias móviles que circulan fuera de ruta en Chile. La norma abarca aquellas maquinarias con motores de combustión interna que funcionan por compresión y cuyas potencias netas instaladas van desde los 19 kW hasta los 560 kW. Publicado el 21 de octubre de 2021, exige que las maquinarias importadas desde octubre de 2023 cumplan con estándares de emisión equivalentes a Stage IV o V, mientras que para los tractores esta obligación comenzará el 1 de enero de 2030.

3.3.5 D.S N° 104/2000 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

El Decreto Supremo N° 104 de 2000, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, establece una normativa específica para motocicletas. En él se regulan las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos totales (HCT) emitidos por estos vehículos. La norma fue promulgada para la Región Metropolitana y entró en vigencia el 1 de septiembre de 2001.

3.3.6 D.S N°32/2017 del Ministerio del Medio Ambiente

El Decreto Supremo N° 32 de 2017, del Ministerio del Medio Ambiente, modifica el Decreto N° 104 de 2000 para actualizar los límites de emisión aplicables a motocicletas. La nueva normativa se aplica a todas las motocicletas que soliciten su primera inscripción en el Registro de Vehículos Motorizados del Registro Civil, y comenzó a regir doce meses después de su publicación, es decir, el 12 de marzo de 2018.

3.3.7 D.S N°55/1994 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

El Decreto Supremo N° 55 de 1994, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, regula las emisiones de los vehículos motorizados pesados en la Región Metropolitana. Esta norma se enfoca en vehículos cuyo peso bruto vehicular es igual o superior a 3.860 kg y tiene como objetivo reducir el impacto ambiental de su circulación. La normativa entró en vigencia el 16 de abril de 1994.

3.3.8 D.S N°50/2023 del Ministerio del Medio Ambiente

El Decreto Supremo N° 50 de 2023, del Ministerio del Medio Ambiente, establece nuevos límites de emisiones para vehículos pesados, modificando el Decreto N° 55 de 1994. La normativa comenzará a regir dieciocho meses después de su publicación en el Diario Oficial, con el objetivo de garantizar una transición hacia estándares más estrictos para este tipo de vehículos.

3.3.9 D.S N° 4/1994 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

El Decreto Supremo N°4 de 1994 establece los estándares para regular las emisiones contaminantes generadas por los vehículos motorizados en Chile, con el objetivo de minimizar su impacto ambiental. Esta normativa define los procedimientos que deben seguirse para el control de dichas emisiones, asegurando que los vehículos cumplan con los límites permitidos. Fue promulgado el 7 de enero de 1994 y publicado en el Diario Oficial el 29 de enero del mismo

año. A lo largo del tiempo, este decreto ha sido actualizado para adaptarse a las nuevas exigencias ambientales y tecnológicas. La última modificación significativa está contenida en el Decreto Supremo N°66 de 2018, emitido por el Ministerio del Medio Ambiente, que ajusta y refuerza las normativas para seguir garantizando un control efectivo de las emisiones vehiculares.

3.3.10 D.S N° 130/2001 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

Decreto Supremo N° 130 de 2001, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, establece las normas de emisión para los buses de locomoción colectiva en Santiago. La regulación fija límites para contaminantes como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales e hidrocarburos no metánicos, así como para gases como metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (MP). Esta normativa entró en vigencia el 1 de septiembre de 2002 y reemplazó los límites de emisión previamente establecidos en el Decreto N° 82 de 1993.

4. Diagnóstico cuantitativo de las medidas actuales del capítulo de Fuentes Móviles del PPDA RMS, y proyección del inventario de emisiones del sector transporte, tanto en ruta como fuera de ruta

4.1 Revisión de la estimación de potenciales de reducción en estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)”

De forma complementaria a lo realizado en la Sección 3.1, se realizó una revisión del estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)” (Geasur, 2015), enfocada en cómo se determinaron los potenciales de reducción y la modelación de emisiones del portafolio de medidas propuestas en dicho estudio.

4.1.1 Modelación de emisiones

Para todas las medidas se utiliza el siguiente modelo simplificado:

Ecuación 1 Cálculo de emisiones

$$E_{i,j,k} = \sum_{i,j,k} (NA_i \cdot CT_{i,j,k} \cdot FE(v)_{i,j,k} \cdot FA_{i,j,k})$$

Donde:

- E: Emisiones según tipo de vehículo i (i = vehículos particulares, vehículos comerciales de uso de empresas, camiones livianos, etc.), de combustible j (j = Diesel, gasolina, híbrido, etc.) y nivel de emisiones k (k = Euro I, Euro II, etc.).
- NA: Nivel de actividad total, según vehículo i.
- CT: Composición tecnológica según el tipo de vehículo i, combustible j y emisiones k.
- FE(v): Factor de emisión de escape del motor, en función de la velocidad media v, para el tipo de vehículo i, de combustible j y de emisiones k.
- FA: Factor de ajuste por año de fabricación según vehículo i, de combustible j y de emisiones k.

La propuesta central del estudio consiste en crear un modelo propio en una planilla Excel, que permite modificar los datos de entrada mediante la parametrización de las medidas y sus valores, basándose en criterios técnicos relacionados con emisiones y transporte. Esto permite realizar un análisis de sensibilidad sobre las medidas y evaluar su impacto en las variables técnicas del modelo de emisiones y su proyección, como la composición tecnológica, los factores de emisión y el nivel de actividad.

4.1.2 Fuentes de información

A continuación, se detallan las fuentes de información utilizadas en el estudio para cada parámetro considerado:

- NA: obtenidas en las simulaciones MODEM para cada año del periodo de evaluación, distribuido según CT en las categorías vehiculares CCF8 de MODEM. (NA x tecnología x MODEM).
- (v): velocidad media por tecnología, obtenida por MODEM.
- NA y (v): Estos parámetros fueron obtenidos de simulaciones del modelo MODEM, con corrida de Transporte 2012. Para el año base 2015 se han considerado idénticos valores 2012, dado que la variación del número de viajes 2001-2012, según Encuesta Origen-Destino, ha sido sólo del -4,2% en 11 años.
- FE: Se utilizan en la simulación los Factores de Emisión en la versión [COPERT IV 2013], que es la versión más reciente de COPERT IV.
- FA: Factores de emisión corregidos considerando mediciones RSD realizadas por Programa Nacional de Fiscalización del Ministerio de Transportes (emisiones reales de los vehículos en ruta y según norma y año de fabricación).
- CT: Participación de CCF6 y CCF8 promedio, estimada por observaciones mediante RSD realizadas por Programa Nacional de Fiscalización del Ministerio de Transportes (Código de Clasificación de Fuentes para Calderas y Turbinas).

4.1.3 Construcción de escenarios

- Línea base considera proyección de flota sin medidas en periodo 2015-2025. Se proyectan los Niveles de Actividad, las Velocidades Medias, la Flota y la Composición Tecnológica, que constituyen la base del cálculo de emisiones.
- Escenarios con proyecto se construyen con el efecto de las medidas en los Niveles de Actividad, las Velocidades Medias, la Flota, la Composición Tecnológica y los Factores de Emisión, para el periodo 2015-2025 evaluado.
- En ambos casos los Niveles de Actividad y las Velocidades Medias se obtienen a partir de la simulación MODEM de los escenarios de transporte con o sin proyecto.

4.1.3.1 Zona Baja Emisión

- Como escenario base, se consideró que los nuevos camiones que ingresen al parque cumplen la exigencia mínima actual (Euro V).
- A partir del año 2018, deberán dar cumplimiento los camiones con una antigüedad máxima de 12 años o 18 años si cuenta con Filtro de Partículas y cuentan con estándar mínimo Euro III.

Se utiliza la matriz origen-destino de SECTRA para identificar viajes dentro y fuera de la ZBE. Para la afectación dentro de la ZBE, toda la actividad en términos de kilómetros-vehículo/año debe

cumplir con la normativa, ajustándose la composición tecnológica en relación al escenario sin medidas.

Fuera de la ZBE, se considerará que el nivel de actividad (en km-veh/año) de cada tramo fuera se distribuye entre afectado y no afectado por la medida, en la misma proporción que el número de viajes entre las zonas externas a la ZBE y aquellos viajes entre zonas externas e internas, así como entre zonas internas y externas a la ZBE. En el estudio se indica que el 57% de los viajes fuera de la ZBE se ven afectados por la medida, por lo que deben cumplir con los estándares establecidos.

4.1.3.2 Aplicación Euro VI/EPA 2010 para Transantiago

Se aplica estándar Euro VI a los buses nuevos que ingresen al sistema de transporte público a partir de 2017.

- Como Escenario base, se considera que los buses que se renuevan de la flota de Transantiago deberán cumplir como mínimo con un nivel de emisiones de Euro 5.
- Para el escenario 1 con proyecto, se considera que los buses que se renuevan de flota de la Transantiago deberán cumplir como mínimo con un nivel de emisiones de Euro 6, a partir del año 2017.

En ningún escenario se considera la construcción de corredores (sin Plan Maestro de Transporte de Santiago, PMTS).

4.1.3.3 Tecnología de cero y baja emisión para Transantiago

El parámetro afectado por la presente medida es la composición tecnológica de troncales y alimentadores para el total de flotas de buses Transantiago, considerando los valores de Nivel de Actividad y velocidades medias obtenidas con MODEM, con o sin PMTS, según el escenario proyectado.

- Como Escenario base, se considera que los buses que se renuevan de la flota de Transantiago deberán cumplir como mínimo con un nivel de emisiones de Euro 5, a partir del año 2018. En este escenario no se considera la construcción de corredores (sin Plan Maestro de Transporte de Santiago, PMTS).
- El escenario 1 de simulación considera que los buses que se renuevan de la flota de Transantiago deberán cumplir como mínimo con un nivel de emisiones de Euro 6, a partir del año 2018 y además se incorpora un 5% de buses híbridos, para cumplir esto en el año 2018 un 25% de los buses que ingresan a la flota deberán ser híbridos. Además, este escenario no considera la construcción de corredores (sin Plan Maestro de Transporte de Santiago, PMTS)
- En el escenario 2 se considera nivel de actividad y velocidades medias por año, calculadas por MODEM, considerando la construcción de corredores (Con Plan Maestro de Transporte de Santiago, PMTS), el programa de renovación 2017-2023 previsto por Transantiago, donde los buses renovados cumplirán con norma de emisiones Euro 6.

4.1.3.4 Restricción Vehicular

La restricción vehicular se implementa entre el 1 de mayo y el 31 de agosto de cada año para vehículos con más de 7 años de uso, incluyendo aquellos con sello verde. Se modelaron las emisiones de vehículos diésel y gasolina, abarcando vehículos livianos, medianos y motocicletas.

- El escenario base asume que los vehículos renovados deben cumplir con los niveles de emisión actuales, es decir, Euro 5 para livianos y medianos, y Euro 3 para motocicletas. Las tasas de renovación vehicular proyectadas y las ventas se ajustan para un crecimiento neto promedio del 4,8% en vehículos comerciales, 4,3% en motocicletas y 5,4% en vehículos particulares.
- Para el escenario 1, a partir de 2016, se amplía la restricción a los vehículos con más de 7 años, incluyéndose los de sello verde. Los vehículos renovados deberán cumplir con los niveles de emisión Euro 5 para livianos y medianos, y Euro 3 para motocicletas. Las tasas de renovación aumentan, logrando una flota con un promedio de antigüedad 2 años menor que en el escenario base para 2025. También se incorporan los estándares finales de la EPA respecto al ASM, lo que resulta en una reducción de emisiones por reparación del convertidor catalítico (70% para HC y CO, 30% para NOx).

En ambos escenarios, el nivel de actividad afectado es del 6,7% del total anual, con una proporción similar derivada al transporte público y otras alternativas. Las velocidades medias y niveles de actividad anuales se calculan utilizando MODEM, sin considerar la construcción de corredores asociados al Plan Maestro de Transporte de Santiago (PMTS).

4.1.3.5 Límites ASM

- Como Escenario base, se considera que los vehículos que se renuevan del parque deberán cumplir como mínimo con un nivel de emisiones actual, es decir, Euro 5 para livianos y medianos, y de Euro 3 para motocicletas. La proyección 2025 no considera la implementación del Plan Maestro de Transporte de Santiago (PMTS).

- Escenario proyecto, a partir del 2016, entran en vigencia los límites finales EPA, lo que provoca que los vehículos que son rechazados con el nuevo estándar reparen su convertidor catalítico. Esto afecta directamente al factor de emisión del NOx, HC y CO, reduciendo sus emisiones en un 30% para NOX y 70% para HC y CO.

Para la modelación de emisiones se utiliza el modelo de la medida de Restricción vehicular (ver Sección 4.1.3.4), al cual se le incorporó el efecto de introducir el límite final EPA. Evaluar el efecto de la medida implica estimar las tasas de rechazo de los vehículos con el estándar actual y con nueva exigencia, para así estimar la tasa de rechazados adicionales. Para ello, se utilizaron las tasas de rechazo por tipo de vehículo de los datos de las PRT de 2014. Esta tasa indica el porcentaje de vehículos que no cumplen con el estándar propuesto.

4.1.3.6 Límites RSD para Vehículos livianos y medianos

- Como Escenario base, se considera que los vehículos que se renuevan del parque deberán cumplir como mínimo con un nivel de emisiones actual, es decir, Euro 5 para livianos y medianos, y de Euro 3 para motocicletas. La proyección 2025 no considera la implementación del PMTS.
- Escenario proyecto, a partir del 2016, entran en vigencia los límites finales lo que provoca que los vehículos que son rechazados con el nuevo estándar reparen su convertidor catalítico, lo cual afecta directamente al factor de emisión del NOx, HC y CO, reduciendo sus emisiones en un 30% para NOX y 70% para HC y CO.

Se considera nivel de actividad y velocidades medias por año, calculas por MODEM, sin considerar la construcción de corredores (Sin Plan Maestro de Transporte de Santiago, PMTS).

4.1.3.7 Programa de reducción de emisiones para Maquinaria Construcción

Para la expresión del cálculo de las emisiones provenientes de la maquinaria fuera de ruta, en esta metodología se utiliza una expresión específica para el factor de emisión.

- Línea base con norma: para el año 2017 todas las máquinas deben cumplir como mínimo con el estándar Stage IIIA y que para el 2020 deberán cumplir con la norma Stage IIIB. Esta se considera para la modelación (supuesto que ya existe norma de entrada para las maquinarias fuera de ruta).
- Para el escenario 1, las maquinarias del sector construcción pertenecientes a proyectos públicos con potencias superiores o iguales a 56[kW], son reacondicionadas con filtros de partículas 2017 (un 50% del total), y al 2020 son todas reacondicionadas.
 - Crecimiento de la flota mediante regresión lineal de datos históricos de bases de datos de Aduanas.

Para ambos escenarios, el crecimiento de la flota se realiza mediante regresión lineal de datos históricos de bases de datos de Aduanas. La maquinaria hasta el 2016 llega con 4 años de retraso tecnológico a Chile de los países provenientes de EEUU, Europa y Japón.

Al escenario del proyecto, la maquinaria reacondicionada tiene **una eficiencia en material particulado del 90%**.

4.1.3.8 Implementación de Corredores para Transporte Público

- Como línea base, se considera el escenario 1 de la medida 3 (Cero y baja emisión), considerando además las emisiones base producidas por los vehículos livianos, medianos y motos. Esto considera que los buses que se renuevan de la flota de Transantiago deberán cumplir como mínimo con un nivel de emisiones de Euro 5, a partir del año 2018. En este escenario no se considera la construcción de corredores (sin Plan Maestro de Transporte de Santiago, PMTS).
 - Se considera nivel de actividad y velocidades medias por año, calculas por MODEM sin considerar la construcción de corredores (Sin Plan Maestro de Transporte de Santiago, PMTS).
- Para el escenario con proyecto, se consideran las emisiones producidas por el escenario 2 de la medida 3, la cual incluye la incorporación del Plan maestro de Transporte de Santiago (PMTS) en el cálculo. Además, se considera una reducción del 1% del nivel de actividad en los vehículos livianos, medianos y motos, por efecto de los corredores.
 - El escenario considera el programa de renovación 2017-2023 previsto por Transantiago, los buses renovados cumplirán con norma de emisiones Euro 6. Este escenario es complementario con Buses estándar Euro VI, incorporando un 5% de Buses Híbridos con motor Diésel Euro 6 en la modelación.
 - Se considera nivel de actividad y velocidades medias por año, calculas por MODEM, considerando la construcción de corredores (Con Plan Maestro de Transporte de Santiago, PMTS).

Se modela un escenario considerando cambio modal hacia el transporte público de **1%, con la correspondiente reducción del NA para los modos privados.**

El escenario con proyecto corresponde a una variación proporcional en el nivel de actividad del transporte privado según los niveles de actividad ESTRAUS-MODEM 2012-2025 disponibles.

La implementación de esta medida impactará el sistema de transporte, afectando tanto el nivel de actividad del transporte privado, que se verá reflejado en el flujo vehicular y en la partición modal, como la velocidad media de desplazamiento, lo que alterará el factor de emisión.

4.2 Recopilación y análisis de información cuantitativa referente al cumplimiento de las medidas de los artículos 8, 9 y 120 del PPDA RMS

Se realizó una recopilación y análisis de información cuantitativa referente al cumplimiento de las medidas de los artículos 8, 9 y 120, del PPDA RMS, tal como se detalla en la Tabla 4-1. En las siguientes subsecciones se presenta en detalle el análisis realizado para cada artículo.

Tabla 4-1 Revisión de medidas de artículos 8, 9 y 120 del PPDA RMS

Artículo	Medida	Acción llevada a cabo
8	Programa de implementación de Zona de baja emisión en la RM (Interior de anillo Américo Vespucio, vehículos de carga con antigüedad mayor a 12 años)	Recopilar información del Programa de Fiscalización y diagnosticar la medida desde la perspectiva del cumplimiento de este (número de controles, infracciones, etc.). Analizar el efecto de la medida por el recambio tecnológico y el desplazamiento de viajes. Además, establecer nuevos escenarios en base a la antigüedad permitida y perímetros de acción de la Zona de baja emisión.
9	Límites de emisión para vehículos livianos y medianos	Revisión de resultados de Plantas de Revisión Técnica (PRT). Analizar tasas de rechazo históricas , además del efecto en las emisiones producto de las reparaciones realizadas en los vehículos que fueron rechazados en su momento. Además, establecer distintos escenarios respecto a disminución del límite de emisión.
120	Restricción vehicular permanente en periodo de Gestión de Episodios Críticos (GEC).	Diagnosticar medida en base a información disponible del parque vehicular y su renovación real en el tiempo . Recopilar información a nivel nacional y evaluar renovación tecnológica comparando la RMS con regiones que no tienen restricción vehicular . Establecer nuevos escenarios normativos respecto número de vehículos afectados a la restricción en el tiempo, ya sea por antigüedad, estándar de emisión, espacialidad, etc. Además, analizar el caso de la Zona de Baja Emisión de Londres, como mecanismo de tarificación vial a vehículos de altas emisiones, por estándar y/o año, en reemplazo o complemento a la restricción vehicular. Evaluar el impacto de la medida con base en factores de emisión de la flota incluyendo los antecedentes disponibles del deterioro local de las emisiones del parque.

Fuente: Elaboración propia a partir de Bases Técnicas de los Términos de Referencia.

4.2.1 Artículo 8 – Programa de implementación de Zona de baja emisión en la RM

El Artículo 8 establece la implementación de una zona de baja emisión en la Región Metropolitana por medio de la restricción de vehículos pesados con antigüedad superior a 12 años en las vías ubicadas al interior del anillo Américo Vespucio, con excepción de las autopistas y las vías de paso. Además, establece el deber del MTT para diseñar un modelo de fiscalización automatizada para la zona de baja emisión. Según el D.S. N°55/1994 del MTT, se define como

vehículo motorizado pesado aquél con peso bruto igual o superior a 3.860 kg destinado al transporte de personas o carga.

En primer lugar, se recopiló información respecto a las fiscalizaciones realizadas en el marco del Programa de Fiscalización, en los años 2022 y 2023 (Tabla 4-2). Sin embargo, al analizar dicha información se relevó que la metodología de la fiscalización consiste en controlar únicamente a los vehículos sospechosos de incumplir la norma³, por lo que la cantidad de fiscalizaciones registrada es equivalente al número de infracciones. De esta forma, al no contar con información de controles realizados que terminen en cumplimiento, no es posible diagnosticar la medida desde la perspectiva de tasas de incumplimiento sino solamente se pueden identificar la cantidad de infracciones por año y las comunas en las cuales fueron identificadas.

Tabla 4-2 Fiscalizaciones realizadas en el marco del Programa de Fiscalización, año 2022 y 2023

Año	Comuna	Detección en Terreno	Comuna	Detección por Cámara
2022	Ñuñoa	45	Santiago	39.009
	Providencia	40	Estación Central	12.829
	Santiago	39	Ñuñoa	11.854
	Recoleta	25	Macul	17.814
2023	Conchalí	66	Santiago	54.751
	Ñuñoa	35	Providencia	39.987
	Independencia	31	Ñuñoa	18.203
	Providencia	31	Recoleta	16.757

Fuente: Elaboración propia en base a información Programa de Fiscalización.

Tal y como muestra la tabla, la detección por cámara es muy superior en número que la detección en terreno. En el año 2022, Santiago es la comuna con mayores infracciones, seguida de Macul. Para el 2023, Santiago mantiene el liderazgo en cantidad de infracciones, con un incremento de 40% respecto al año anterior. Providencia le sigue con cerca de 40 mil infracciones y Ñuñoa aparece en tercer lugar aumentando en un 54% respecto al 2022. Se destaca que el total de infracciones en el año 2022 es aproximadamente 81 mil, mientras que en el año 2023 se reporta un 60% más. Esto pudiera deberse a la existencia de mayor infraestructura para fiscalización de un año a otro o a una modificación en el sistema de fiscalización, por tanto, no se debe asociar directamente a un mayor incumplimiento de dicha norma.

A continuación, se presenta la evolución del parque vehicular de camiones que están afectos a dicha normativa. El siguiente análisis se realizó en base a la información de los permisos de circulación, obtenidos a través del INE para los años 2018 a 2022. Dado que la normativa afecta a los vehículos de carga con una antigüedad superior a 12 años, es este universo el que se muestra a continuación. Se consideraron las siguientes categorías vehiculares INE para el grupo

³ De acuerdo a lo informado por personal de SECTRA, estos vehículos son detectados por ingreso fuera de horario permitido, vehículos que exceden peso (más de dos ejes) y lecturas de placa patente para revisar la antigüedad.

de vehículos pesados: “Camión”, “Camión especializado”, “Tractocamión” y “Maquinaria automotriz especializada, camión especializado” (solo se encuentra en año 2018).

La Figura 4-1 muestra una tendencia decreciente de la cantidad de vehículos pesados de más de 12 años que no se encuentran certificados. Similar es el comportamiento para aquellos que son Euro I. Los camiones Euro III van en aumento, mientras que la norma Euro II presentaba un comportamiento ascendente hasta el 2020, a partir del cual comienza a disminuir.

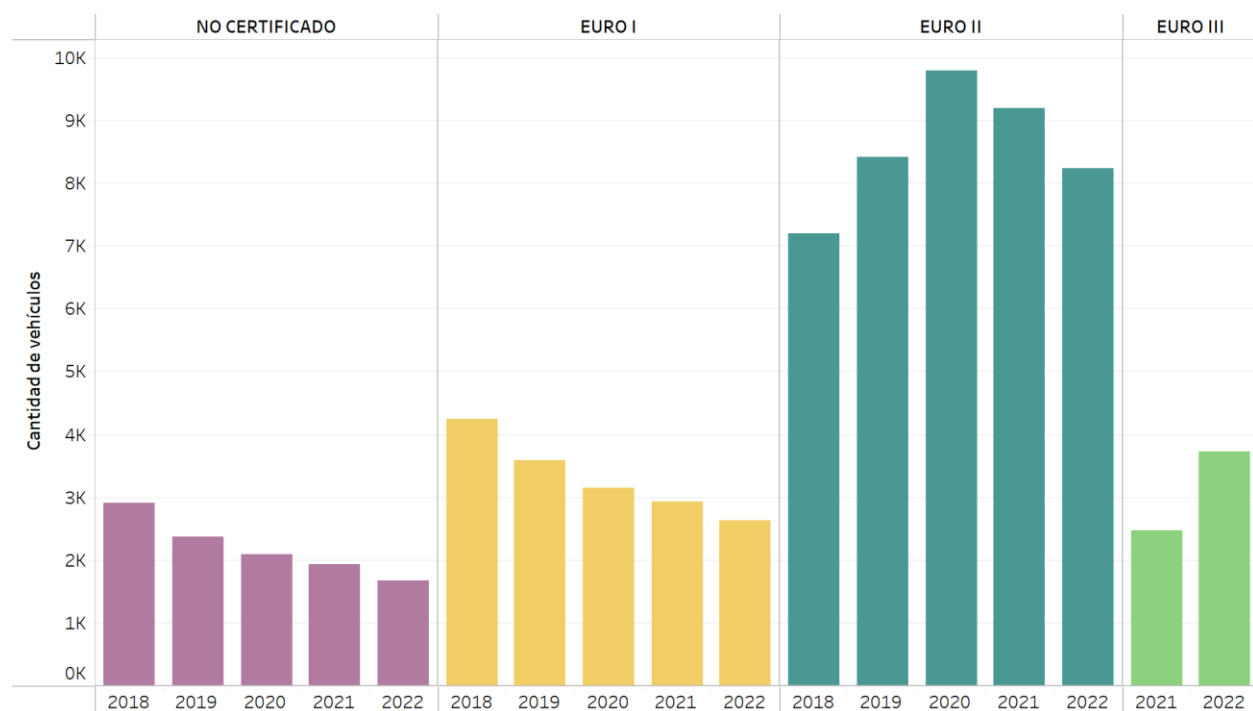


Figura 4-1 Cantidad de vehículos pesados > 12 años, 2018-2022.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del INE.

La siguiente figura muestra la composición del mismo parque de camiones, con una antigüedad superior a 12 años, y su evolución desde los años 2018 a 2022. Se puede identificar claramente un aumento de la presencia de vehículos Euro III, en desmedro de normativas menos exigentes en términos de emisiones. Este resultado es coincidente con lo explicado en el párrafo previo.

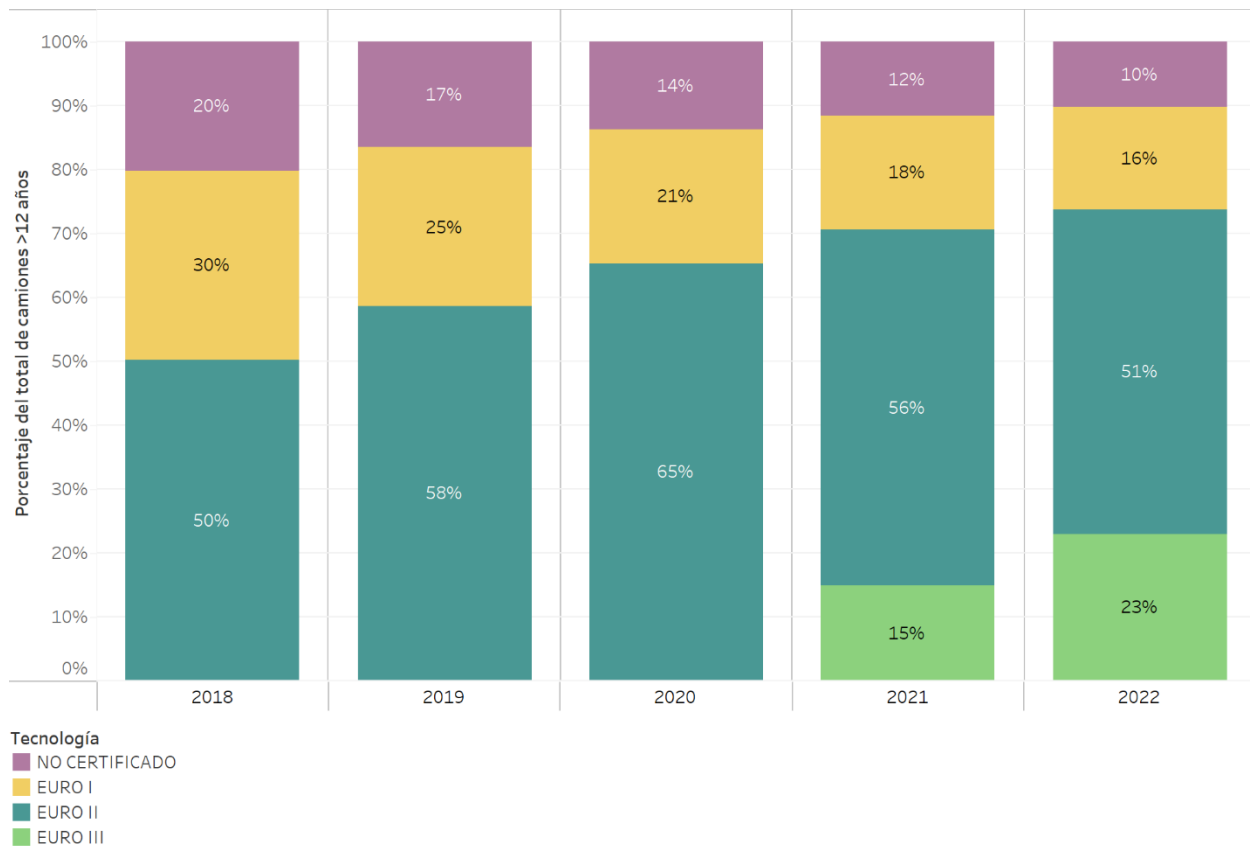


Figura 4-2 Porcentaje de tecnología por año en vehículos pesados > 12 años, 2018-2022.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del INE.

El análisis del efecto de esta medida se realizó de acuerdo con el impacto en la renovación del parque de camiones, dado que era éste el resultado esperado (Geasur 2015).

La siguiente figura muestra la evolución de los camiones nuevos y las ventas, tanto a nivel nacional como en la Región Metropolitana:

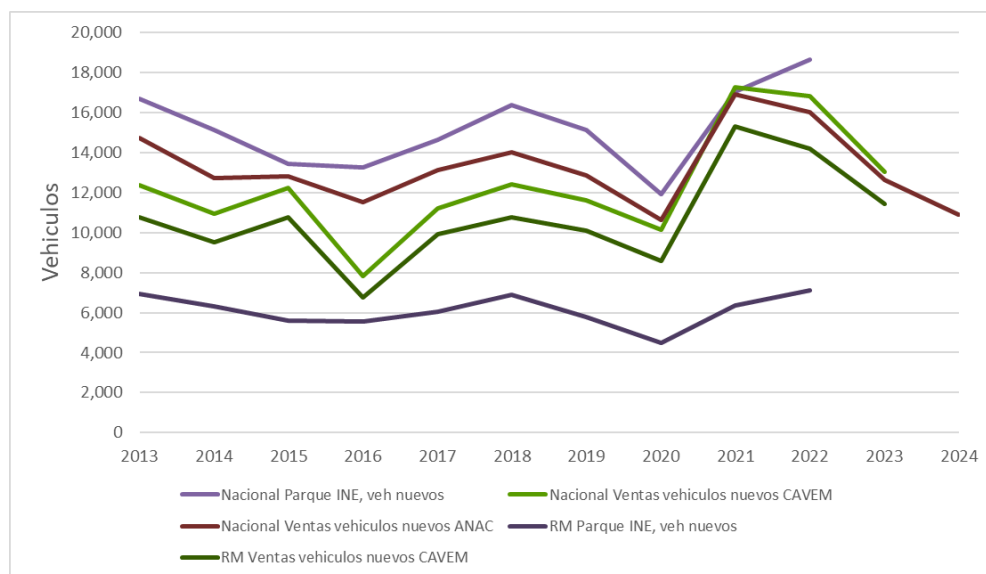


Figura 4-3 Evolución de camiones nuevos a nivel nacional y Región Metropolitana, 2013-2024.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del INE, Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC) y Cámara de Comercio Automotriz de Chile (CAVEM).

Las ventas de vehículos nuevos y el parque de vehículos en la Región Metropolitana tienden a seguir un comportamiento similar, con un descenso notorio en 2020, probablemente debido a la pandemia de COVID-19. Sin embargo, la recuperación después de 2020 es más pronunciada en las ventas de vehículos nuevos a nivel nacional y en la Región Metropolitana. Es importante notar que hay diferencias entre las dos fuentes de datos (INE y ANAC) tanto a nivel nacional como en la Región Metropolitana, especialmente en los años posteriores a 2020.

Antes de 2019, tanto las ventas de vehículos nuevos como el tamaño del parque vehicular seguían una tendencia de crecimiento o estabilización, con incrementos moderados año tras año. Sin embargo, en 2019, se observa una caída significativa en las ventas de vehículos nuevos y en el parque vehicular, tanto a nivel nacional como en la RM.

Por lo tanto, no se ve el efecto esperado de un cambio de tendencia positiva el 2019 que se esperaba como resultado de una renovación tecnológica.

Junto con lo anterior, el análisis implicó un ajuste econométrico que permita identificar este cambio de tendencia. Para el presente estudio se consideraron dos aproximaciones, regresión lineal y modelo de datos de panel.

El primer enfoque de regresión lineal evalúa si hay diferencias en la cantidad de vehículos nuevos entre regiones y si hubo un cambio en la tendencia después de 2019. Este modelo permite estimar el impacto de la política en la Región Metropolitana (RM) comparado con el resto del país.

La especificación del modelo es la siguiente:

Ecuación 2 Modelo de regresión lineal para evaluar tendencia de camiones nuevos

$$C = \alpha + \beta * reg_{\text{analysis}} + \gamma * post_{2019} + \delta * (reg_{\text{analysis}} * post_{2019}) + \varepsilon$$

Donde:

- C: Camiones nuevos.
- reg_{analysis} : variable dicotómica que permite identificar la Región Metropolitana de las otras regiones del país.
- $post_{2019}$: variable dicotómica que identifica si el año de análisis corresponde al período donde la medida ya estaba vigente.

Se incluye la interacción entre ambas variables, $reg_analysis:post_2019$, que permite evaluar el efecto de la medida específicamente en la Región Metropolitana. Si su coeficiente es estadísticamente significativo, esto indicaría que la cantidad de vehículos nuevos en la Región Metropolitana experimentó un cambio diferencial después de la implementación de la política.

El segundo modelo se refiere al análisis de datos de panel. Este enfoque permite controlar por factores inobservables que pueden influir en la compra de vehículos nuevos en cada valor de $reg_analysis$. El modelo se especifica de la siguiente manera:

Ecuación 3 Modelo de datos de panel para evaluar tendencia de camiones nuevos

$$C = \alpha_i + \sigma_t + \beta * (ano * reg_{\text{analysis}}) + \varepsilon_{it}$$

Aquí, α_i captura efectos fijos específicos de la Región Metropolitana y el resto, mientras que σ_t controla por tendencias generales en el tiempo. Si los coeficientes de los años posteriores a 2019 son negativos y significativos, se puede inferir que la medida pudo haber tenido un impacto negativo en la compra de vehículos nuevos.

Los modelos previos se aplicaron sobre la evolución de los camiones nuevos del parque INE (ver Figura 4-3), para la Región Metropolitana y el resto del país, para los años 2013 a 2022. Un resumen de los principales resultados se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Resultados análisis econométrico de la renovación del parque de camiones en la Región Metropolitana.

Modelo	Coficiente	Valor	t -stat	R2
Lineal	Intercepto	8,696	19.73	0.72
	post_2019	1,056	1.52	
	reg_analysisRM	-2,474	-3.97	
	post_2019:reg_analysisRM	-1,338	-1.36	

Datos de panel	Intercepto	8,356	5.38	0.85
	post_2019	973	1.69	
	ano2014	-795	-1.38	
	ano2015	-1,642	-2.85	
	ano2016	-1,723	-2.99	
	ano2017	-1,044	-1.81	
	ano2018	-175	-0.30	
	ano2019	-1,765	-3.06	
	ano2020	-3,368	-5.85	
	ano2021	-794	-1.38	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de camiones nuevos del parque INE 2013-2022.

Ambos modelos resultan ser significativos y con altos valores de R². El modelo lineal indica un leve aumento en la cantidad de vehículos nuevos (+1.056) desde el 2019, pero este efecto no es estadísticamente significativo al 5%. Sin embargo, en la RM hay una disminución significativa (-2.474). La interacción entre la región RM y el período post-2019 muestra una reducción en la cantidad de vehículos nuevos (-1.338), aunque este efecto tampoco es estadísticamente significativo al 5%. El análisis de datos de panel muestra un aumento en la cantidad de vehículos nuevos (+973) el año 219 por sobre el año base (2013). Sin embargo, esta diferencia no es significativa.

En resumen, los resultados sugieren que no hay evidencia de un cambio diferencial positivo en la tendencia de los camiones nuevos en la Región Metropolitana desde el 2019. Por lo tanto, no se identifica una eficacia de esta medida en la renovación del parque de camiones, como se habría esperado.

4.2.2 Artículo 9 – Límites de emisión para vehículos livianos y medianos

El Artículo 9 establece límites máximos de emisión permitidos en la Región Metropolitana para vehículos livianos de pasajeros, comerciales livianos y medianos. En el D.S. N°211/1991 del MTT, se establece que los vehículos motorizados livianos poseen un peso bruto menor a 2.700 kg, excluidos los de tres o menos ruedas, y se clasifican en vehículos de pasajeros (diseñados

principalmente para el transporte de personas⁴) y comerciales (diseñados para el transporte de carga o derivados de éstos). Por otro lado, en el D.S. N°54/1994 del MTT se define a los vehículos motorizados medianos como aquellos con un peso bruto igual o superior a 2.700 kg e inferior a 3.860 kg, destinado al transporte de personas o carga.

Con el objetivo de realizar un análisis cuantitativo del cumplimiento del Artículo 9, la contraparte del estudio proporcionó información proveniente del Sistema de Gestión de Plantas de Revisión Técnica (SGPRT) correspondiente al período 2012-2022. Esta información se centró en las Revisiones Técnicas de los tipos A2 y B, dado que estas incluyen mediciones de gases mediante el procedimiento ASM y abarcan los vehículos regulados por el decreto. Los registros correspondientes a las revisiones técnicas A2 alcanzaban un total de 1.173.139 datos para todo el periodo, mientras que para las revisiones tipo B esta cifra correspondía a 15.540.216 registros. A continuación, la Tabla 4-4 presenta la estructura de la base de datos proporcionada.

⁴ Se incluyen las camionetas livianas o furgones.

Tabla 4-4 Descripción de los campos de la base de datos PRT 2012-2022.

Nombre campo	Descripción
COD_PRT	Identificador de la Planta de Revisión Técnica
PPU	Número de placa patente único
COD_VEHICULO	Código de tipo de vehículo
COD_COMBUSTIBLE	Código de tipo de combustible
COD_SERVICIO	Código de tipo de servicio
COD_TIPO_SELLO	Indica el tipo de sello asociado al vehículo
COD_TIPO_CERTIFICACION	Tipo de tecnología que posee el vehículo
TARA	Peso del vehículo en kilos
PBV	Peso Bruto Vehicular en kilos
MARCA	Nombre de la marca del fabricante
MODELO	Nombre del modelo asociado al fabricante
ANO_FABRICACION	Año de fabricación del vehículo
KILOMETRAJE	Valor que registra el odómetro del vehículo al momento de la revisión técnica
FEC_REVISION	Fecha en que el vehículo realiza la revisión, en formato DD-MM-AAAA
HORA_INI	Hora de inicio de la revisión, cuando el vehículo es recepcionado en la planta, en formato HH:MM:SS
RESULTADO_CRT	Resultado de la revisión técnica informado por la PRT (Puede ser “A” o “R”).
RESULTADO_CRT_GASES	Resultado de la revisión de gases informado por la PRT (Puede ser “A” o “R”).
VALOR_HC_STDR5015	Valor HC según estándar 5015.
RESULTADO_HC_STDR5015	Resultado del HC según estándar 5015. Se graba el resultado de la medición del HC (Puede ser 0: No medido, 1: Aprobado, 3: Rechazado).
VALOR_CO_STDR5015	Valor CO según estándar 5015.
RESULTADO_CO_STDR5015	Resultado del CO según estándar 5015. Se graba el resultado de la medición del CO (Puede ser 0: No medido, 1: Aprobado, 3: Rechazado).
VALOR_NO_STDR5015	Valor NO según estándar 5015.
RESULTADO_NO_STDR5015	Resultado del NO según estándar 5015. Se graba el resultado de la medición del NO (Puede ser 0: No medido, 1: Aprobado, 3: Rechazado).
VALOR_HC_STDR2525	Valor HC según estándar 2525.
RESULTADO_HC_STDR2525	Resultado del HC según estándar 2525. Se graba el resultado de la medición del HC (Puede ser 0: No medido, 1: Aprobado, 3: Rechazado).
VALOR_CO_STDR2525	Valor CO según estándar 2525.
RESULTADO_CO_STDR2525	Resultado del CO según estándar 2525. Se graba el resultado de la medición del CO (Puede ser 0: No medido, 1: Aprobado, 3: Rechazado).
VALOR_NO_STDR2525	Valor NO según estándar 2525.
RESULTADO_NO_STDR2525	Resultado del NO según estándar 2525. Se graba el resultado de la medición del NO (Puede ser 0: No medido, 1: Aprobado, 3: Rechazado).
GAS_V_INERCIA_EQUIVALENTE	Valor Inercia Equivalente
RESULTADO_HUMO	Humo visible. Se graba el resultado de la inspección del humo visible (Puede ser 0: No medido, 1: Aprobado, 3: Rechazado).

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.1 Asignación de categorías vehiculares

Como primer paso, se renombraron algunas columnas en la base de datos con el objetivo de hacerlas más reconocibles. Los cambios realizados en los nombres de las columnas se detallan en la Tabla 9-1 en la sección de Anexos de este informe.

La clasificación del tipo de vehículo se realizó en base a la definición de cada categoría establecida en los D.S. N°211/1991 y D.S. N°54/1994 del MTT, utilizando el campo “peso_bruto_vehicular”. Cuando este campo registraba valor cero, pero en el campo “tara” existía un valor mayor a cero, se dejaba este último valor para realizar la asignación. De esta manera, el 4,3% de todos los registros en las plantas A2 utilizaron el valor de “tara” para la asignación, mientras que esta cifra fue de 8,7% para el total de registros en las plantas B (considera todo el periodo analizado).

La asignación en base al peso entregó en varios registros más de una categoría vehicular para un mismo tipo de vehículo⁵, por lo que éstas se corrigieron manualmente en base a la mayor proporción de registros que presentaba cada categoría, de manera que se obtuvo la clasificación final que se muestra en la Tabla 4-5. En la Tabla 9-2 de la sección de Anexos se puede encontrar una tabla con el porcentaje de registros cuya clasificación inicial fue corregida manualmente. Además, en la base de datos existen otras categorías vehiculares que se dejaron fuera del análisis por no tratarse de vehículos livianos o medianos, los cuales representaban un 3,9% del total de datos (todo el periodo analizado y considerando ambas plantas). Estas categorías y la cantidad de registros en cada una se muestran en la Tabla 9-3. De esta manera, al seleccionar solamente las categorías vehiculares de interés para el análisis cuantitativo del artículo 9, la base de datos de las revisiones técnicas A2 quedó con un total de 1.168.240 registros y la base de datos para las revisiones B con un total de 14.901.745 registros.

⁵ Por ejemplo, el tipo de vehículo “Station Wagon” fue asignado en categorías vehiculares de liviano, mediano y pesado.

Tabla 4-5 Categorías vehiculares asignadas para el análisis del Artículo 9.

Tipo de Vehículo	Código de categoría vehicular PRT	Categoría vehicular PRT
Vehículo Liviano Pasajeros	1	AUTOMOVIL
	2	CAMIONETA (CAP. DE CARGA MENOR A 1.750 KGS.) [B] (A2)
	4	STATION WAGON
	5	JEEP
	9	MINIBUS PARTICULAR [B] (A2)
	10	COCHE MORTUORIO
	13	LIMUSINA
	14	AMBULANCIA (CAP. CARGA MENOR A 1.750 KGS.) [B]
	15	CARROBOMBA (CAP. CARGA MENOR A 1.750 KGS.) [B]
	16	CASA RODANTE MOTORIZADA (CAP. CARGA MENOR A 1.750 KGS.) [B]
	17	AUTOMOVIL (ANTIGUO O HISTORICO)
	23	MINIBUS (ANTIGUO O HISTORICO)
	26	STATION WAGON (ANTIGUO O HISTORICO)
	27	CARROBOMBA (ANTIGUO O HISTORICO)
	118	STATION WAGON [A2]
	204	TAXI TURISMO
	205	TAXI BASICO
	206	TAXI COLECTIVO
	207	TAXI EJECUTIVO
	208	AUTO ESCUELA
Vehículo Liviano Comercial	3	FURGON (CAP. DE CARGA MENOR A 1.750 KGS.) [B]
	19	FURGON (ANTIGUO O HISTORICO)
Vehículo Mediano	203	MINIBUS
	221	CAMIONETA (CAP. DE CARGA MAYOR A 1.750 KGS.) [A2]
	225	FURGON (CAP. DE CARGA MAYOR A 1.750 KGS.) [A2]

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2 Control de calidad de los datos

Durante el análisis cuantitativo, se identificaron inconsistencias en la base de datos que requerían un chequeo más exhaustivo para comprender a fondo posibles errores o situaciones que pudieran afectar el análisis. Se llevaron a cabo una serie de verificaciones en los datos utilizando RStudio para identificar inconsistencias, como vehículos con antigüedad negativa, valores negativos en las emisiones de gases, entre otras. La Tabla 4-6 presenta el detalle de cada uno de los chequeos realizados en la base de datos, mientras que la Tabla 4-7 muestra el porcentaje de registros afectados dentro de un mismo año para los distintos criterios, diferenciando entre las revisiones técnicas de tipo A2 y B. En la Tabla 4-7 se observa que los registros afectados por los criterios 1, 2 y 5 representan menos del 1% de los datos en cada año analizado. Por este motivo, se decidió eliminar dichos registros del análisis. Sin embargo, los registros afectados por el criterio 3 y 4 constituyen un porcentaje significativo, por lo cual se decidió caracterizar este grupo de datos en la sección 4.2.2.3.

Como se mencionó anteriormente, se eliminaron los registros que resultaron afectados por los criterios 1, 2 y 5. De esta manera, se eliminaron 5.757 registros con antigüedad negativa en los datos de revisiones técnicas tipo A2 y 4.749 registros en los datos de tipo B. Asimismo, se descartaron 349 registros en las plantas A2 que contenían al menos un valor de emisión negativa y 42.605 registros dentro de las plantas B. Por último, respecto al criterio 5 se eliminaron 4.854 registros en los datos de revisiones tipo B, que poseían inconsistencia entre el código de medición y el resultado medido. En conjunto, este proceso de limpieza de datos resultó en la eliminación del 0,52% de los registros en las plantas A2 para todo el periodo analizado (2012-2022) y del 0,35% de los registros en las plantas B. De esta manera, la base de datos de las revisiones técnicas A2 quedó con un total de 1.162.134 registros y la base de datos para las revisiones B con un total de 14.849.537 registros.

Tabla 4-6 Verificaciones realizadas en la base de datos y acciones tomadas para su corrección.

Criterio	Condición	Acción tomada
1. Antigüedad negativa	La resta entre el año de revisión técnica y año de fabricación del vehículo es menor que cero	Se elimina registro
2. Emisión negativa	La emisión medida para al menos uno de los campos VALOR es negativa	Se elimina registro
3. Emisión cero	La emisión medida para al menos uno de los campos VALOR es igual a cero	Se registra, para no considerarlo en el análisis de reducción de emisiones
4. Emisión no existente	La emisión medida para al menos uno de los campos VALOR es igual a NA	Se registra, para no considerarlo en el análisis de reducción de emisiones
5. Inconsistencia de código de medición	La emisión medida para al menos uno de los campos VALOR es mayor a cero, pero su campo de RESULTADO indica "0" (no medido) o NA	Se elimina registro

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Tabla 4-7 Porcentaje de registros afectados en el chequeo de datos.

Planta	Año de registro	Cantidad de registros	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5
A2	2012	128.596	0,7%	0,0%	29,2%	2,8%	0,0%
	2013	126.624	0,8%	0,1%	31,2%	2,4%	0,0%
	2014	119.794	0,6%	0,1%	31,1%	2,2%	0,0%
	2015	113.066	0,5%	0,0%	36,1%	1,7%	0,0%
	2016	103.753	0,7%	0,0%	41,9%	0,3%	0,0%
	2017	107.034	0,5%	0,1%	37,8%	0,2%	0,0%
	2018	110.119	0,4%	0,1%	51,3%	0,5%	0,0%
	2019	98.187	0,3%	0,0%	57,9%	1,5%	0,0%
	2020	78.277	0,3%	0,0%	62,3%	0,3%	0,0%
	2021	92.345	0,2%	0,0%	64,3%	0,4%	0,0%
	2022	90.445	0,2%	0,0%	66,7%	0,7%	0,0%
B	2012	1.235.482	0,1%	0,2%	36,2%	3,4%	0,0%
	2013	1.242.790	0,1%	0,4%	38,9%	2,5%	0,0%
	2014	1.218.082	0,1%	0,6%	38,2%	2,8%	0,0%
	2015	1.111.206	0,0%	0,8%	39,2%	2,9%	0,2%
	2016	1.431.783	0,0%	0,8%	41,6%	2,7%	0,0%
	2017	1.430.568	0,0%	0,4%	42,8%	3,1%	0,0%
	2018	1.446.641	0,0%	0,0%	43,9%	4,0%	0,0%
	2019	1.454.326	0,0%	0,0%	37,7%	26,1%	0,0%
	2020	1.188.662	0,0%	0,0%	48,7%	6,1%	0,0%
	2021	1.622.897	0,0%	0,0%	49,8%	7,1%	0,0%
	2022	1.519.308	0,0%	0,0%	53,9%	5,5%	0,0%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

4.2.2.3 Caracterización de filas con emisión cero o no existente

En la Tabla 4-8 se muestra la cantidad de mediciones en la base de datos de las revisiones técnicas tipo A2 y B que registran un valor de emisión igual a cero no existente (NA) durante todo el periodo analizado. Este análisis se llevó a cabo con el propósito de identificar si estas mediciones correspondían predominantemente a algún contaminante específico o modo de operación particular que pudiera estar generando valores cero o NA de manera recurrente. Se observó que no existía una predominancia clara de ningún modo o contaminante, ya que las cifras se mantenían dentro del mismo orden de magnitud. Sin embargo, se pudo observar que la cantidad de mediciones con valores no existentes (NA) era considerablemente menor que la cantidad de mediciones con valor cero.

Tabla 4-8 Cantidad de mediciones con valor igual a cero o no existente para cada contaminante, modo ASM y tipo de revisión técnica.

Modo ASM	Contaminante	Emisión igual a cero		Emisión no existente (NA)	
		Plantas A2	Plantas B	Plantas A2	Plantas B
5015	HC	311.095	2.172.052	15.198	910.232
	CO	309.842	3.318.400	15.198	910.598
	NO	283.651	2.934.467	15.205	915.785
2525	HC	340.043	2.443.946	15.198	921.358
	CO	292.818	3.157.532	15.198	924.621
	NO	283.830	2.797.386	15.205	927.277

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Con el objetivo de caracterizar los registros con mediciones cero o NA, se elaboraron gráficos que muestran la proporción de registros asociados a cada uno de los atributos en los siguientes campos: codigo_planta, codigo_vehiculo, codigo_combustible, codigo_servicio, codigo_sello, codigo_certificacion, ano_modelo, inercia_equivalente, ano_registro y resultado_humo_visible. Estos gráficos, que proporcionan una visión detallada de las distribuciones dentro de cada campo, se encuentran disponibles en el Anexo 1 “Caracterización emisiones cero o no existentes” de los Anexos Digitales.

El hallazgo más relevante obtenido a partir de la elaboración de los gráficos fue que un porcentaje significativo de los datos con emisión igual a cero o no existente (NA) no presentaban tampoco información sobre su certificación (norma Euro) o inercia equivalente. Esto queda evidenciado en la Figura 4-4, que muestra el porcentaje de registros con emisión cero para el contaminante CO en el modo 5015. En las plantas A2, se observa que el 80% de los registros no cuentan con información sobre la certificación, mientras que en las plantas B, esta cifra alcanza el 100%. Por otro lado, la Figura 4-5 presenta el porcentaje de registros con emisión cero según inercia equivalente, donde se destaca que casi la mitad de los datos en las plantas A2 no tienen un valor asignado para este campo.

Es relevante destacar que un porcentaje significativo de los registros con emisión NA en las plantas A2 provenían de la planta “A21316”, como se ilustra en la Figura 4-6, y que en las revisiones técnicas tipo B un gran número de los registros con emisión NA provienen de las revisiones realizadas en el año 2019, tal como se muestra en la Figura 4-7.

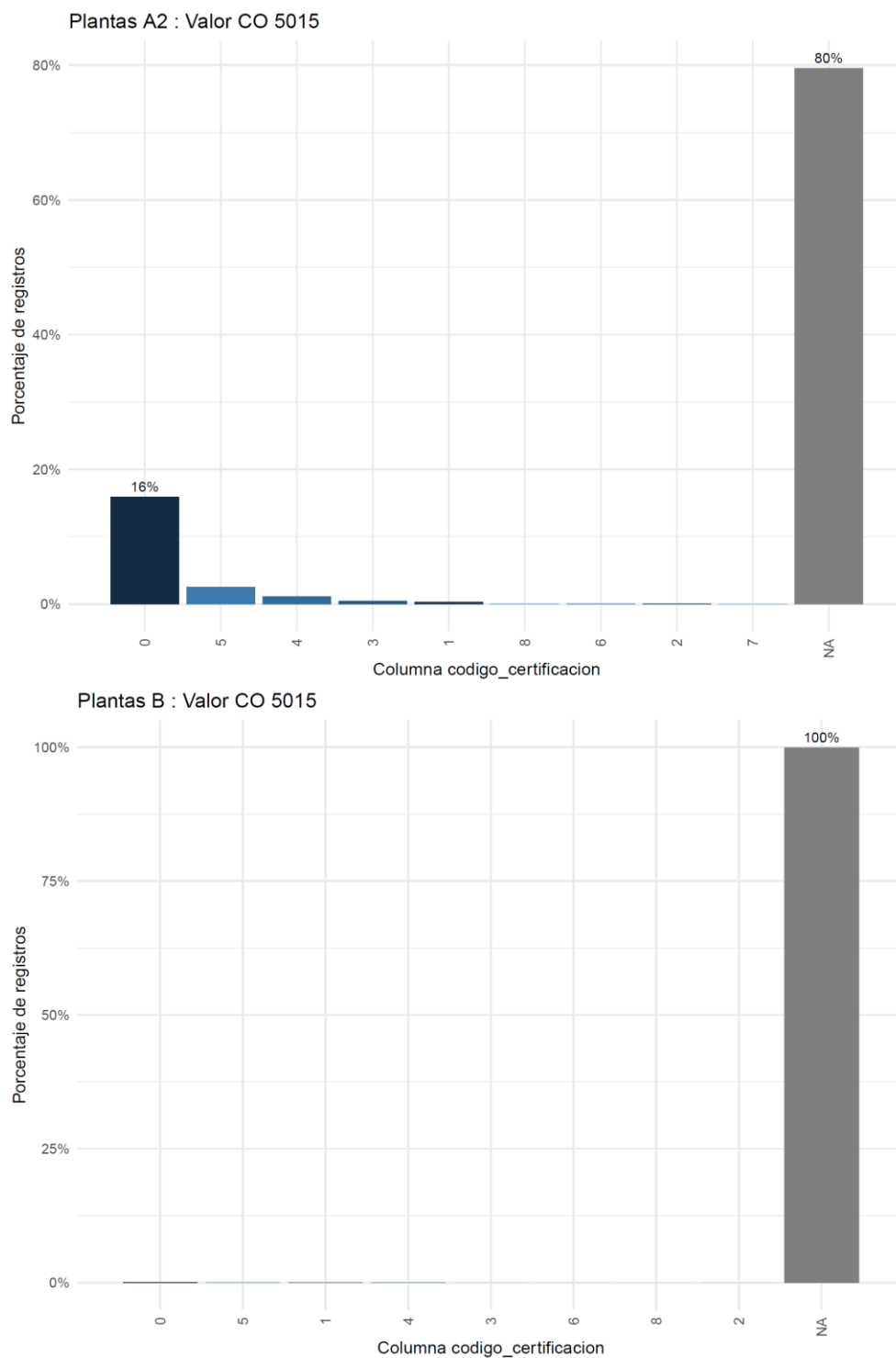


Figura 4-4 Porcentaje de registros con emisión cero para el CO Modo 5015 según código de certificación y tipo de revisión técnica.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

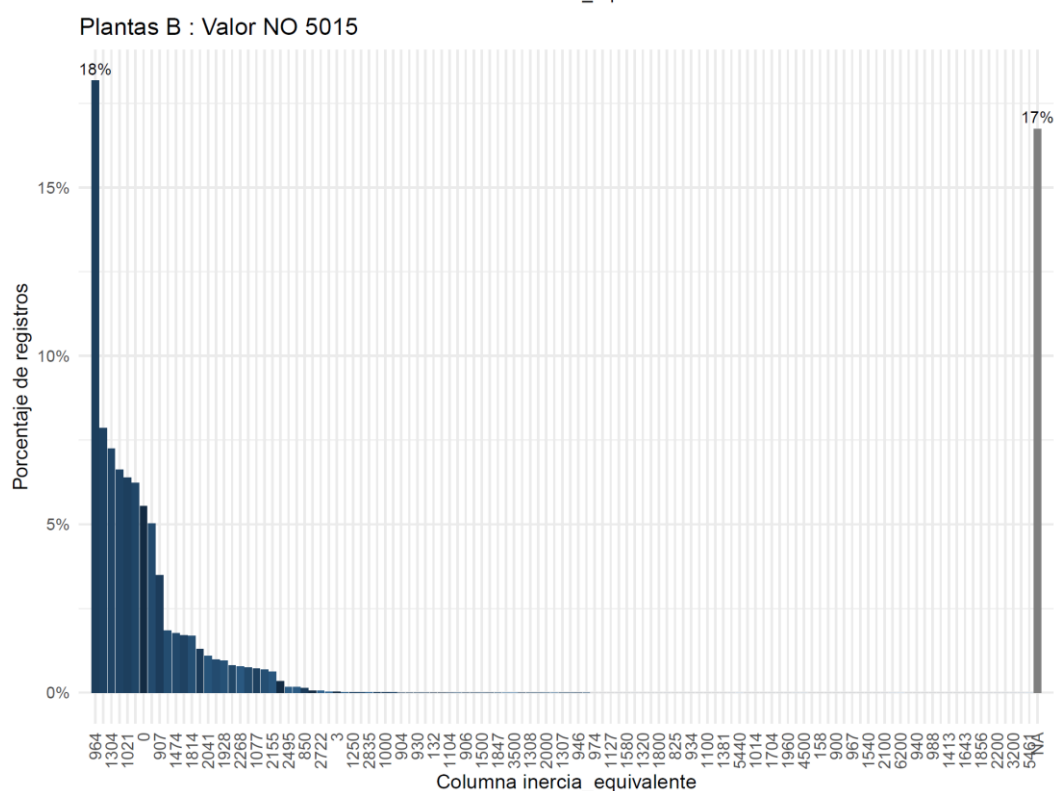
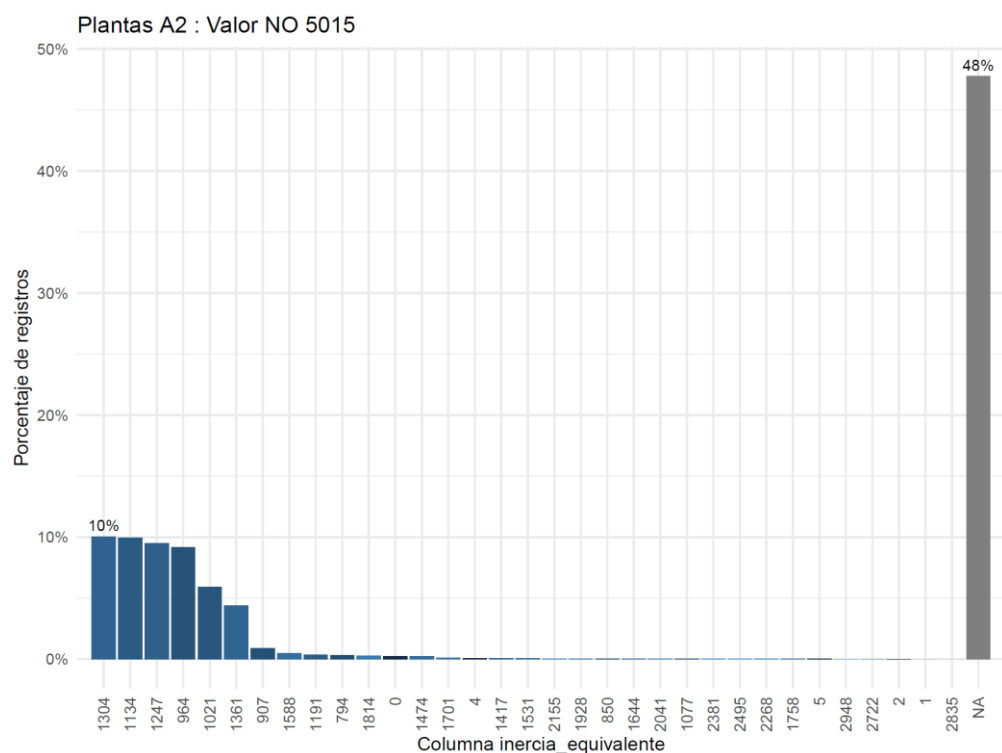


Figura 4-5 Porcentaje de registros con emisión cero para el NO Modo 5015 según inercia equivalente y tipo de revisión técnica.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

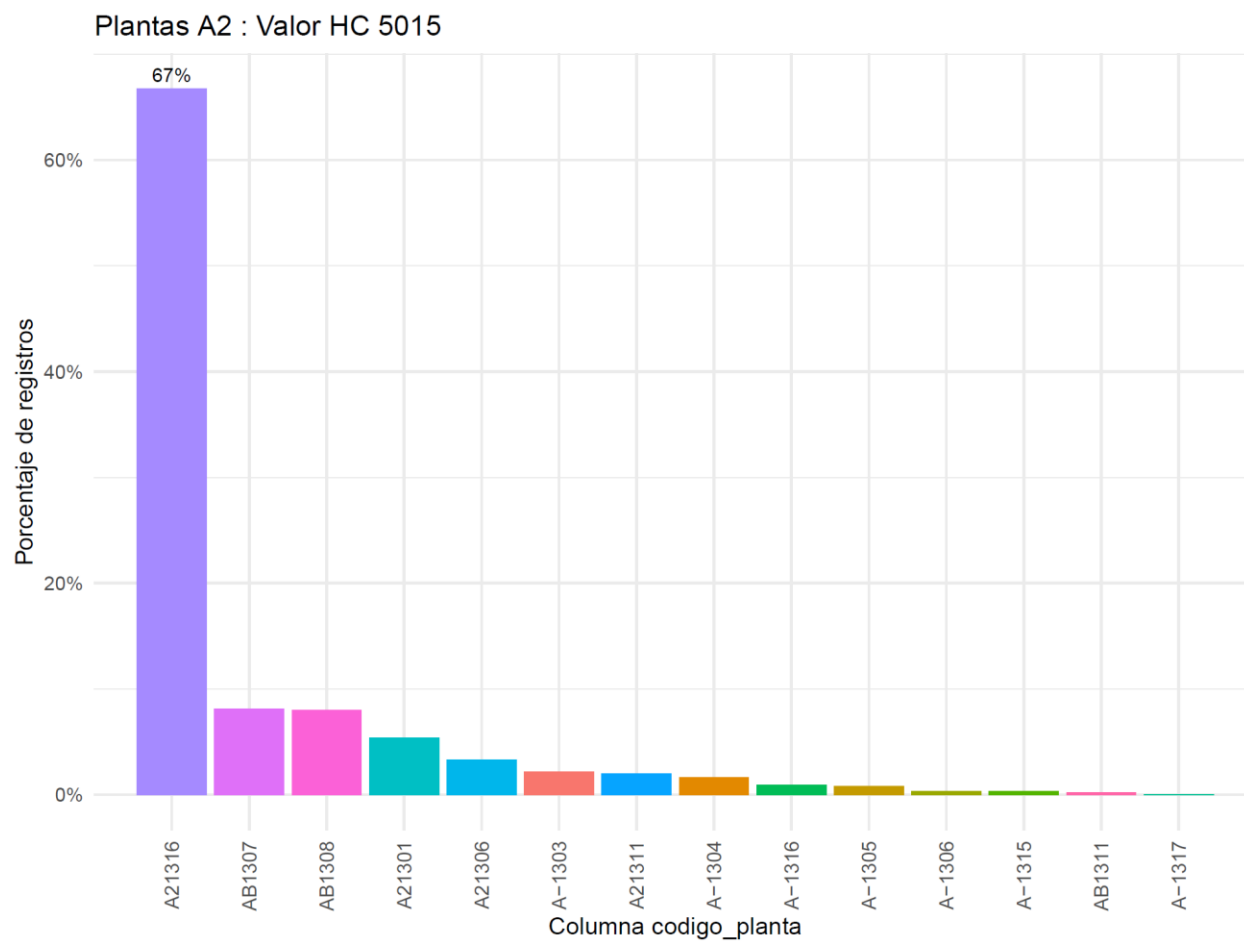


Figura 4-6 Porcentaje de registros con emisión NA para el HC Modo 5015 según planta de revisión técnica tipo A2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

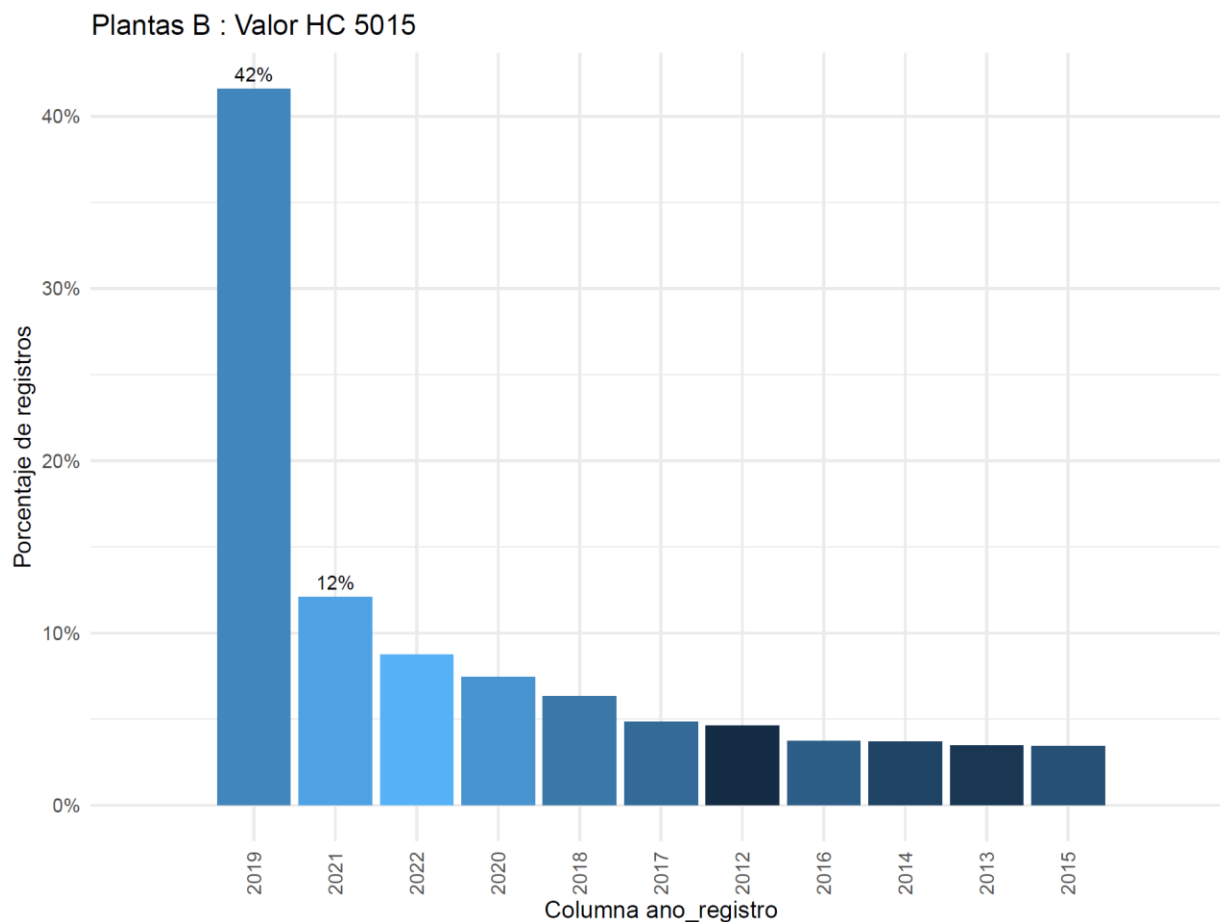


Figura 4-7 Porcentaje de registros con emisión NA para el HC Modo 5015 en las plantas tipo B según año de revisión técnica.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

4.2.2.4 Asignación de resultado ASM

Para poder realizar un análisis de las tasas de rechazo por emisión de gases ASM, se tuvo que construir un campo “resultado_asm” que mostrara un resultado de aprobado o rechazado dependiendo de si los valores de las mediciones de los gases ASM en un registro superaban o no los límites establecidos en la normativa.

En primer lugar, se unieron los datos de las revisiones tipo A2 y B de manera de contar con una sola base de datos, que resultó en 16.011.671 registros. En segundo lugar, se actualizaron los campos de inercia_equivalente en los registros de vehículos que en algún año presentaban ese campo vacío pero que en otros años sí tenía registrado un valor, de manera de completar lo mejor posible la base de datos. En tercer lugar, se crearon columnas de chequeo similares a las de “RESULTADO” en la Tabla 4-4, que guardarán “True” cuando la medición se mantenía por debajo del valor límite establecido en la norma y “False” en caso contrario. Para las revisiones técnicas realizadas entre 2012 y 2018, se compararon los valores presentes en las columnas de “VALOR”

con los valores límites establecidos en el D.S. N°149/2006 del MTT, mientras que para el periodo 2019 a 2022 se utilizaron los valores límites del artículo 9 del PPDA, que actualiza los valores del D.S. N°149/2006. A continuación, se creó un resultado global de la medición de gases ASM, llamado “resultado_asm”, que asignó una “R” (rechazado) a los registros donde al menos uno de los campos de “VALOR”, para algún contaminante o modo, superó los límites máximos establecidos. Dicho de otra manera, cuando al menos una de las columnas de chequeo guardaba “False”. En cambio, se asignó una “A” (aprobado) cuando todas las columnas de chequeo guardaban “True”, puesto que ninguno de los campos de “VALOR” superó los límites establecidos.

Es relevante mencionar que, debido a que los límites establecidos tanto en el D.S. N°149/2006 como en el artículo 9 del PPDA contemplan vehículos livianos y medianos con sello verde o amarillo, la asignación de resultado ASM solo se pudo realizar a este grupo de vehículos. Por ende, de la base de datos unida se seleccionaron los registros donde el campo “codigo_sello” era igual a 1 (Catalítico), 3 (Sello verde) o 4 (Sello Amarillo). De esta manera, la base de datos resultante cuenta con 16.004.421 registros, de los cuales a un total de 1.533.647 registros (9,6% de los datos) no se les pudo asignar un resultado ASM debido a que no presentaban un valor de inercia equivalente o poseían algún campo de medición de gases vacío.

Una vez realizado el proceso anterior, se procedió a analizar la consistencia del resultado ASM con lo registrado por las PRT de la siguiente manera:

- Se comparó cada una de las columnas de chequeo fabricadas para el resultado_asm con las columnas de RESULTADO (ver Tabla 4-4). En caso de que el valor para la columna de chequeo fuera “True” y el valor de la columna RESULTADO era “3” (rechazado) o “0” (no medido) entonces se considera la presencia de una inconsistencia. En el caso de que el valor para la columna de chequeo fuera “False” y el valor de la columna RESULTADO era “1” (aprobado) también se considera una inconsistencia.
- Se comparó el resultado ASM con los resultados individuales de cada contaminante y modo. En el caso de que resultado_asm = “A” y alguno de los campos de RESULTADO = “3” (rechazado), entonces se presenta una inconsistencia del tipo “Falso rechazado”, mientras que si resultado_asm = “R” y todos los campos de RESULTADO = “1” (aprobado) entonces se presenta una inconsistencia del tipo “Falso aprobado”.

La Tabla 4-9 muestra el porcentaje de datos que dieron inconsistencia según la comparación entre las columnas de chequeo y RESULTADO, como también los datos que presentan inconsistencia por resultado ASM.

Tabla 4-9 Porcentaje de registros inconsistentes respecto al resultado ASM.

Año de registro	Cantidad de registros	Inconsistencia entre la columna de chequeo y la columna de resultado para cada modo/contaminante						Inconsistencia en el resultado ASM	
		HC 5015	CO 5015	NO 5015	HC 2525	CO 2525	NO 2525	Falso rechazado	Falso aprobado
2012	1.359.080	9,0%	8,2%	14,9%	7,9%	8,0%	9,1%	0,0%	10,3%
2013	1.361.537	7,2%	6,6%	10,7%	6,4%	6,5%	7,3%	0,0%	6,7%
2014	1.327.996	6,3%	5,8%	8,0%	5,7%	5,7%	6,3%	0,0%	4,1%
2015	1.210.764	5,5%	5,1%	6,4%	5,1%	5,0%	5,4%	0,3%	2,5%
2016	1.521.720	4,6%	4,3%	5,1%	4,3%	4,2%	4,5%	0,5%	1,3%
2017	1.529.497	4,0%	3,7%	4,4%	3,7%	3,6%	3,9%	0,5%	1,3%
2018	1.554.645	3,6%	3,4%	4,0%	3,3%	3,3%	3,6%	0,4%	1,2%
2019	1.551.093	3,6%	3,4%	4,0%	3,1%	3,6%	3,4%	0,0%	3,3%
2020	1.265.837	3,2%	3,1%	3,5%	2,7%	3,4%	2,9%	0,0%	3,8%
2021	1.713.813	3,0%	2,9%	3,3%	2,5%	3,2%	2,8%	0,0%	3,4%
2022	1.608.439	2,8%	2,7%	3,1%	2,4%	3,0%	2,6%	0,0%	3,2%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

4.2.2.5 Análisis cuantitativo

Como al 9,6% de los registros no se le pudo asignar un resultado ASM debido a que no presentaban un valor de inercia equivalente o poseían algún campo de medición de gases vacío, para el análisis cuantitativo se utilizaron solo los registros con resultado ASM disponible, que corresponde a 14.470.774 registros.

Se estimaron las tasas de rechazo históricas de revisión técnica considerando únicamente el resultado ASM durante la primera visita a la PRT realizada por cada vehículo (número de placa patente único). La Tabla 4-10 muestra el parque de vehículos en su primera revisión técnica, mientras que la Tabla 4-11 muestra las tasas de rechazo históricas según categoría vehicular.

Tabla 4-10 Parque de vehículos en la primera revisión técnica por año calendario.

Año de registro	Cantidad de vehículos	Aprobados en 1° Revisión		Rechazados en 1° Revisión	
		Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
2012	792.227	685.267	86%	106.960	14%
2013	855.069	771.452	90%	83.617	9,8%
2014	847.820	788.009	93%	59.811	7,1%
2015	806.725	761.880	94%	44.845	5,6%
2016	965.004	925.337	96%	39.667	4,1%
2017	976.707	937.571	96%	39.136	4,0%
2018	995.974	959.385	96%	36.589	3,7%
2019	799.832	739.813	92%	60.019	7,5%
2020	831.388	774.235	93%	57.153	6,9%
2021	1.034.991	972.967	94%	62.024	6,0%
2022	1.009.594	952.568	94%	57.026	5,6%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

La Tabla 4-11 presenta las tasas de rechazo históricas según categoría vehicular, donde se puede observar que para los vehículos livianos se observa de manera general una tendencia decreciente durante el período 2012-2018. No obstante, en 2019 se registra un incremento de la tasa de rechazo respecto al año anterior, lo cual coincide con el año en que comienza a ser vigente el artículo 9 del PPDA. A partir del siguiente año, las tasas retoman la tendencia decreciente. Respecto a los vehículos medianos, no se observa una tendencia marcada como sucede con los vehículos livianos, sin embargo, se observa también un aumento significativo durante el año 2019, donde la tasa de rechazo se duplica en comparación al año anterior. A partir de ese año, la tasa se ha mantenido alrededor del 20% de rechazo.

Tabla 4-11 Tasas de rechazo históricas por emisión de gases ASM según categoría vehicular.

Año de registro	Vehículo Liviano Pasajeros		Vehículo Liviano Comercial		Vehículo Mediano	
	Cantidad	Porcentaje rechazo	Cantidad	Porcentaje rechazo	Cantidad	Porcentaje rechazo
2012	772.313	13,5%	18.855	13,0%	1.059	8,9%
2013	833.943	9,8%	20.002	9,4%	1.124	10,6%
2014	826.307	7,1%	20.387	5,8%	1.126	4,7%
2015	786.639	5,6%	18.987	5,1%	1.099	4,8%
2016	940.974	4,1%	22.972	4,9%	1.058	3,0%
2017	952.720	4,0%	23.007	4,7%	980	7,2%
2018	971.713	3,6%	23.325	4,4%	936	9,3%
2019	781.470	7,4%	17.524	10,4%	838	19,3%
2020	813.641	6,8%	17.058	9,3%	689	20,8%
2021	1.012.276	5,9%	22.003	8,4%	712	19,2%
2022	988.069	5,6%	20.883	7,8%	642	20,2%

Nota 1: Solo incluye vehículos de gasolina o dual con gasolina.

Nota 2: La tasa de rechazo corresponde al rechazo por cualquier gas (HC, CO, NO) y modo (5015, 2525).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Una vez que se estableció el cumplimiento de cada registro con los límites de ASM utilizando los límites vigentes, se identificaron tres grupos de vehículos dentro del parque de análisis:

- Vehículos que aprueban la emisión de gases ASM en su primera revisión ("A").
- Vehículos que son rechazados en la emisión de gases ASM durante su primera revisión, pero son reparados posteriormente y terminan aprobados ("RA"). Para este grupo se determinó que un período de reparación y nueva visita a la PRT no podía superar 90 días desde la primera visita. De lo contrario, se considera como un nuevo periodo de revisión técnica.
- Vehículos que son rechazados en la emisión de gases ASM durante su primera revisión y no son reparados dentro de los próximos 90 días ("RR").

Se estimaron reducciones de emisiones del parque de vehículos "RA" generadas por las reparaciones. Para esto, se calcularon las reducciones por contaminante y modo, independiente de si el rechazo era ocasionado por dicho contaminante o modo, porque se consideró que, al realizar reparaciones por el rechazo de uno o varios contaminantes en específico, se estaría afectando de igual manera la emisión de los contaminantes que no ocasionaron el rechazo.

Ecuación 4 Cálculo de reducción de emisiones absolutas

$$Reduccion\ absoluta_{c,m} = E_{r,c,m} - E_{ac,m}$$

Ecuación 5 Cálculo de reducción de emisiones porcentuales

$$Reduccion\ porcentual_{c,m} = \frac{(E_{r,c,m} - E_{ac,m})}{E_{r,c,m}}$$

Donde:

E_r : Emisión registrada en el rechazo para el contaminante c en el modo m.

E_a : Emisión registrada en la aprobación para el contaminante c en el modo m.

Para un mejor análisis del resultado de las reducciones de emisiones, se decidió evaluar un escenario distinto a los límites actuales del PPDA, de manera de realizar una comparativa entre lo que se ha reducido con los límites actuales y un escenario más estricto. Para esto, se consideraron los límites de Tier 1 establecidos por la EPA en "Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emission Standards, Quality Control Requirements, and Equipment Specifications: Final Technical Guidance" (U.S EPA, 2004). De esta manera, en la misma base de datos que se asignó un resultado ASM para los límites actuales, se estimó un nuevo resultado de gases ASM con relación a los límites de este nuevo escenario. Con esto se obtuvo un parque de vehículos aprobado y otro de rechazados, por lo que para crear los parques "RA" y "RR" se consideró que se reparaba la misma proporción de vehículos que actualmente son reparados dentro de cada año calendario. La Tabla 4-12 muestra la cantidad de vehículos que compone cada parque A, RR y RA con los límites actuales y los límites propuestos de la EPA.

Tabla 4-12 Parques de vehículos según el resultado en su revisión técnica.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque A	Parque RR	Parque RA	Parque total ⁽¹⁾
Límites actuales	2012	685.267	86.617	20.343	792.227
	2013	771.452	65.712	17.905	855.069
	2014	788.009	43.375	16.436	847.820
	2015	761.880	30.645	14.200	806.725
	2016	925.337	20.139	19.528	965.004
	2017	937.571	16.826	22.310	976.707
	2018	959.385	15.432	21.157	995.974
	2019	739.813	38.778	21.241	799.832
	2020	774.235	39.143	18.010	831.388
	2021	972.967	42.201	19.823	1.034.991
	2022	952.568	38.786	18.240	1.009.594
Límites nuevos (EPA)	2019	684.690	74.393	40.749	799.832
	2020	716.887	78.420	36.081	831.388
	2021	908.617	85.985	40.389	1.034.991
	2022	891.797	80.119	37.678	1.009.594

(1): Corresponde a la suma de los parques "A" + "RR" + "RA".

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Como la cantidad de vehículos perteneciente al Parque RA en el escenario de los límites nuevos es mayor que con los límites actuales, para generar el subconjunto de vehículos rechazados que se repara con los nuevos límites se realizó lo siguiente:

1. Se escogieron los mismos vehículos que se reparan actualmente con los límites del PPDA a partir del Parque "RA" para cada año calendario en el periodo evaluado 2019-2022.
2. Se escogieron aleatoriamente del grupo de vehículos rechazados, aquellos que no coinciden con los vehículos seleccionados en el paso anterior, de manera de completar la cantidad de vehículos del Parque "RA" generado con los límites nuevos.

Una vez obtenido el parque de vehículos a reparar con los nuevos límites, se realizó un ajuste de regresión lineal sobre la base de datos con los límites del PPDA para modelar la relación entre las emisiones en el rechazo (E_r) y las reducciones absolutas ($E_r - E_a$), con el objetivo de proyectar potenciales reducciones bajo el nuevo escenario con límites más estrictos. De esta manera, se estimaron las emisiones "aprobadas" para el grupo de vehículos RA. La Figura 4-8 muestra un ejemplo del ajuste que se realizó en los datos para el caso del HC en el modo 5015. En el Anexo 3 "Emisiones ASM" de Anexos Digitales se puede encontrar un Excel con los coeficientes de cada regresión lineal generada por contaminante, modo y categoría vehicular, además de sus estadísticas de significancia.

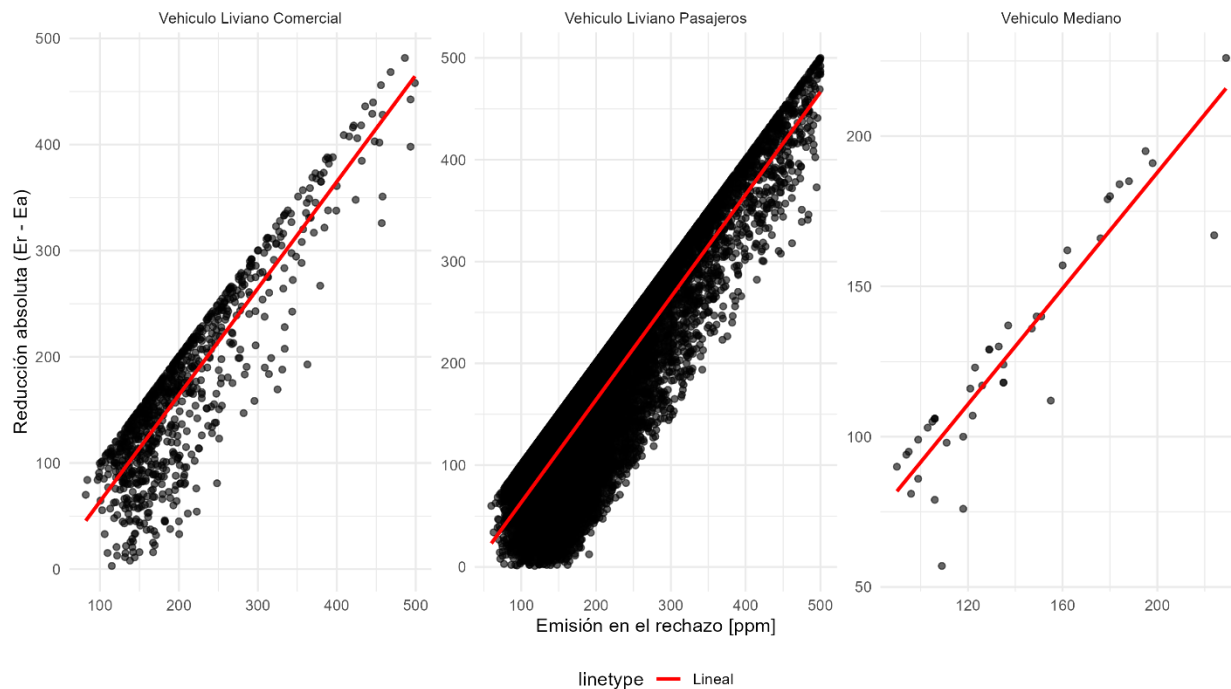


Figura 4-8 Emisión en el rechazo vs. Reducción absoluta para el HC en el modo 5015.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4-13 muestra las emisiones totales de ASM para el contaminante HC en el modo 5015, para el parque de vehículos A, RR, RA antes de las reparaciones (cuando el vehículo es rechazado) y RA después de las reparaciones (cuando el vehículo es aprobado). Además, se muestra el porcentaje de reducción en las emisiones totales para el parque RA ocasionado por las reparaciones. Se observa que en promedio la reducción de emisiones del parque RA alcanza un 72% con los límites actuales en el periodo analizado, mientras que en el escenario de límites nuevos este porcentaje corresponde a un 61% para el periodo 2019-2022. Esta disminución en la reducción de emisiones se debe a que, con límites más estrictos, se están rechazando vehículos “más limpios” que en la situación actual con los límites del PPDA. Por lo que estos vehículos más limpios deben reducir menos sus emisiones para lograr la aprobación. De esta manera, en promedio la reducción de emisiones del parque RA es menor en el nuevo escenario que con los límites actuales.

Por otro lado, la Tabla 4-14 muestra las emisiones totales de ASM para el contaminante HC en el modo 5015 para el parque completo (A + RR + RA) antes y después de las reparaciones realizadas al grupo RA. Asimismo, se incluye el porcentaje de reducción en las emisiones totales del parque completo. Los resultados indican que, en promedio, la reducción de emisiones del parque completo alcanza un 8% bajo los límites actuales en el periodo analizado, mientras que en el escenario de límites nuevos este porcentaje asciende a un 12% durante el periodo 2019-2022. Este incremento es consistente con la aplicación de criterios más exigentes de aprobación, lo que

implica que los vehículos aprobados emiten menores cantidades de contaminantes en comparación con el escenario actual.

Tabla 4-13 Emisión total de HC [ppm] en el modo 5015 según parques de resultados.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque A	Parque RR	Parque RA previa reparación	Parque RA post reparación	Reducción de emisiones en los autos que se reparan
Límites actuales	2012	22.713.225	10.960.232	3.248.057	863.890	73%
	2013	24.028.347	8.224.299	2.920.598	828.422	72%
	2014	25.520.016	5.696.982	2.675.806	863.388	68%
	2015	24.286.215	3.948.785	2.548.970	727.110	71%
	2016	26.238.747	2.447.548	3.479.309	965.169	72%
	2017	26.261.709	1.939.166	3.748.620	1.135.942	70%
	2018	23.599.681	1.746.026	3.571.239	1.022.525	71%
	2019	12.800.468	3.491.036	2.789.779	735.481	74%
	2020	13.282.328	3.602.687	2.246.108	631.224	72%
	2021	16.217.291	3.692.552	2.501.748	656.098	74%
	2022	15.807.429	3.222.820	2.291.910	580.468	75%
Límites nuevos (EPA)	2019	9.331.093	5.421.697	4.328.493	1.574.672	64%
	2020	9.671.035	5.902.535	3.557.552	1.396.254	61%
	2021	12.226.976	6.202.483	3.982.132	1.568.230	61%
	2022	12.133.431	5.564.152	3.624.577	1.444.566	60%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Tabla 4-14 Emisión total de HC [ppm] en el modo 5015 para el parque total.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque total antes de la reparación ⁽¹⁾	Parque total después de la reparación ⁽²⁾	Reducción de emisiones en el parque total
Límites actuales	2012	36.921.514	34.537.347	6%
	2013	35.173.244	33.081.068	6%
	2014	33.892.804	32.080.386	5%
	2015	30.783.970	28.962.111	6%
	2016	32.165.604	29.651.465	8%
	2017	31.949.495	29.336.817	8%
	2018	28.916.946	26.368.232	9%
	2019	19.081.284	17.026.986	11%
	2020	19.131.122	17.516.239	8%
	2021	22.411.591	20.565.941	8%
	2022	21.322.160	19.610.717	8%
Límites nuevos (EPA)	2019	19.081.284	16.327.463	14%
	2020	19.131.122	16.969.824	11%
	2021	22.411.591	19.997.689	11%
	2022	21.322.160	19.142.149	10%

(1): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques "A" + "RR" + "RA previa reparación".

(2): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques "A" + "RR" + "RA post reparación".

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

La Tabla 4-15 muestra las emisiones totales de ASM para el contaminante CO en el modo 5015, para el parque de vehículos A, RR, RA antes y después de las reparaciones, como también el porcentaje de reducción en las emisiones totales para el parque RA. Se observa que en promedio la reducción de emisiones del parque RA alcanza un 84% con los límites actuales en el periodo analizado, mientras que en el escenario de límites nuevos este porcentaje corresponde a un 65% para el periodo 2019-2022. Esta disminución en la reducción de emisiones se debe a lo mencionado anteriormente, respecto al rechazo de vehículos más limpios que con los límites actuales son aprobados. En términos comparativos, la reducción promedio de CO bajo los límites vigentes (84%) es superior a la observada para HC (72%). No obstante, al evaluar el escenario con los límites nuevos, la reducción promedio de CO (65%) se aproxima a la registrada para HC en este contexto (61%).

Por otro lado, la Tabla 4-16 muestra las emisiones totales para el parque completo (A + RR + RA) antes y después de las reparaciones realizadas al grupo RA. Se incluye el porcentaje de reducción en las emisiones totales del parque completo, donde se puede observar que, en promedio, la reducción de emisiones alcanza un 14% bajo los límites actuales y un 16% con los límites del escenario propuesto. Este incremento es menor que lo obtenido para el HC (aumentaba de 8% a 12%), lo cual podría explicarse por una combinación de diversos factores como las tecnologías correctivas aplicadas a los vehículos rechazados (reparación del sistema de inyección, recambio de sensores, entre otros), que podrían ser más eficientes en la reducción de HC en comparación al CO. Asimismo, dado que en promedio los vehículos reparados actualmente logran una reducción del 84% en sus emisiones de CO, es posible que la tecnología disponible haya alcanzado un umbral en el que la capacidad de reducción adicional sea más limitada.

Tabla 4-15 Emisión total de CO [%Volumen] en el modo 5015 según parques de resultados.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque A	Parque RR	Parque RA previa reparación	Parque RA post reparación	Reducción de emisiones en los autos que se reparan
Límites actuales	2012	82.415	61.641	23.618	3.348	86%
	2013	90.226	49.608	23.492	3.298	86%
	2014	98.055	38.239	21.130	3.446	84%
	2015	96.905	35.659	23.031	3.325	86%
	2016	104.235	24.883	28.972	4.153	86%
	2017	112.367	18.493	32.464	5.091	84%
	2018	112.673	15.005	30.127	4.844	84%
	2019	57.141	19.673	17.634	3.327	81%
	2020	61.756	20.896	15.492	2.903	81%
	2021	73.459	22.324	18.397	3.023	84%
	2022	69.713	20.138	16.148	2.579	84%
Límites nuevos (EPA)	2019	38.900	29.979	25.569	9.356	63%
	2020	41.966	33.076	23.101	8.234	64%
	2021	51.514	35.681	26.985	9.224	66%
	2022	49.002	32.907	24.090	8.437	65%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Tabla 4-16 Emisión total de CO [%Volumen] en el modo 5015 para el parque total.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque total antes de la reparación ⁽¹⁾	Parque total después de la reparación ⁽²⁾	Reducción de emisiones en el parque total
Límites actuales	2012	167.674	147.404	12%
	2013	163.326	143.132	12%
	2014	157.424	139.740	11%
	2015	155.595	135.889	13%
	2016	158.091	133.272	16%
	2017	163.324	135.951	17%
	2018	157.805	132.522	16%
	2019	94.448	80.140	15%
	2020	98.144	85.555	13%
	2021	114.180	98.806	13%
	2022	105.999	92.430	13%
Límites nuevos (EPA)	2019	94.448	78.235	17%
	2020	98.144	83.276	15%
	2021	114.180	96.420	16%
	2022	105.999	90.346	15%

(1): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques "A" + "RR" + "RA previa reparación".

(2): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques "A" + "RR" + "RA post reparación".

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

La Tabla 4-17 muestra las emisiones totales de ASM para el contaminante NO en el modo 5015, para el parque de vehículos A, RR, RA antes y después de las reparaciones, como también el porcentaje de reducción en las emisiones totales para el parque RA. Se observa que en promedio la reducción de emisiones del parque RA alcanza un 81% con los límites actuales en el periodo analizado, mientras que en el escenario de límites nuevos este porcentaje corresponde a un 77% para el periodo 2019-2022. Esta disminución en la reducción de emisiones es consistente con lo obtenido para los contaminantes anteriores. En términos comparativos, la reducción promedio de NO bajo los límites vigentes (81%) es superior a la observada para HC (72%) y cercana a lo obtenido para el CO (84%). No obstante, al evaluar el escenario con los límites nuevos, la reducción promedio de NO (77%) es superior que lo obtenido para los otros contaminantes en este contexto (65% para el CO y 61% para el HC).

Por otro lado, la Tabla 4-18 muestra las emisiones totales para el parque completo (A + RR + RA) antes y después de las reparaciones realizadas al grupo RA. Se incluye el porcentaje de reducción en las emisiones totales del parque completo, donde se puede observar que, en promedio, la reducción de emisiones alcanza un 14% bajo los límites actuales y un 23% con los límites del escenario propuesto. Este incremento es mayor que lo obtenido para el HC (aumentaba de 8% a 12%) y el CO (aumentaba de 14% a 16%), lo cual podría significar una mayor sensibilidad de las emisiones de NO_x a intervenciones correctivas en los vehículos rechazados.

En el caso de las emisiones registradas en el modo 2525, los resultados muestran una tendencia similar a la observada en el modo 5015, evidenciando un patrón consistente en las reducciones de emisiones. Esto sugiere que el comportamiento de disminución de contaminantes se mantiene independientemente del modo de medición considerado. En el Anexo 3 “Emisiones ASM” de los Anexos Digitales se encuentra un Excel con las emisiones totales mostradas anteriormente incluyendo además para el modo 2525.

Tabla 4-17 Emisión total de NO [ppm] en el modo 5015 según parques de resultados.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque A	Parque RR	Parque RA previa reparación	Parque RA post reparación	Reducción de emisiones en los autos que se reparan
Límites actuales	2012	146.755.461	131.515.048	40.958.415	6.908.908	83%
	2013	166.733.541	100.041.368	35.679.959	7.153.613	80%
	2014	186.761.258	65.793.219	32.769.466	7.469.128	77%
	2015	146.435.374	42.417.641	26.061.751	5.410.879	79%
	2016	151.161.290	27.384.446	33.029.480	7.244.503	78%
	2017	131.579.727	20.627.665	36.810.359	7.546.496	79%
	2018	127.674.603	17.576.025	33.723.155	7.132.297	79%
	2019	62.139.878	30.196.996	27.598.027	4.961.768	82%
	2020	56.457.760	27.798.626	22.364.083	3.683.335	84%
	2021	63.661.362	29.785.798	23.771.057	3.687.606	84%
Límites nuevos (EPA)	2022	60.149.217	28.316.934	24.834.469	3.146.172	87%
	2019	39.406.885	41.995.555	38.532.461	8.659.136	78%
	2020	35.758.941	39.318.675	31.542.852	7.360.704	77%
	2021	40.450.364	42.733.508	34.034.345	8.209.252	76%
	2022	39.416.743	39.564.045	34.319.832	7.431.044	78%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Tabla 4-18 Emisión total de NO [ppm] en el modo 5015 para el parque total.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque total antes de la reparación ⁽¹⁾	Parque total después de la reparación ⁽²⁾	Reducción de emisiones en el parque total
Límites actuales	2012	319.228.924	285.179.417	11%
	2013	302.454.868	273.928.522	9%
	2014	285.323.943	260.023.605	9%
	2015	214.914.766	194.263.894	10%
	2016	211.575.216	185.790.240	12%
	2017	189.017.751	159.753.888	15%
	2018	178.973.783	152.382.926	15%
	2019	119.934.900	97.298.642	19%
	2020	106.620.469	87.939.721	18%
	2021	117.218.217	97.134.766	17%
Límites nuevos (EPA)	2022	113.300.620	91.612.324	19%
	2019	119.934.900	90.061.576	25%
	2020	106.620.469	82.438.320	23%
	2021	117.218.217	91.393.123	22%
	2022	113.300.620	86.411.832	24%

(1): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques "A" + "RR" + "RA previa reparación".

(2): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques "A" + "RR" + "RA post reparación".

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Se evaluó el caso en que todos los vehículos del parque de rechazados fueran reparados, estimando las emisiones de aprobación con las regresiones lineales obtenidas anteriormente. De la Tabla 4-19 hasta la Tabla 4-21 se muestran las emisiones totales para el modo 5015 del parque

total después de la reparación de todos los vehículos rechazados. Asimismo, se muestra el porcentaje de reducción en las emisiones totales para este escenario de reparación completa y se compara con la reducción obtenida en las tablas anteriores (Tabla 4-14, Tabla 4-16, Tabla 4-18).

En el caso del HC, se observa que la reducción de emisiones del parque total aumenta el doble o más que en la situación actual, alcanzando valores entre 10% y 20% con los límites actuales. En el escenario con límites EPA, las reducciones son aún mayores, variando entre 22% y 28%. Para el CO se obtienen reducciones superiores a las obtenidas en HC, tal como se vio anteriormente, alcanzando valores entre 21% y 28% con los límites actuales. Bajo los límites EPA, la reducción es aún más pronunciada, llegando a 31% en el año 2019. Por otro lado, las emisiones de NO experimentan la mayor reducción, alcanzando hasta 44% con los límites actuales y en promedio un 45% con los límites EPA, lo que indica un alto potencial de disminución de este contaminante en un escenario de reparación completa.

Los resultados sugieren que la reparación completa de los vehículos rechazados es una estrategia efectiva para la reducción de emisiones, especialmente en NO y CO. Además, la implementación de límites más estrictos potenciaría aún más este efecto, logrando reducciones superiores al 45% en NO y alrededor del 30% en CO y HC.

Tabla 4-19 Reducción de emisiones HC [ppm] en el modo 5015 por la reparación del parque completo de rechazados.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque total antes de la reparación ⁽¹⁾	Parque total después de la reparación ⁽²⁾	Reducción de emisiones en el parque total	Reducción anterior
Límites actuales	2012	319.228.924	31.404.201	15%	6%
	2013	302.454.868	30.569.023	13%	6%
	2014	285.323.943	29.888.394	12%	5%
	2015	214.914.766	27.400.013	11%	6%
	2016	211.575.216	28.726.864	11%	8%
	2017	189.017.751	28.627.321	10%	8%
	2018	178.973.783	25.739.074	11%	9%
	2019	119.934.900	15.335.902	20%	11%
	2020	106.620.469	15.761.807	18%	8%
	2021	117.218.217	18.864.845	16%	8%
	2022	113.300.620	18.222.876	15%	8%
Límites nuevos (EPA)	2019	119.934.900	13.787.809	28%	14%
	2020	106.620.469	14.119.549	26%	11%
	2021	117.218.217	17.139.376	24%	11%
	2022	113.300.620	16.678.178	22%	10%

(1): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques "A" + "RR previa reparación" + "RA previa reparación".

(2): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques "A" + "RR post reparación" + "RA post reparación".

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Tabla 4-20 Reducción de emisiones CO [%Volumen] en el modo 5015 por la reparación del parque completo de rechazados.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque total antes de la reparación ⁽¹⁾	Parque total después de la reparación ⁽²⁾	Reducción de emisiones en el parque total	Reducción anterior
Límites actuales	2012	319.228.924	121.993	27%	12%
	2013	302.454.868	120.914	26%	12%
	2014	285.323.943	119.100	24%	11%
	2015	214.914.766	112.134	28%	13%
	2016	211.575.216	115.880	27%	16%
	2017	189.017.751	123.806	24%	17%
	2018	178.973.783	123.370	22%	16%
	2019	119.934.900	71.415	24%	15%
	2020	106.620.469	75.932	23%	13%
	2021	117.218.217	88.624	22%	13%
	2022	113.300.620	83.371	21%	13%
Límites nuevos (EPA)	2019	119.934.900	65.385	31%	17%
	2020	106.620.469	68.572	30%	15%
	2021	117.218.217	80.873	29%	16%
	2022	113.300.620	75.962	28%	15%

(1): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques “A” + “RR previa reparación” + “RA previa reparación”.

(2): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques “A” + “RR post reparación” + “RA post reparación”.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Tabla 4-21 Reducción de emisiones NO [ppm] en el modo 5015 por la reparación del parque completo de rechazados.

Tipo de límite	Año de revisión	Parque total antes de la reparación ⁽¹⁾	Parque total después de la reparación ⁽²⁾	Reducción de emisiones en el parque total	Reducción anterior
Límites actuales	2012	319.228.924	179.865.104	44%	11%
	2013	302.454.868	193.987.343	36%	9%
	2014	285.323.943	207.314.887	27%	9%
	2015	214.914.766	160.560.746	25%	10%
	2016	211.575.216	163.714.435	23%	12%
	2017	189.017.751	143.532.605	24%	15%
	2018	178.973.783	139.179.969	22%	15%
	2019	119.934.900	76.784.593	36%	19%
	2020	106.620.469	69.353.060	35%	18%
	2021	117.218.217	77.518.822	34%	17%
	2022	113.300.620	72.365.582	36%	19%
Límites nuevos (EPA)	2019	119.934.900	64.192.103	46%	25%
	2020	106.620.469	58.793.238	45%	23%
	2021	117.218.217	66.103.406	44%	22%
	2022	113.300.620	62.587.293	45%	24%

(1): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques “A” + “RR previa reparación” + “RA previa reparación”.

(2): Corresponde al conjunto de vehículos de los parques “A” + “RR post reparación” + “RA post reparación”.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

Se estimaron nuevas tasas de rechazo para el escenario de límites más estrictos. La Tabla 4-22 muestra una comparación en las tasas de rechazo obtenidas con los límites actuales y los del escenario evaluado.

Tabla 4-22 Tasas de rechazo históricas por emisión de gases ASM según categoría vehicular.

Año de registro	Vehículo Liviano Pasajeros			Vehículo Liviano Comercial			Vehículo Mediano		
	N	Límites actuales	Límites nuevos (EPA)	N	Límites actuales	Límites nuevos (EPA)	N	Límites actuales	Límites nuevos (EPA)
2019	781.470	7,4%	14,2%	17.524	10,4%	21,0%	838	19,3%	29,4%
2020	813.641	6,8%	13,6%	17.058	9,3%	19,7%	689	20,8%	26,9%
2021	1.012.276	5,9%	12,1%	22.003	8,4%	17,4%	712	19,2%	28,4%
2022	988.069	5,6%	11,6%	20.883	7,8%	16,3%	642	20,2%	29,8%

Nota 1: Solo incluye vehículos de gasolina o dual con gasolina.

Nota 2: La tasa de rechazo corresponde al rechazo por cualquier gas (HC, CO, NO) y modo (5015, 2525).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

A continuación, la Figura 4-9 muestra las tasas de rechazo de vehículos livianos de pasajeros por antigüedad y año de revisión técnica, tanto para los límites actuales del PPDA como el escenario evaluado con límites más estrictos. En ambos gráficos se observa que a medida que aumenta la antigüedad del vehículo, la tasa de rechazo también incrementa. A partir de los 10 años de antigüedad, la tasa de rechazo comienza a crecer más rápidamente. En ambos escenarios, la tasa de rechazo tiende a ser mayor en 2019 en comparación con los años posteriores.

La Figura 4-10 de manera similar muestra tasas de rechazo en función del año de modelo del vehículo. En el Anexo 2 “Tasas de rechazo ASM” de los Anexos Digitales se encuentran gráficos para las otras categorías vehiculares, incluyendo además el rechazo por normativa euro.

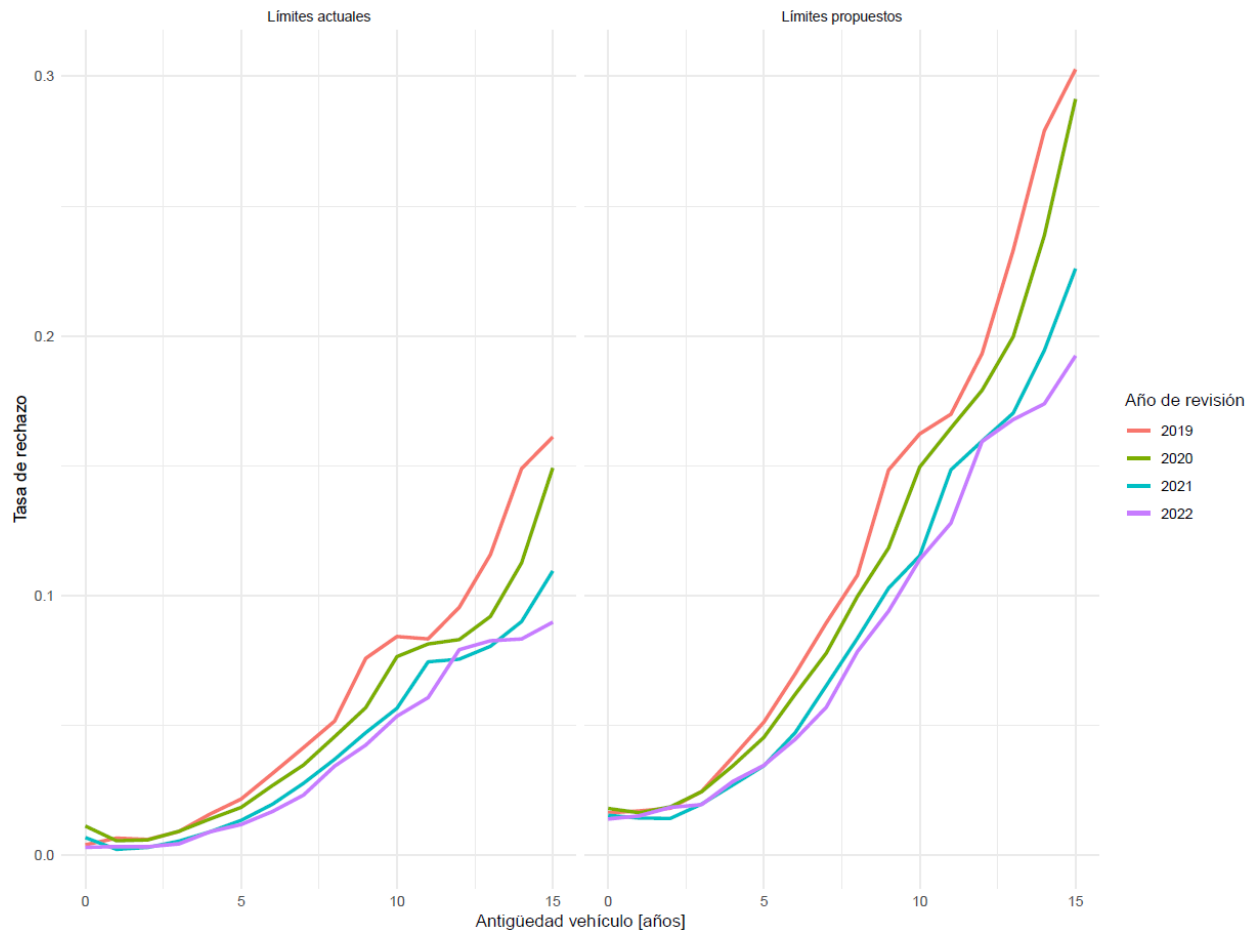


Figura 4-9 Tasa de rechazo de vehículos livianos de pasajeros por antigüedad y año de revisión técnica, para límites actuales y el escenario evaluado.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PRT A2 y B 2012-2022.

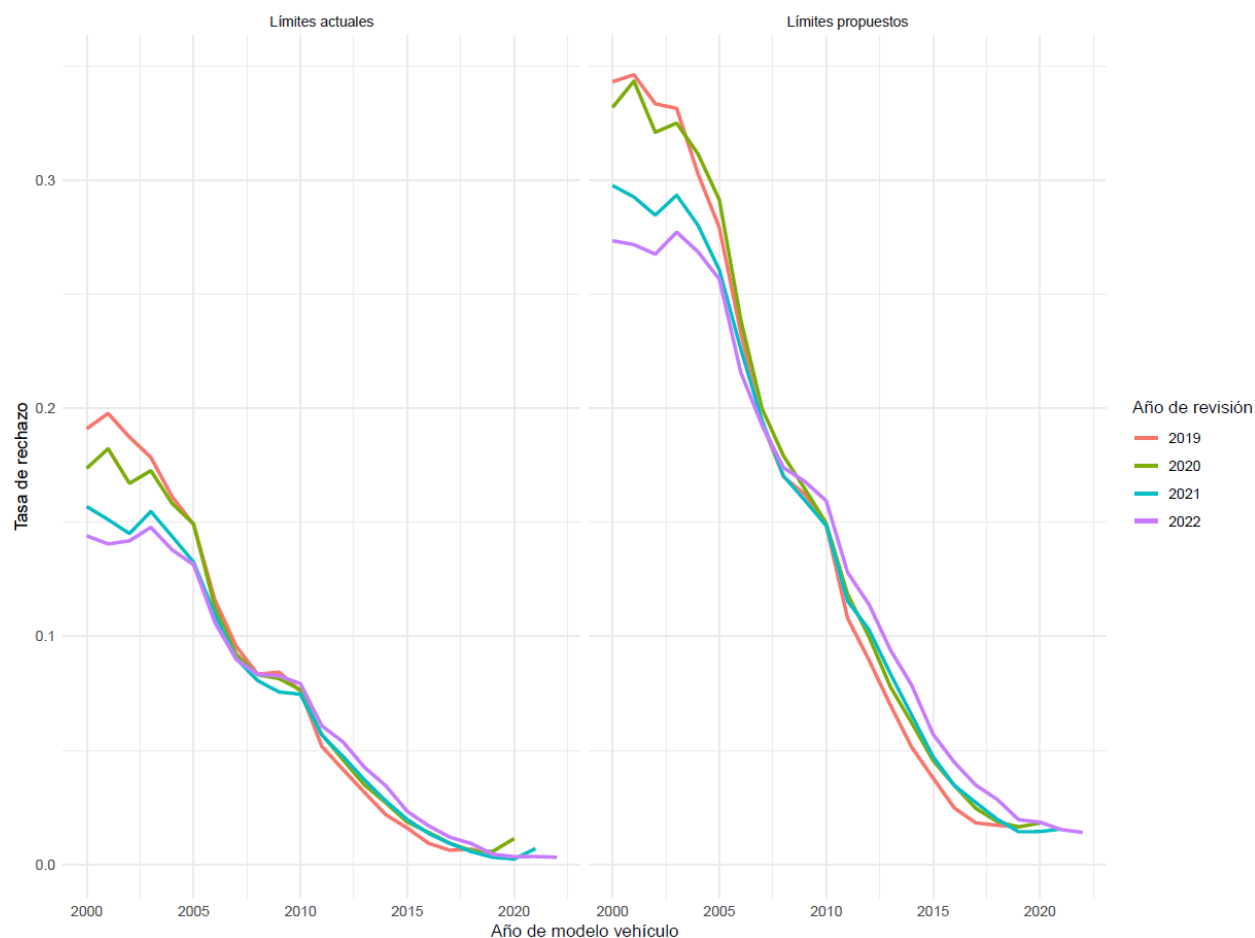


Figura 4-10 Tasa de rechazo de vehículos livianos de pasajeros por año de modelo del vehículo y año de revisión técnica, para límites actuales y el escenario evaluado.

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Artículo 120 – Restricción vehicular permanente en periodo de GEC

El Artículo 120 establece que durante el período de Gestión de Episodios Críticos (GEC) por MP_{10} y $MP_{2,5}$, se dispondrá de restricción vehicular permanente durante el período comprendido entre el 1 de mayo y el 31 de agosto de cada año.

En primer lugar, se hizo una caracterización del parque vehicular a partir de la información de los permisos de circulación registrada por el INE (Instituto Nacional de Estadística), para el periodo 2018-2022 considerando vehículos con antigüedad máxima de 25 años. Lo anterior, implicó dejar fuera del análisis los vehículos >25 años, cuya participación del parque vehicular se muestra en la Tabla 4-23.

Tabla 4-23 Cantidad de vehículos con antigüedad superior a 25 años.

Año del parque vehicular	Cantidad total de vehículos	Cantidad de vehículos ≤ 25 años	Cantidad de vehículos > 25 años	Porcentaje de vehículos > 25 años
2018	5.498.895	5.310.795	188.100	3,42%
2019	5.718.409	5.509.146	209.263	3,66%
2020	5.591.145	5.386.321	204.824	3,66%
2021	6.102.351	5.865.381	236.970	3,88%
2022	6.251.852	5.996.101	255.751	4,09%

Fuente: Elaboración propia a partir de información del INE.

Se graficaron histogramas con la antigüedad del parque vehicular para cada región del país, durante los años 2018, 2020 y 2022, estableciendo un límite superior para el eje x de 25 años. Para simplificar la presentación de los resultados, la Figura 4-11 muestra los histogramas correspondientes a tres regiones a lo largo de Chile: Antofagasta, Metropolitana y Biobío. Se logra apreciar que, en las tres regiones mostradas, la antigüedad de los vehículos para el año 2018 se concentra en el rango entre 0 y 10 años. Durante el 2020 y 2022, en las regiones de Antofagasta y Metropolitana el comportamiento es similar, observando un aumento progresivo en la antigüedad del parque, con el aumento de la cantidad de vehículos en los otros intervalos >10 años. Para la Región del Biobío, durante el año 2022 se aprecia un aumento significativo de vehículos con antigüedad 10-15 años en comparación a los periodos anteriores y a las otras regiones, lo que indicaría que el parque vehicular no se estaría renovando al mismo ritmo que en las otras regiones mostradas. En la Figura 9-1 se presentan los histogramas para todas las regiones de Chile.

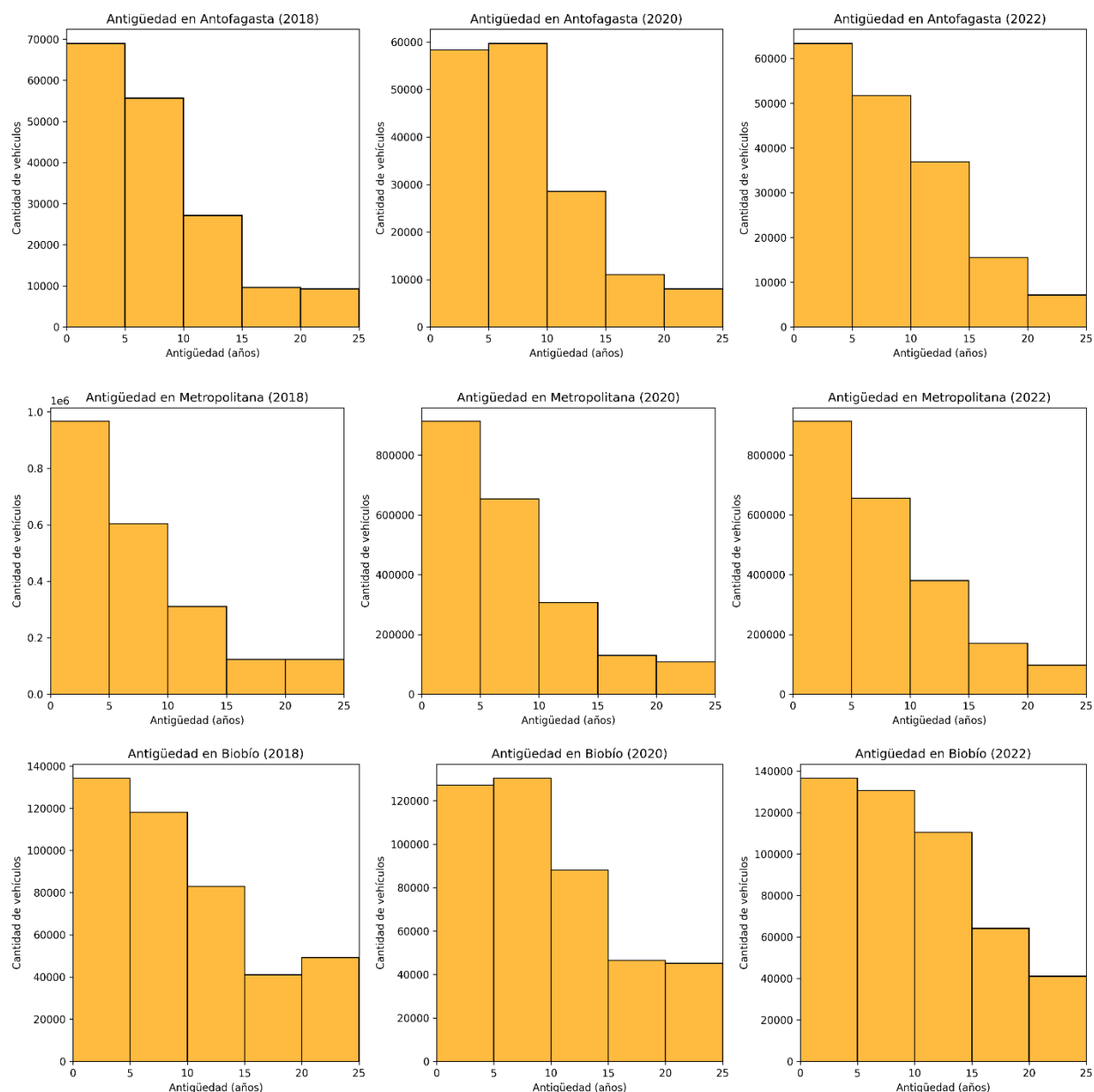


Figura 4-11 Antigüedad del parque vehicular para tres regiones de Chile (2018, 2020, 2022).

Fuente: Elaboración propia a partir de información del INE.

La base de datos del INE no incluye el tipo de tecnología o certificación Euro, por lo que, para analizar la renovación tecnológica a lo largo de los años, fue necesario realizar un cruce entre el tipo de vehículo y año de fabricación para asignar una tecnología, lo que se realizó por medio de la matriz que se presenta en el Anexo 5: Asignación de tecnología al parque vehicular INE. El tipo de vehículo que considera esta matriz se homologó a partir de la categoría vehicular INE, en base a la Tabla 4-24, sin embargo, no todos los vehículos del parque vehicular podían ser asignados

con una tecnología, por lo que la Tabla 4-25 muestra la cantidad de vehículos ≤ 25 años que quedaron sin asignar una certificación Euro.

Tabla 4-24 Homologación de categoría vehicular INE con tipo de vehículo.

Código INE	Categoría vehicular INE	Tipo de vehículo
1	Automóvil particular	Particulares Bencina o Diésel
2	Station Wagon	Particulares Bencina o Diésel
3	Todo Terreno (Tipo Jeep)	Particulares Bencina o Diésel
4	Furgón	Particulares Bencina o Diésel
5	Casas Rodante (con motor)	Particulares Bencina o Diésel
6	Minibus Particular	Particulares Bencina o Diésel
7	Camioneta	Particulares Bencina o Diésel
8	Motos	Motos
9	Otros	NA
10	Casa rodante remolque hasta 1750 kg	Particulares Bencina o Diésel
11	Carro de arrastre hasta 1750 kg	NA
12	Otros	NA
13	Taxi básico	Particulares Bencina o Diésel
14	Taxi colectivo	Particulares Bencina o Diésel
15	Taxi Turismo	Particulares Bencina o Diésel
16	Minibus transporte colectivo	Buses
17	Minibus escolares y/o trabajadores	Particulares Bencina o Diésel
18	Taxibus	Buses
19	Bus transporte colectivo	Buses
20	Bus transporte escolar y/o trabajadores	Buses
21	Otros	NA
22	Camión	Camiones
23	Tractocamión	Camiones
24	Camión especializado	Camiones
25	Otros camiones	Camiones
26	Tractor agrícola	NA
27	Maquinaria automotriz especializada	NA
29	Remolque sobre 1750 kg	NA
30	Semirremolque	NA
31	Otros	NA

NA: No Aplica.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-25 Vehículos ≤ 25 años sin asignación de certificación Euro.

Tipo de motor	Año del parque vehicular				
	2018	2019	2020	2021	2022
Bencinero ⁽¹⁾	281	1.034	1.420	955	1.138
Diesel ⁽¹⁾	7.555	26.294	23.669	23.817	23.598
Eléctrico-Híbrido	635	1.409	1.358	3.542	5.854
Gas-Dual	8.716	9.790	4.624	5.689	5.542
No Motorizado ⁽²⁾	109.293	111.337	104.447	113.319	115.930
Total general	126.480	149.864	135.518	147.322	152.062

(1): Solo maquinaria automotriz especializada y tractor agrícola.

(2): Se compone de las categorías vehiculares de remolque, semirremolque, carro de arrastre y casa rodante remolque.

Fuente: Elaboración propia.

Dado que en los registros del año 2018 los códigos INE para las categorías vehiculares no están desagregados al nivel de los años posteriores⁶, para este análisis se consideraron los datos del periodo 2019-2022. En la Figura 4-12 se muestra la renovación tecnológica del parque vehicular en la región Metropolitana y las otras regiones del país de forma agrupada. Se puede ver que en el transcurso de los años ha aumentado la cantidad de vehículos con certificación Euro VI, a la vez que han disminuido los vehículos Euro I. Además, en la Región Metropolitana se observa una disminución de vehículos Euro IV y Euro V con el paso de los años, mientras que en las otras regiones no se observa esta tendencia. Para mayor detalle, la Figura 4-13 presenta la renovación tecnológica por región.

⁶ Por ejemplo, en el 2018 el código 12 corresponde a “Buses transporte colectivo, Taxibus, escolar y/o trabajadores”, mientras que desde el 2019 en adelante se clasifican en 18 (Taxibus), 19 (Buses transporte colectivo) y 20 (Bus transporte escolar y/o trabajadores).

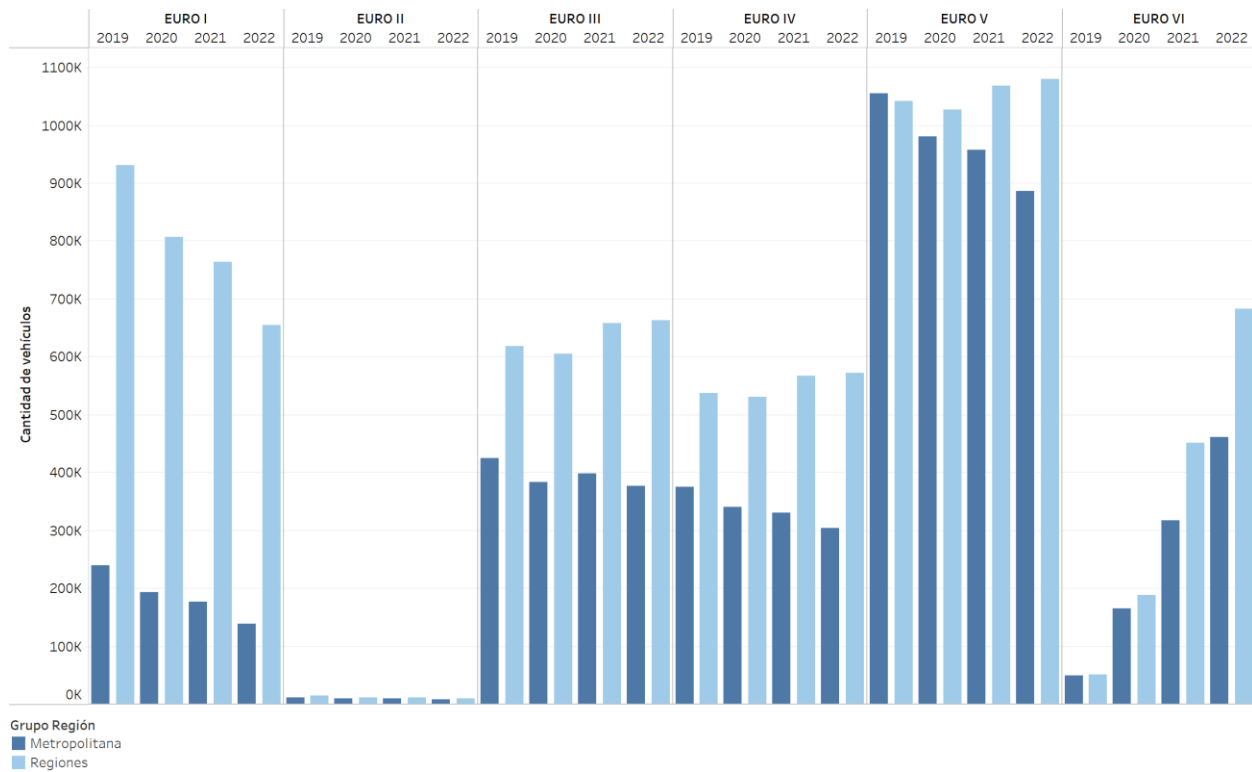


Figura 4-12 Renovación tecnológica en el tiempo, 2019-2022.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del INE.



Figura 4-13 Renovación tecnológica por región, 2019-2022.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del INE.

Las conclusiones anteriores respecto a la renovación tecnológica del parque vehicular se sustentan en el análisis homólogo realizado por SECTRA y presentado en Subcomité Operativo de Transporte (MTT, 2023), en donde se indica que las tasas de crecimiento anual del parque

entre 2013 y 2022 muestran una caída más rápida de los vehículos con sello afecto a la restricción, desde el año 2018.

Adicional al análisis cuantitativo anteriormente presentado, se realizó una revisión bibliográfica de estudios evaluaron la efectividad de la restricción vehicular. Estudios recientes analizan cómo la restricción vehicular ha afectado la composición del parque automotriz en Santiago. La investigación de (Fardella et al., 2023) examinó la reforma de 2017, que estableció una restricción de un día a la semana para todos los autos de 2011 y anteriores, eximiendo a los modelos 2012 en adelante. Este cambio creó un fuerte incentivo para la renovación de vehículos, especialmente en los sectores de ingresos bajos y medios, donde las familias tienden a poseer un solo automóvil. Los hallazgos muestran que, tras la implementación de esta política, hubo una salida significativa de autos antiguos del parque vehicular de Santiago. Sin embargo, a diferencia de lo que se temía, no se observó un aumento notable de la contaminación en las áreas periféricas debido a la reubicación de estos vehículos. Esto se debe, en parte, a los costos de transacción en el mercado de autos usados, que limitaron la migración masiva de autos antiguos hacia comunas cercanas.

En la misma línea, el informe de (Montero et al., 2018) evaluó el impacto de la restricción vehicular en la reducción de emisiones contaminantes en Santiago. Los resultados estimados muestran que:

- La renovación del parque vehicular se aceleró, con un aumento en la proporción de vehículos menos contaminantes en circulación.
- Se redujeron las emisiones locales de CO, HC y NOx en un 9% en los meses de primavera y verano, y hasta un 35% en los meses de otoño e invierno.
- El uso del transporte público aumentó en aproximadamente 6 puntos porcentuales.
- Se logró una mejora del 14% en tiempos de viaje en auto y un 3% en buses.

De esta forma, de los estudios revisados se evidencia que la restricción vehicular en Santiago ha tenido un impacto positivo en la modernización del parque automotriz y la reducción de emisiones contaminantes. Sin embargo, su aplicación ha generado desigualdades en términos de carga económica para distintos grupos de ingresos. Las medidas complementarias, como la inversión en transporte público y subsidios para la adquisición de vehículos menos contaminantes, serán clave para maximizar la efectividad de esta política en el futuro.

4.2.3.1 Zona de Baja Emisión de Londres

Se hizo una búsqueda bibliográfica del caso de la Zona de Baja Emisión de Londres (ZBE). La ZBE es una política destinada a reducir la contaminación del aire y mejorar la salud pública en Londres. La ley entró en vigencia el 4 de febrero de 2008 y ha sido actualizada para hacerla más estricta, considerando grandes furgonetas, autobuses, camiones y camiones, que tienen que cumplir estrictos estándares de emisiones para circular por la zona sin incurrir en ningún coste adicional. LEZ cubre todo Londres, incluidas autopistas y carreteras principales, y complementa la ULEZ, una zona de emisiones ultra bajas, con controles de emisiones más estrictos en la zona central y para vehículos más ligeros como turismos y motocicletas.

Los estándares para los vehículos pesados, quienes son afectados por LEZ, son:

- Euro 3 para autobuses y camiones desde 2008 (inicialmente).
- Desde **2021**, se incrementaron los estándares a **Euro 6 o superior**, alineándose con los niveles más recientes de control de emisiones en Europa.

El sistema de la LEZ se controla mediante un sistema de **cámaras automáticas (ANPR)** que leen las matrículas de los vehículos para verificar su conformidad. Para circular por esta zona con vehículos inferiores a Euro VI la tarifa es de 300 libras al día. Para evitar sanciones que pueden alcanzar hasta 1.000 libras, es necesario registrar previamente los vehículos Euro VI, que están exentos de pago, o pagar la tasa diaria correspondiente si el vehículo es Euro V o inferior.

Los resultados han sido

- Concentraciones de NO₂: Reducción significativa de emisiones contaminantes: Desde la implementación de la LEZ, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) han disminuido un 23% en toda la ciudad, y hasta un 27% en áreas monitoreadas más cercanas al tráfico pesado. (World Economic Forum, 2023).
- Monitoreo de Calidad del Aire: El número de estaciones que exceden los límites legales de contaminación ha caído drásticamente, pasando de 56 en 2016 a solo cinco en 2023. (Utopia Urbana, 2024).

4.3 Evaluación de las medidas de los artículos de las medidas de los artículos 8, 9 y 120 del PPDA RMS

Se desarrolló un modelo en el *software* Analytica en donde se estimaron las emisiones generadas por el transporte en ruta en la Región Metropolitana durante el periodo 2018-2022. Dichas emisiones incluyen los efectos de reducción de emisiones atribuibles a las medidas establecidas en los artículos 8, 9 y 120 del PPDA RMS. Adicionalmente, el modelo permitió también proyectar las emisiones de transporte en ruta y maquinaria móvil fuera de ruta al 2037, tal como se detalla en la Sección 4.4. La descripción de este modelo se detalla en la Sección 9.8.

Analytica es un *software* de modelación visual creado por Lumina⁷, que permite la creación, análisis y comunicación de modelos de decisión. Utiliza diagramas de influencia, que permiten crear modelos de manera intuitiva, admite el manejo de información de manera multidimensional. La Figura 4-14 muestra un esquema de la proyección del parque base y la estimación de emisiones asociadas.

⁷ <http://www.lumina.com/why-analytica>

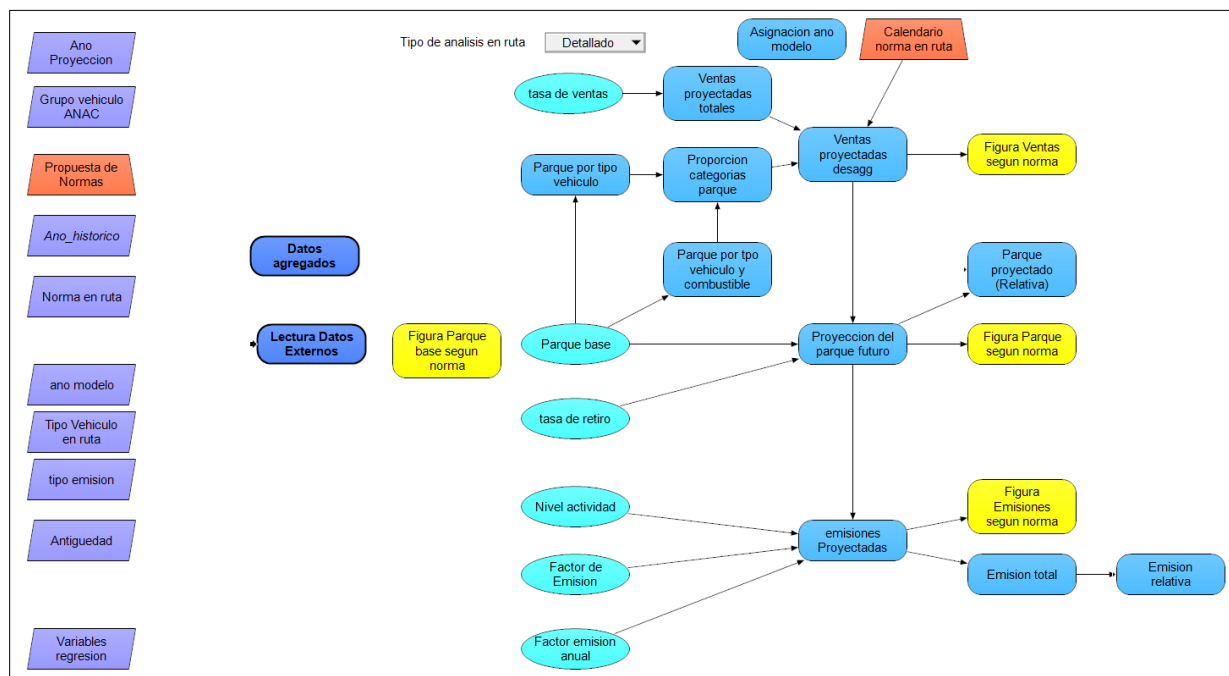


Figura 4-14 Esquema y diagrama de flujo del modelo de Analytica realizado para estimación de emisiones asociadas al parque vehicular

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la efectividad de las medidas en términos de reducción de emisiones reales, de acuerdo con el análisis realizado del Artículo 8 en la Sección 4.2.1, no se evidencia una reducción significativa de emisiones atribuible a la medida de Zona de baja emisión, lo que sugiere que este articulado podría ser modificado en el proceso de actualización del PPDA. Este resultado concuerda con lo expuesto en la Sección 3.2.3.1 que indica que falta información respecto a la efectividad de esta medida.

Por otro lado, respecto al Artículo 9 la reducción de emisiones está asociada a las reparaciones realizadas en los vehículos cuya revisión técnica fue rechazada por incumplimiento de los límites ASM. En la Tabla 4-26 se presentan los porcentajes promedio de reducción de emisiones, cuyo detalle se presenta por modo y contaminante en la Sección 4.2.2.5. Al aplicar dichos porcentajes a las emisiones históricas 2018-2022, es posible obtener una estimación de la reducción de emisiones lograda por la implementación de la medida, presentadas en la Tabla 4-27.

Tabla 4-26 Reducción porcentual de emisiones por contaminante [%]

Contaminante	Reducción porcentual
HC	9,3%
CO	13,1%
NOx	18,3%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-27 Reducción de emisiones por contaminante [ton/año]

Contaminante	2019	2020	2021	2022
HC	276	186	243	162
CO	5.730	3.998	4.999	3.464
NOx	592	395	519	347

Fuente: Elaboración propia

Por último, el Artículo 120 – Restricción vehicular permanente en periodo de Gestión de Episodios Críticos (GEC), cuyo análisis se presenta en la Sección 4.2.3, ha demostrado ser efectiva en la reducción de emisiones contaminantes, particularmente durante los meses más críticos para la calidad del aire. Según el estudio (Montero et al., 2018), la medida permitió disminuir las emisiones de CO, HC y NOx en un 9% durante la primavera y el verano, y hasta un 35% en otoño e invierno, evidenciando su impacto positivo en la mitigación de la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana.

4.4 Proyección del inventario de transporte en ruta, a 15 años, y de inventario de MMFR, a 16 años

Se realizó una proyección del inventario de emisiones transporte en ruta, año base 2022, a 15 años, y del inventario de maquinaria móvil fuera de ruta (MMFR), año base 2021, a 16 años. A modo general, la proyección de emisiones se realizó en un escenario “*business as usual*”, que no considera la implementación de compensaciones o mejoras adicionales a aquellas que puedan estar ya comprometidas. Las secciones siguientes explican el detalle de la metodología usada en cada caso y los datos asociados.

4.4.1 Proyección de emisiones de transporte en ruta

La estimación de emisiones de transporte en ruta se realiza mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 6 Estimación de emisiones de transporte en ruta

$$E_{i,j,k} = \sum_{i,j,k} (NA_i * FE_{NA_{i,j,k}} + FE_{Veh_{i,j,k}}) * P_{i,j,k}$$

Donde:

- E: Emisiones según tipo de vehículo i, combustible j y tecnología k (k = Euro I, Euro II, etc.)
- NA: Nivel de actividad, en kilómetros por año, según tipo de vehículo i.

- P: Parque vehicular, en cantidad de vehículos, según el tipo de vehículo i, combustible j y tecnología k.
- FE_NA: Factor de emisión de escape del motor, para el tipo de vehículo i, de combustible j y tecnología k.
- FE_Veh: Factor de emisión de escape del motor, para el tipo de vehículo i, de combustible j y tecnología k.

De esta forma, para proyectar las emisiones generadas por transporte en ruta se utilizan los siguientes parámetros:

- Proyección parque vehicular:
 - Parque vehicular base a partir de las PRT y permisos de circulación del INE.
 - Tasa de retiro por tipo de vehículo.
 - Ingreso de vehículos nuevos al parque según las ventas por tipo de vehículo.
- Kilómetros recorridos promedio al año por tipo de vehículo constante.
- Factores de emisión constantes.

En las siguientes subsecciones se detalla la metodología seguida para proyectar las emisiones a 15 años.

4.4.1.1 Parque vehicular base

Para obtener el parque vehicular de la región Metropolitana caracterizado por su composición tecnológica, se utiliza información de las Plantas de Revisión Técnica (PRT) y se complementa con los permisos de circulación del INE entre 2018 y 2022, tal como se realiza en los estudios anuales de estimación de emisiones de fuentes difusas para la generación de los Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes del RETC desarrollados por el equipo consultor a partir de 2018. Se utilizan ambas fuentes de información ya que, si bien la base de datos de las PRT tiene la ventaja de entregar más información respecto de los vehículos que la obtenida del INE, tiene la desventaja de no contar con la información de los vehículos más nuevos que no deben ingresar a las PRT. Por otra parte, los vehículos más nuevos sí se encuentran registrados en la base de datos del INE ya que todos deben obtener su permiso de circulación.

Tanto para los datos de las PRT como los de permisos de circulación del INE se les asigna la norma de emisión de acuerdo al año de fabricación registrado por tipo de vehículo, mediante la matriz presentada en el Anexo 5 (ver Sección 9.5). En la Figura 4-15 se presenta el parque de vehicular en circulación en la región Metropolitana, para los años comprendidos entre 2018 y 2022, por tipo de vehículo, en donde se puede observar una destacada presencia de vehículos livianos.

De forma complementaria, la Figura 4-16 muestra la distribución del parque vehicular de la RM según norma de emisión para el periodo 2018-2022. Como es de esperar, es posible observar un aumento en el tiempo de la presencia de vehículos Euro VI y una disminución de las otras

tecnologías, debido principalmente a la entrada de vehículos nuevos que cumplen con normativas más exigentes.

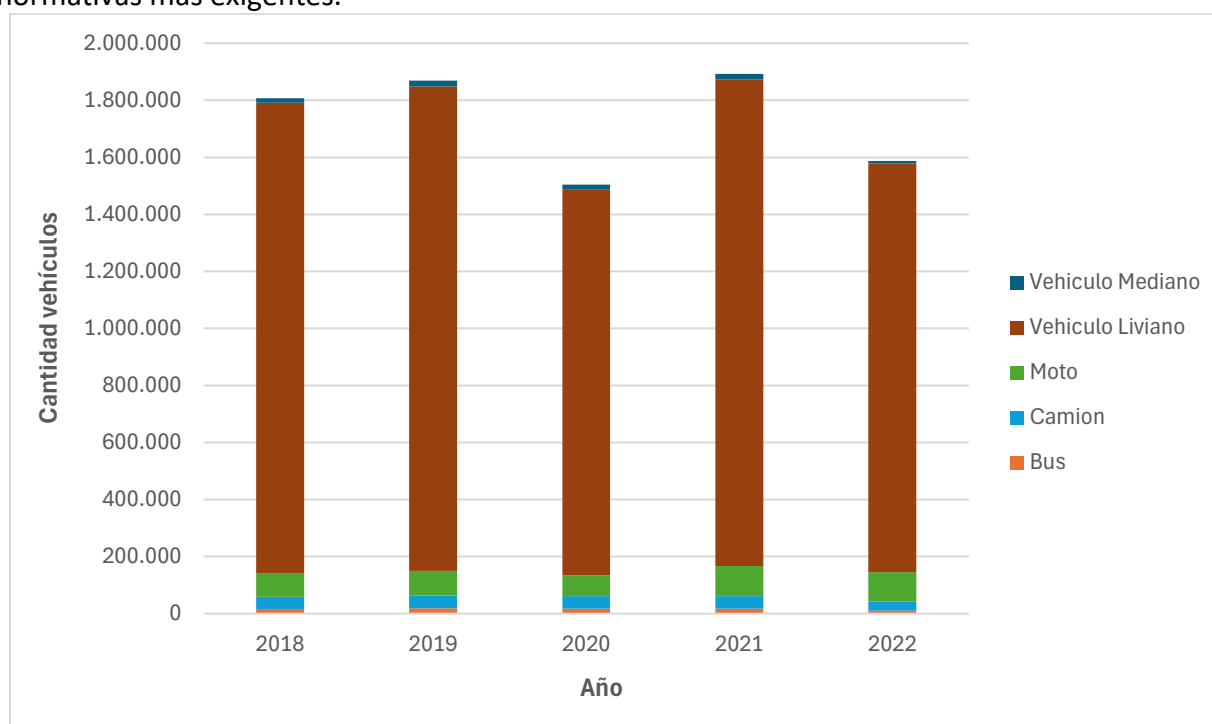


Figura 4-15 Parque vehicular de la región Metropolitana por tipo de vehículo, 2018-2022

Fuente: Elaboración propia

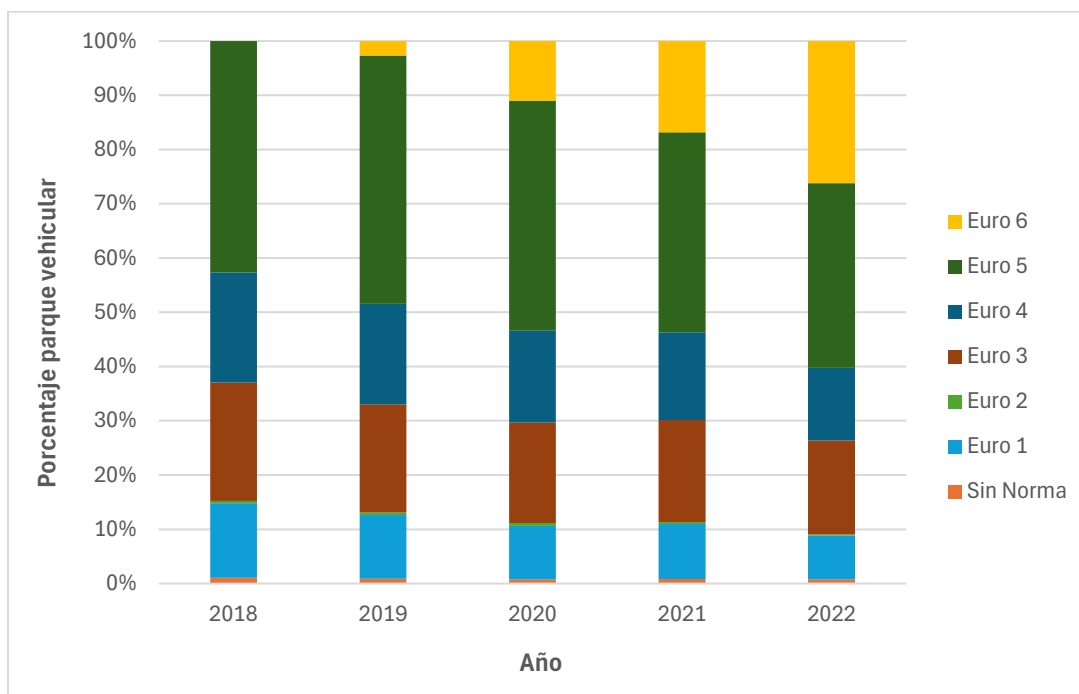


Figura 4-16 Distribución del parque vehicular según norma de emisión, 2018-2022

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.2 Tasa de retiro de vehículos

La tasa de retiro de vehículos en la Región Metropolitana se calculó en base a la evolución del parque vehicular informado por el INE entre los años 2013 a 2022. A continuación, se explica paso a paso la metodología utilizada, la cual se implementó a través de un código en el programa R.

Primero, se seleccionaron los vehículos con una antigüedad de hasta 30 años. Luego, se agrupan estos datos por el año del parque, el tipo de vehículo y el año del modelo del vehículo.

La Figura 4-17 muestra la cantidad de vehículos para cada año entre 2013 y 2022, desagregando los distintos tipos de vehículo y para tres años de modelo: 1990, 2000 y 2010. Se observa la disminución en el número de vehículos a lo largo de los años, para los tres años de modelo, siendo esta reducción más pronunciada para los modelos nuevos, que presentan mayor cantidad de vehículos.

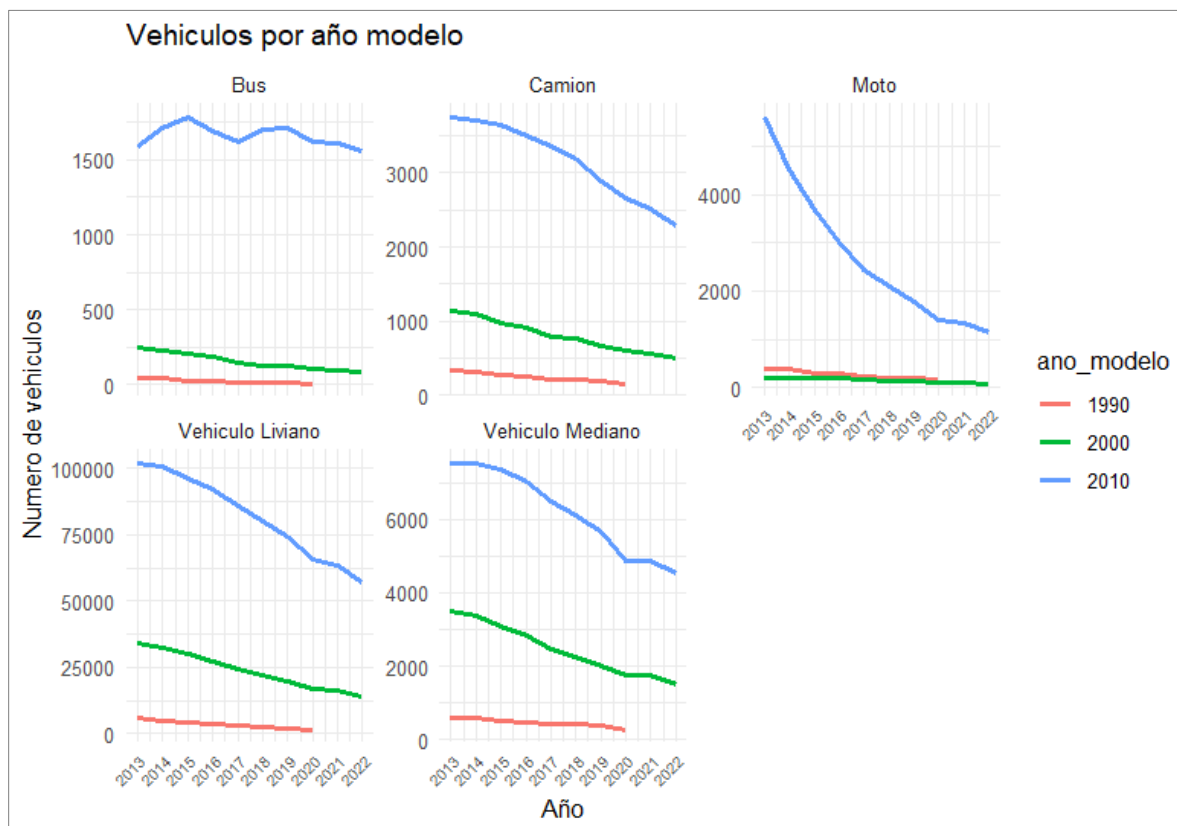


Figura 4-17 Evolución de la cantidad de vehículos

Fuente: Elaboración propia en base a permisos de circulación INE

La tasa de retiro, que mide cómo cambia la cantidad de vehículos de un año a otro se calculó para cada tipo de vehículo y año de modelo comparando la cantidad de vehículos en un año con la cantidad en el año anterior, y con esta información, se calcula qué porcentaje de vehículos se deja de estar en circulación (ver Ecuación 7).

Ecuación 7 Tasa de retiro anual de vehículos

$$Tasa_{i,j,t} = 1 - \frac{Vehiculo_{i,j,t}}{Vehiculo_{i,j,(t-1)}}$$

Donde:

- $Tasa_{i,t}$: Tasa de retiro según el tipo de vehículo i, antigüedad j en el tiempo t.
- $Vehiculo_{i,j,t}$: Numero de vehículos según el tipo de vehículo i, antigüedad j en el tiempo t.

Finalmente se estimó una regresión lineal que permite asociar la tasa de retiro con la antigüedad del vehículo, la cual está definida como la diferencia entre el año del parque y el año del modelo del vehículo. La siguiente tabla muestra un resumen del ajuste de los modelos y sus coeficientes.

Tabla 4-28 Resultados de modelos lineales de las tasas de retiro en función de la antigüedad del vehículo, por tipo de vehículo.

Tipo vehículo	var_reg	Coeficiente	t-value	R2
Vehículo Liviano	intercepto	0,023	5,57	0,59
	antigüedad	0,004	19,56	
Vehículo Mediano	intercepto	0,052	9,91	0,22
	antigüedad	0,002	8,33	
Bus	intercepto	0,009	0,53	0,28
	antigüedad	0,009	9,06	
Camión	intercepto	0,049	11,82	0,21
	antigüedad	0,002	8,31	
Moto	intercepto	0,157	20,19	0,06
	antigüedad	-0,002	-3,91	

Fuente: Elaboración propia

Los modelos tienen diferentes niveles de ajuste (R^2), con Vehículos Livianos mostrando el mejor ajuste (59%) y Motos el peor (6%). En todos los casos, se observa que la antigüedad tiene un impacto positivo sobre la tasa de retiro de los vehículos livianos, medianos, buses y camiones. Esto indica que los vehículos más antiguos se retiran a una mayor tasa que los vehículos más nuevos, lo cual es esperable. Solo en las motos el efecto es negativo.

Estos modelos permiten estimar las tasas de retiro y así proyectar el parque vehicular considerando que los vehículos más antiguos dejan de circular.

4.4.1.3 Ventas de vehículos

El ingreso de vehículos nuevos al parque se determinó usando las ventas anuales de cada tipo de vehículo. A partir de los datos históricos se estimó una tendencia lineal de crecimiento que permite proyectar las ventas a futuro y así proyectar el parque de vehículos.

La Figura 4-18 muestra la evolución proyectada de las ventas de vehículos livianos en la Región Metropolitana. La tendencia muestra un crecimiento estable durante los primeros años, seguido de una ligera caída en los años recientes. El ajuste del modelo lineal indica un R^2 de 0,24, lo cual es bajo.

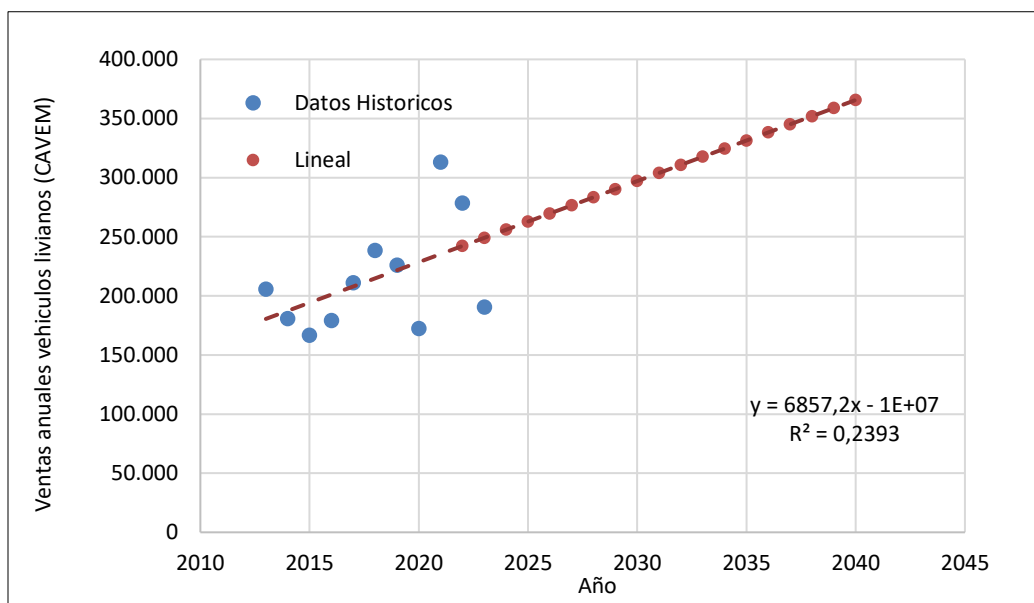


Figura 4-18 Ventas anuales de vehículos livianos en la Región Metropolitana, datos históricos y proyección.

Fuente: Elaboración propia en base a información de CAVEM.

En el caso de los vehículos medianos, presentada en la Figura 4-19, la tendencia es al alza en los primeros años seguida de una estabilización y pequeña disminución en años posteriores. El ajuste de modelo indica un R2 similar al de vehículos livianos, del 24%.

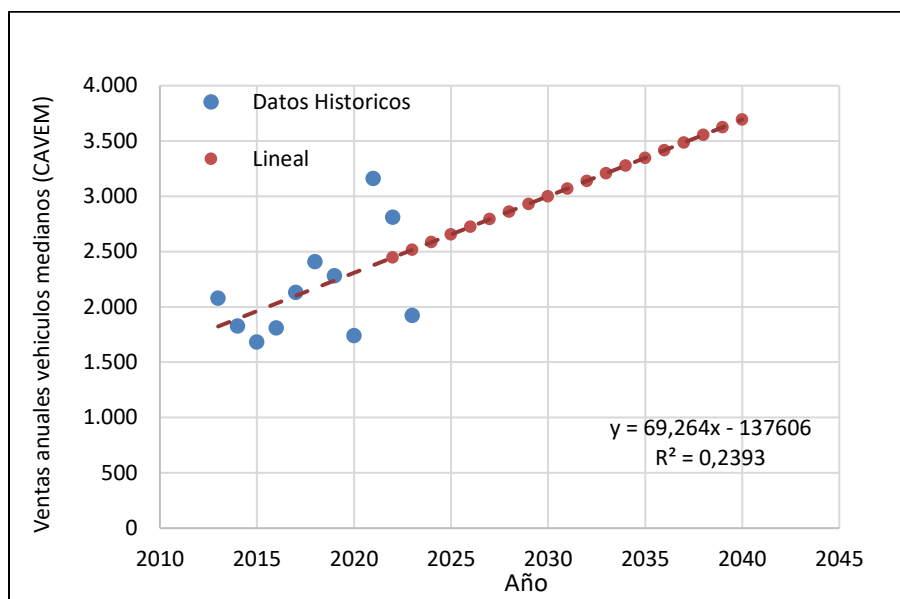


Figura 4-19 Ventas anuales de vehículos medianos en la Región Metropolitana, datos históricos y proyección.

Fuente: Elaboración propia en base a información de CAVEM.

Las ventas de camiones presentan un comportamiento distinto al de vehículos livianos y medianos, con una tendencia decreciente y puntos altos de venta en ciertos años.

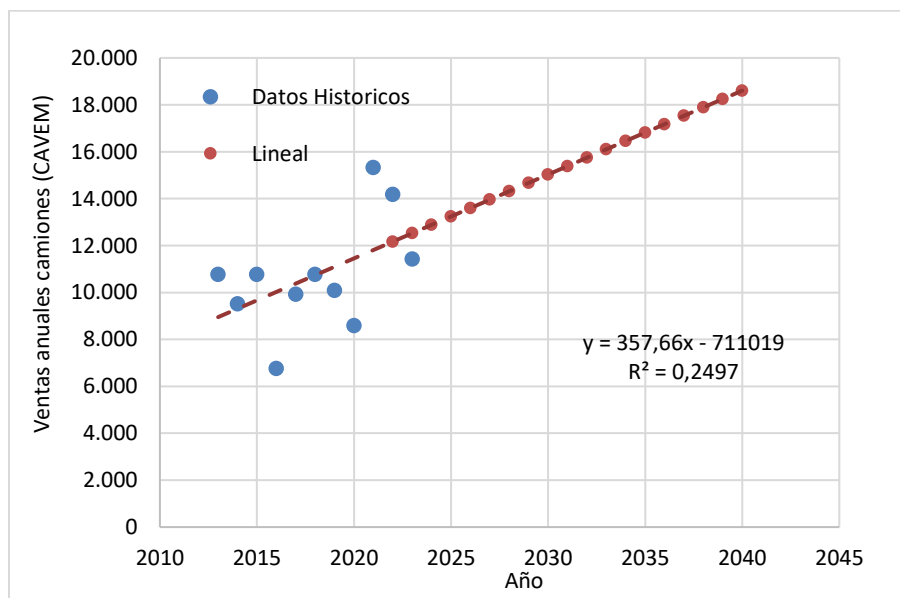


Figura 4-20 Ventas anuales de camiones en la RM, datos históricos y proyección.

Fuente: Elaboración propia en base a información de CAVEM.

En el caso de los buses, en la Figura 4-21 se observa una proyección de ventas de buses con un patrón similar a los anteriores, aunque con una caída más pronunciada en los últimos años. Esto puede reflejar una menor demanda de transporte público o el impacto de políticas gubernamentales relacionadas con la sostenibilidad.

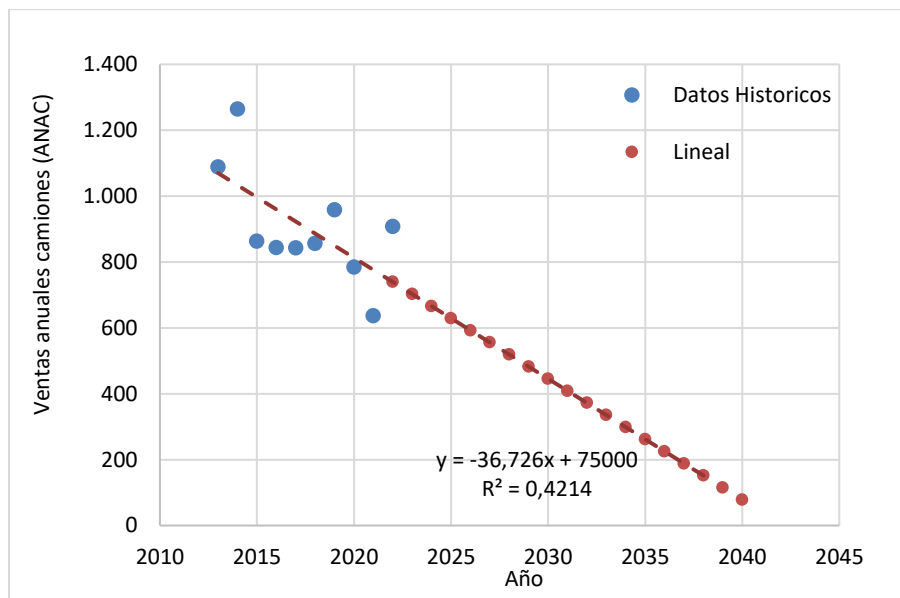


Figura 4-21 Ventas anuales de buses en la Región Metropolitana, datos históricos y proyección.

Fuente: Elaboración propia en base a información de CAVEM.

Finalmente, tal como se observa en la Figura 4-22, la proyección de ventas de motos muestra un aumento significativo en los primeros años, seguido de un período estable hasta aumentar en el último año.

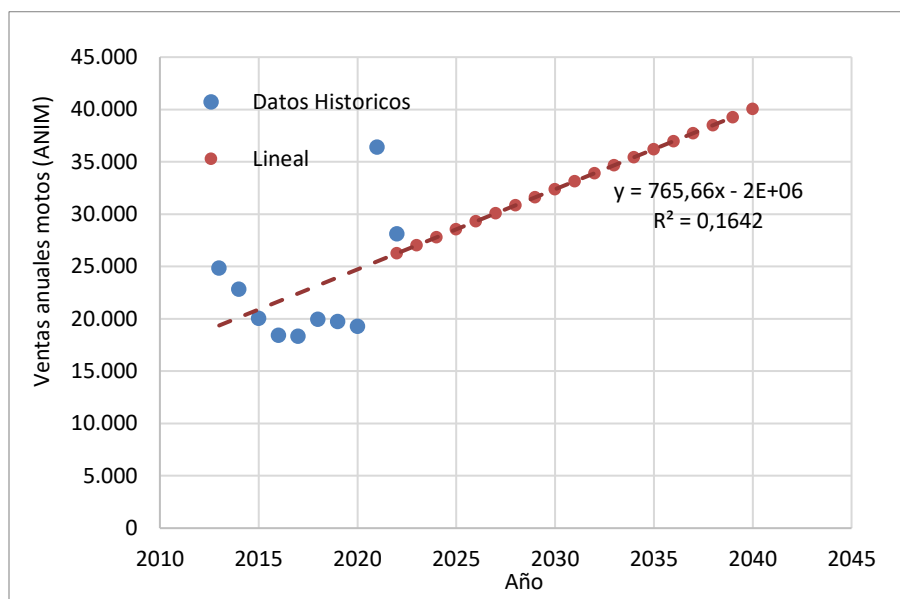


Figura 4-22 Ventas anuales de motos en la Región Metropolitana, datos históricos y proyección.

Fuente: Elaboración propia en base a información de ANIM.

4.4.1.4 Distancia recorrida

Para proyectar el nivel de actividad se requiere contar con la distancia recorrida promedio en un año por tipo de vehículo. Para ello, se utilizaron los parámetros recomendados en el manual de inventarios (MMA, 2017), presentados en la Tabla 4-29. Estos valores se mantienen constantes para la proyección de emisiones.

Tabla 4-29 Distancia promedio recorrida anualmente por tipo de vehículo

Tipo Vehículo	Kilómetros recorridos anuales (km/veh)
Bus	69.848
Camión Liviano	22.372
Camión Mediano	39.180
Camión Pesado	48.700
Motos	9.630
Comerciales	23.150
Particulares	14.799
Taxi Colectivo	44.240
Alquiler	34.8232

Fuente: (MMA, 2017)

4.4.1.5 Factores de emisión

Se utilizaron los factores de emisión cargados en la nueva versión de MODEM. Estos factores de emisión provienen de la guía europea *'The EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook'* (EMEP/EEA, 2019) en su versión del año 2019. Esta guía a su vez utiliza como base el software COPERT (v5.2) para la estimación de los factores de emisión que presentan. Los contaminantes incluidos por defecto en el programa son: Partículas Totales Suspendidas (PTS), Material Particulado inferior a 10 micrones (PM 10), Material Particulado inferior a 2.5 micrones (PM 2.5), Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxido Nitroso (N_2O), Amoníaco (NH_3), Dióxido de Azufre (SO_2), Monóxido de Carbono (CO), Mercurio (Hg) y Dioxinas (DLCs).

Cabe destacar que para la proyección de emisiones en el escenario base se decide mantener constantes los factores de emisión.

4.4.1.6 Proyección emisiones transporte en ruta

A partir de la metodología descrita en las subsecciones precedentes se proyecta el parque vehicular de la región Metropolitana al año 2038, el cual se muestra en la Figura 4-23 desagregado por norma de emisión. Se observa que los vehículos con norma Euro 6 aumentan en el tiempo, explicado por la entrada de nuevos vehículos al parque que cumplen con la normativa de emisión actualmente exigida⁸.

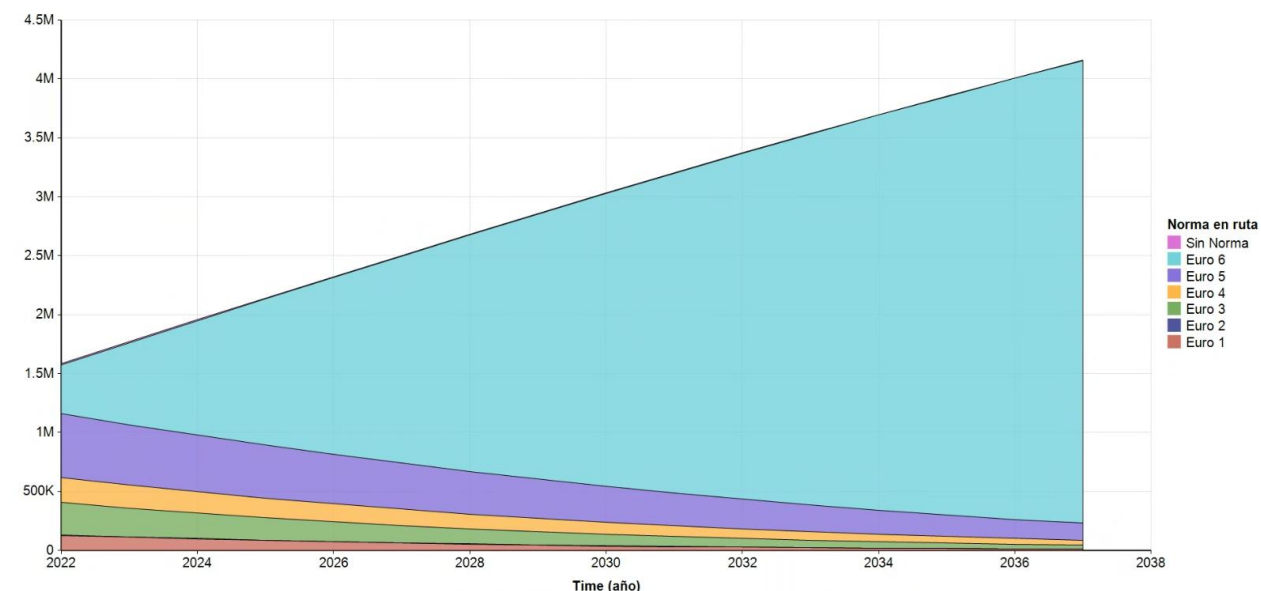


Figura 4-23 Proyección del parque vehicular de la RM por norma de emisión, 2022-2038

Fuente: Elaboración propia

⁸ En el caso de motos la norma de emisión exigida es Euro 3.

La proyección del parque vehicular en conjunto con la distancia promedio recorrida por tipo de vehículo (ver Sección 4.4.1.4) y los factores de emisión (ver Sección 4.4.1.5), se estimaron las emisiones generadas para el periodo 2022-2038. En la Figura 4-24, Figura 4-25 y Figura 4-26 se muestra la proyección de emisiones de NO_x, HC y CO, respectivamente, desagregadas por norma de emisión. Se puede observar que las emisiones totales de NO_x disminuyen en el tiempo debido a la renovación del parque vehicular a tecnologías más limpias. Por otro lado, a pesar de la renovación tecnológica, las emisiones de HC y CO han tendido a aumentar con el tiempo. Esto podría atribuirse al crecimiento del parque vehicular en la Región Metropolitana, el cual ha contrarrestado los beneficios de las tecnologías más limpias, impidiendo una reducción total de las emisiones.

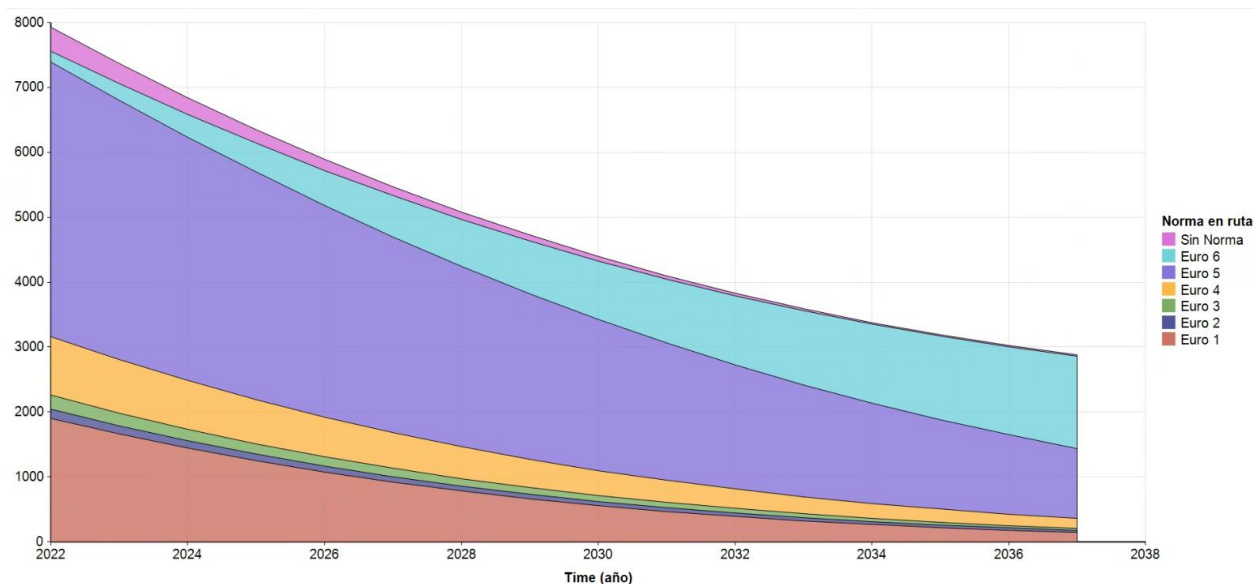


Figura 4-24 Emisiones de NO_x de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2038 [ton/año]

Fuente: Elaboración propia

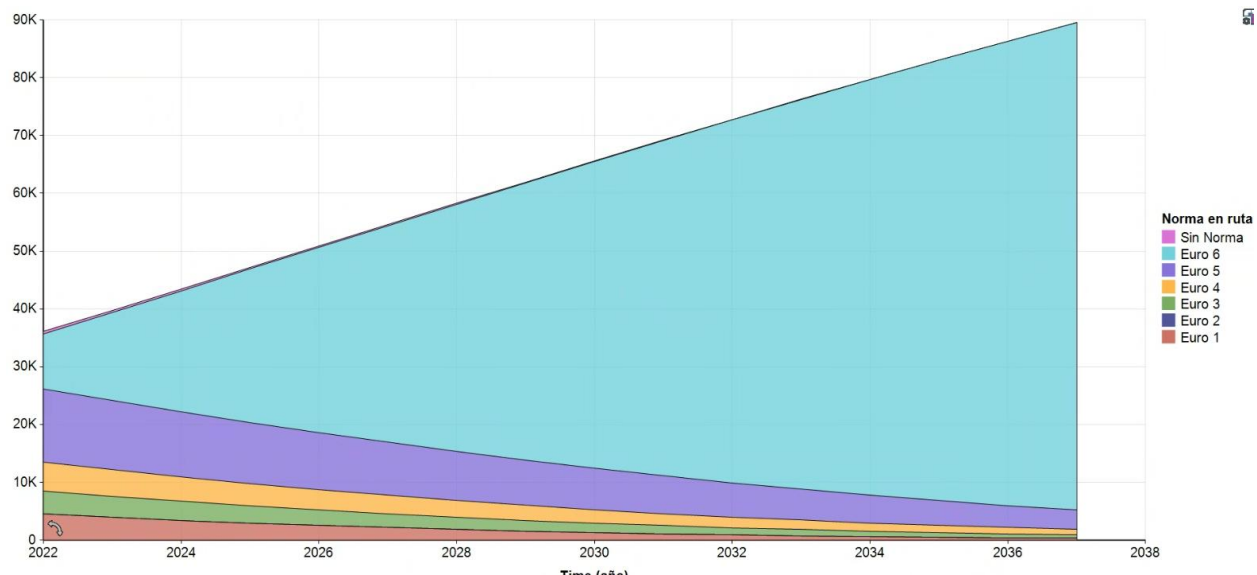


Figura 4-25 Emisiones de HC de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2038
[ton/año]

Fuente: Elaboración propia

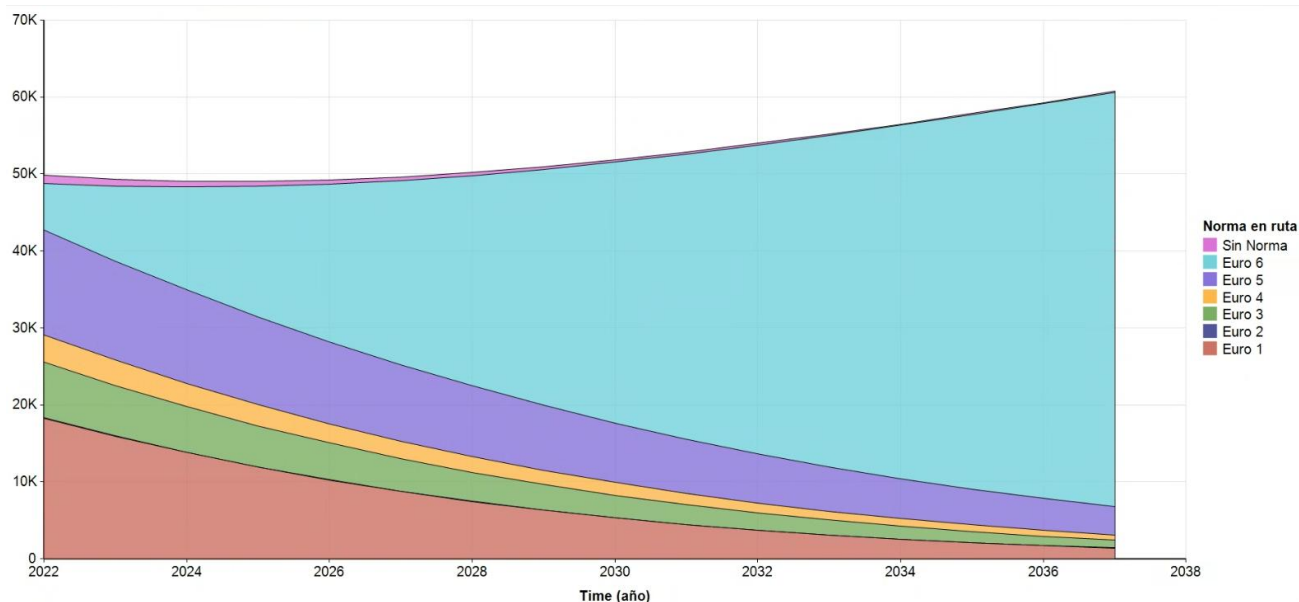


Figura 4-26 Emisiones de CO de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2038
[ton/año]

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Proyección de emisiones de MMFR

La proyección de emisiones se realizó por un periodo de 16 años a partir del año base del inventario, es decir, para el periodo 2021-2037, a partir del insumo de PARTÍCULAS (2022),

incluyendo las modificaciones realizadas por la contraparte⁹. Adicionalmente, se tomó como referencia la herramienta HEMAQ, elaborada por (CALAC+, 2021b). La proyección se realizó para el escenario *business as usual*, considerando la aplicación efectiva del Decreto 39 del Ministerio del Medio Ambiente.

De manera general, se utiliza la siguiente fórmula para calcular las emisiones anuales para cada contaminante:

Ecuación 8 Cálculo de emisiones de MMFR

$$\sum E_i = n_i * NA_i * (P_i * FC_i) * (FE_i * FAT_i) * FD_i * (1 - FR_i)$$

Donde

- i : grupo de máquinas con los mismos atributos técnicos.
- n_i : unidades de maquinaria del grupo i (-).
- E_i : emisiones del grupo i (g/año).
- NA_i : nivel de actividad del grupo i (hr/año).
- P_i : potencia promedio del grupo i (kW).
- FC_i : factor de carga del grupo i (-).
- FE_i : factor de emisión del grupo i (g/kW-hr).
- FAT_i : Factor de ajuste transitorio (ad) del grupo i .
- FD_i : factor de deterioro del grupo i (-).
- FR_i : factor de retiro del grupo i (-).

Se agruparon las máquinas con los mismos atributos técnicos, para luego asignar los parámetros correspondientes y realizar el cálculo de la proyección. Estos atributos técnicos corresponden a:

- Tipo de maquina (p. ej. grúa horquilla, asphaltadora, retroexcavadora).
- Rango de potencia.
- Estándar de emisión.
- Año de fabricación.

El cálculo se realizó mediante un modelo en el programa Analytica.

4.4.2.1 Parque base

La información para el parque base fue extraída del Inventario de emisiones de maquinaria móvil fuera de ruta para el año base 2021, elaborado por (PARTICULAS, 2022), y revisado por la contraparte. Este archivo incluye información sobre importaciones nacionales recopilada a partir de datos aduaneros correspondientes a los años 2010 a 2021.

Durante el análisis, se identificó una distribución inconsistente en la asignación de potencia para ciertas maquinarias que carecían de esta información, mostrando valores que excedían los

⁹ Corrección de la potencia asignada a la maquinaria e inclusión del factor de retiro para el cálculo de las emisiones.

rangos normales esperados según el estudio de Geasur (2014). En respuesta, la contraparte realizó ajustes para corregir las potencias fuera de los rangos esperados. La base de datos corregida resultante se utilizó para definir el parque de maquinaria móvil proyectado, tomando como referencia el año base 2021.

En la Tabla 1 se muestra la distribución porcentual del parque de MMFR según los rubros agrícola, construcción, industrial y minería. Se distingue entre la participación a nivel nacional y la correspondiente a la Región Metropolitana (RM), la cual se utiliza para determinar el parque correspondiente a dicha región.

Tabla 4-30 Participación nacional y de la RM por rubro

Rubro	Participación nacional	Participación RM
AGRICOLA	45%	4%
CONSTRUCCION	34%	40%
INDUSTRIAL	17%	47%
MINERIA	4%	6%
TOTAL	100%	97%

Fuente: Inventario de PARTICULAS (2022) y CALAC (2021)

La participación nacional según los rubros fue calculada en base al inventario de PARTICULAS, mientras que la participación de la RM es extraída del informe de (CALAC+, 2021a). Debido a que el inventario obtenido de (PARTICULAS, 2022) está construido como una suma de las importaciones de los años considerados, se procede a calcular una tasa de retiro con la metodología especificada en la Sección 4.4.2.3, asumiendo una edad de 6 años para todas las máquinas. De esta manera, se obtiene el siguiente parque para la RM.

Tabla 4-31 Maquinas retiradas del parque de MMFR

Rubro	Parque sin retiro	Máquinas retiradas	Parque con retiro
AGRICOLA-FORESTAL	2.725	1.037	1.688
CONSTRUCCION	22.480	10.086	12.394
INDUSTRIA	13.576	8.596	4.980
MINERIA	348	97	250
Total	39.129	19.817	19.313

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se aplicaron los siguientes filtros:

- Se eliminan las maquinas con año de fabricación menores al año 2000.
- Solo se consideran las máquinas de 19 a 560 kW de potencia.
- Solo se consideran las máquinas con motores a diesel.

El porcentaje de máquinas eliminadas y el parque resultante se presentan a continuación.

Tabla 4-32 Porcentaje de máquinas descartadas del parque.

Criterio de descarte	Porcentaje del parque
Año fabricación menor a 2000	0,16%
Fuera del rango de 19 a 560 kW	6,22%
No diesel	11%

Fuente: Elaboración propia.

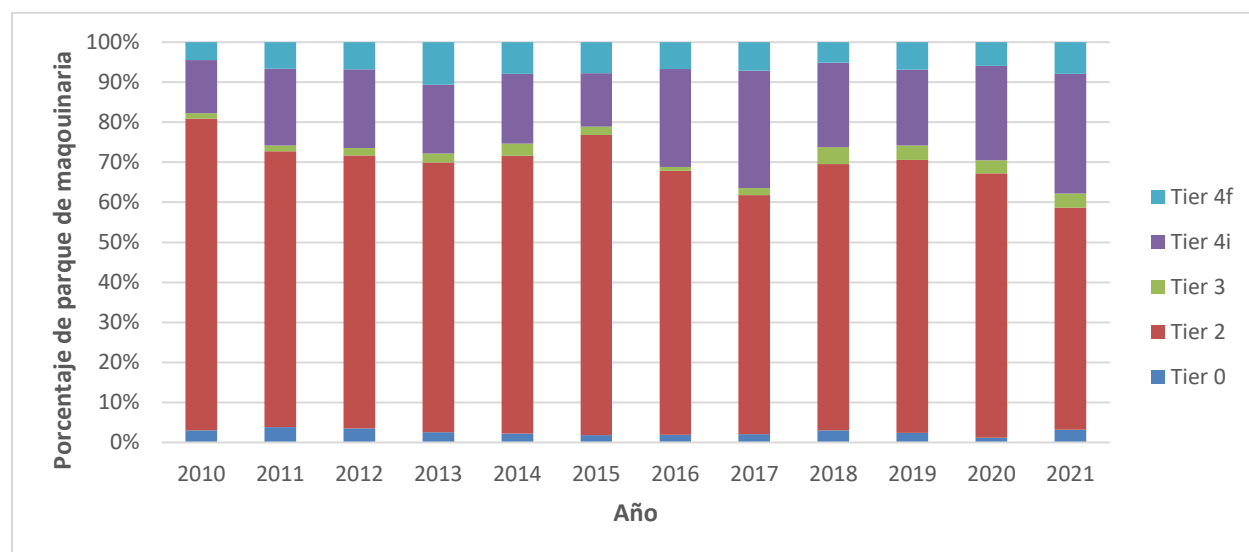
El parque resultante, y utilizado como parque base para el cálculo de la proyección de emisiones, se presenta a continuación.

Tabla 4-33 Parque base a proyectar

Rubro	Máquinas
AGRICOLA-FORESTAL	1.348
CONSTRUCCION	11.848
INDUSTRIA	2.560
MINERIA	176
Total	15.932

Fuente: Elaboración propia.

La distribución del estándar normativo a lo largo de los años se presenta en la Figura 4-27.


Figura 4-27 Distribución de estándar de emisión en importaciones anuales.

Fuente: Elaboración propia

La distribución de potencia del parque base se presenta en la Tabla 4-34.

Tabla 4-34 Distribución de potencia del parque de MMFR.

Rango de potencia	Porcentaje del parque
$19 \leq \text{kW} < 37$	2%
$37 \leq \text{kW} < 56$	16%
$56 \leq \text{kW} < 75$	36%
$75 \leq \text{kW} < 130$	26%
$130 \leq \text{kW} < 225$	8%
$225 \leq \text{kW} < 450$	10%
$450 \leq \text{kW} < 560$	2%

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.2 Ingreso de maquinaria

Para determinar el ingreso de maquinaria al país en años futuros, se consideraron las siguientes aproximaciones:

1. Utilizar una proyección por sector a partir de tendencia histórica de importaciones a partir de inventario de (PARTICULAS, 2022).
2. Utilizar la proyección por sector a partir de tendencia histórica de importaciones elaborada por HEMAQ (CALAC+, 2021b).
3. Realizar una regresión entre tendencia histórica de importaciones por sector (PARTICULAS, 2022) y PIB histórico nacional, luego utilizar proyección de PIB nacional (modelo econométrico sector energía) para predecir el crecimiento futuro de la maquinaria.
4. Utilizar una proyección por tendencia histórica de importaciones por tipo de máquina (PARTICULAS, 2022).

El inventario de (CALAC+, 2021a) utiliza los datos del 2002 al 2018, lo que incluye el boom inmobiliario y excluye las tendencias durante la crisis del estallido social y pandemia, los que se pueden considerar como datos anómalos, mientras que el inventario de (PARTICULAS, 2022) utiliza solo la información de la Aduana desde el 2010 al 2021. Además, existe una discordancia entre la clasificación de la maquinaria en cada uno de los rubros entre el informe de PARTICULAS y su planilla de cálculo, por lo que se considera que esta información no es confiable y no es posible realizar proyecciones para el crecimiento de la maquinaria que sean representativas de la realidad.

Para las cuatro opciones se compararon los coeficientes de determinación para las regresiones elaboradas, concluyéndose que la opción más fiable para proyectar crecimiento de maquinaria es la opción 2, la cual se muestra a continuación:

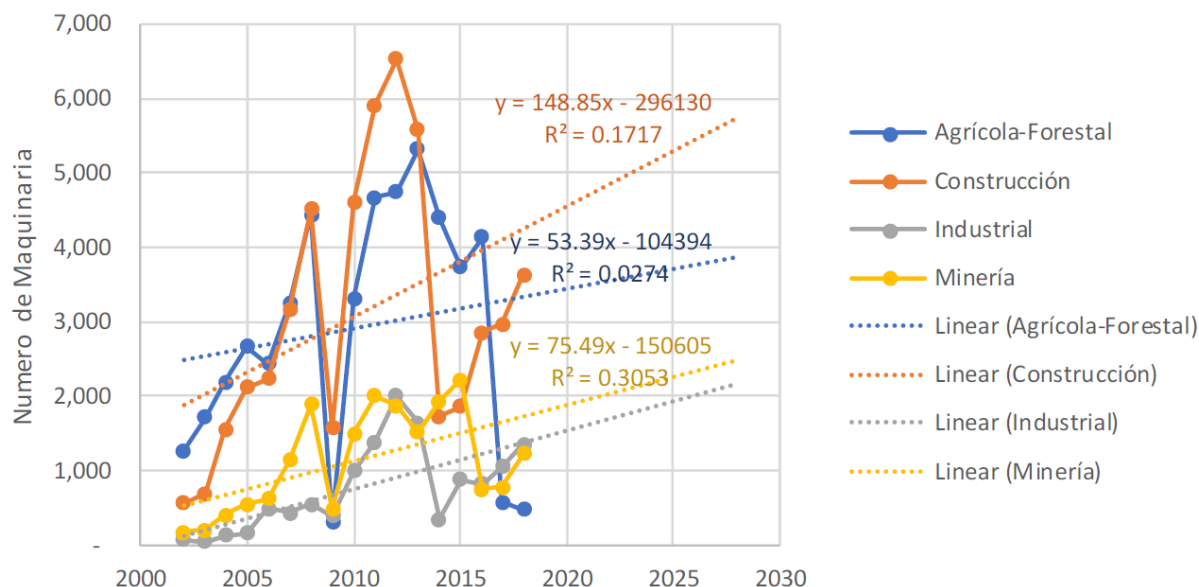


Figura 4-28 Regresión lineal de importaciones anuales.

Fuente: (CALAC+, 2021b)

Para ajustar las regresiones a los datos del parque base se utilizó un factor de ajuste, dado por la siguiente fórmula:

Ecuación 9 Factor de ajuste para regresiones de importaciones de MMFR

$$\text{Factor de ajuste} = \frac{\text{Importaciones históricas inventario PARTICULAS}}{\text{Importaciones históricas CALAC (2021)}}$$

Con esto, se obtiene la proyección de las importaciones, presentada a continuación.

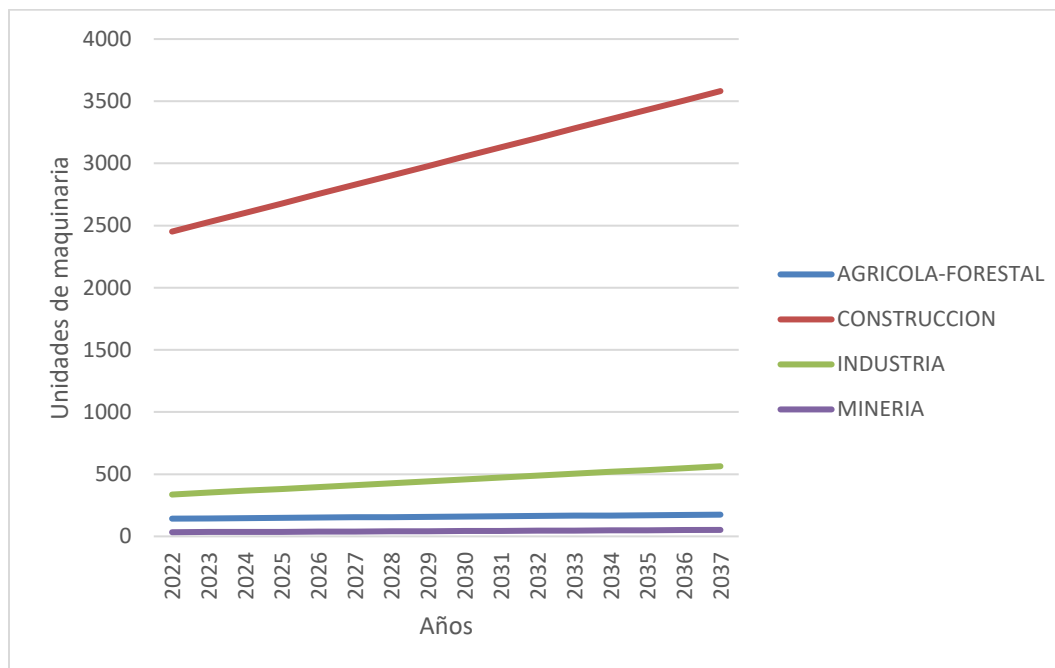


Figura 4-29 Proyección importaciones de la RM

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.3 Tasa de retiro de maquinaria

La tasa de retiro se calculó mediante una función Weibull, la cual es usada para modelar fallos en sistemas. De esta manera la formula a utilizar es la siguiente.

Ecuación 10 Tasa de retiro de MMFR

$$TR(x) = \frac{k}{\eta} \cdot \left(\frac{x}{\eta}\right)^{k-1}$$

Donde:

- $TR(x)$: Tasa de retiro a la edad x
- k : Parámetro de forma (indica cómo cambia la tasa con la edad)
 - $k < 1$: Fallos decrecientes con la edad.
 - $k = 1$: Fallos constantes (como una distribución exponencial).
 - $k > 1$: Fallos crecientes con la edad.
- η : Vida útil promedio

Para calcular la vida útil se utilizó la ecuación presentada en el manual de HEMAQ (CALAC+, 2020).

Ecuación 11 Vida útil de MMFR

$$Vida\ útil = \frac{Vida\ media}{NA \cdot factor\ carga}$$

Donde:

- Vida media: Tiempo de funcionamiento esperado de la maquinaria (hrs).

- NA: Nivel de actividad, promedio de horas de uso por año de la maquinaria (hrs/año).
- Factor de carga: Proporción del tiempo que la maquinaria opera a plena capacidad.

4.4.2.4 Proyección del parque de maquinaria

Se utilizó la siguiente fórmula para proyectar el parque de maquinaria.

Ecuación 12 Cálculo de parque proyectado de MMFR

$$Parque_t = Parque_{t-1} \cdot (1 - TR) + Importaciones_t$$

Donde:

- t: año de proyección.

Con esto, se obtiene la proyección del parque según rubro en la Figura 4-30 y según rubro y en la Figura 4-30, desagregado por estándar de emisión.

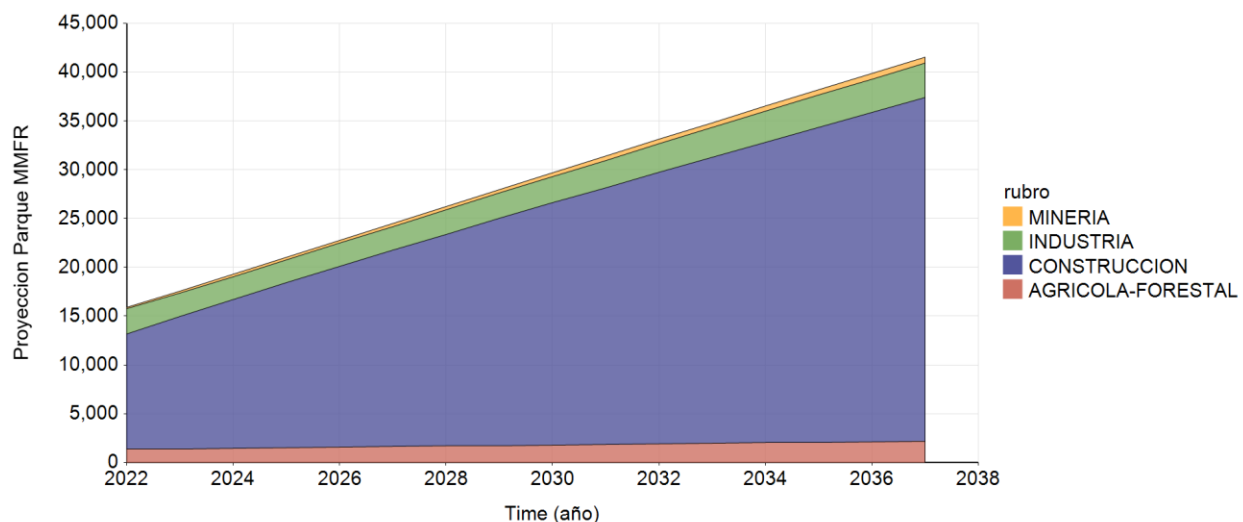


Figura 4-30 Proyección parque de MMFR por rubro.

Fuente: Elaboración propia

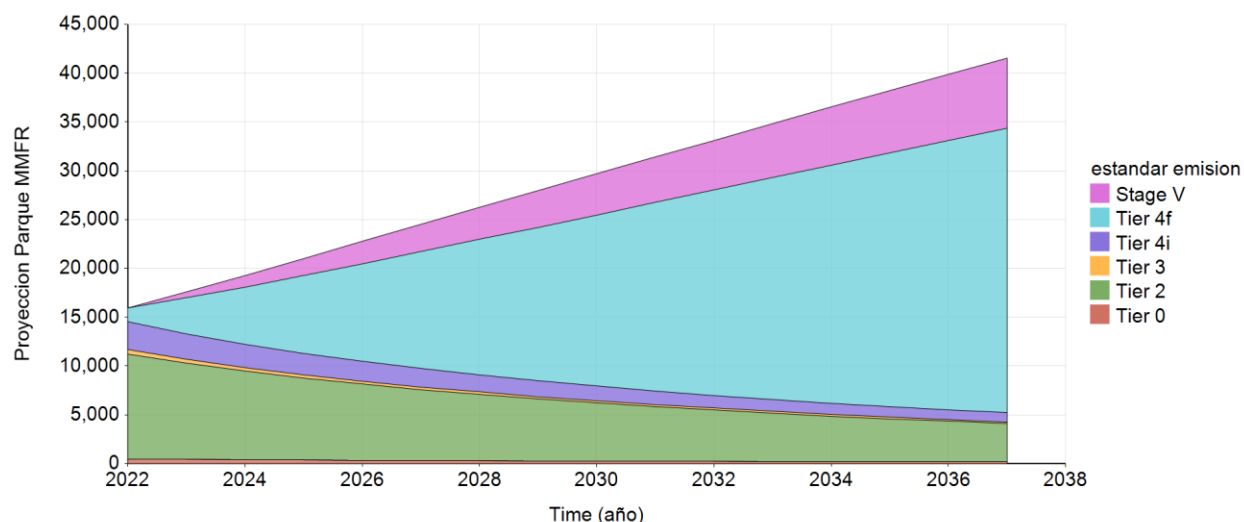


Figura 4-31. Proyección parque de MMFR por estándar de emisión.

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.5 Factor de emisión

Los factores de emisión provienen del informe de (CALAC+, 2021b) y complementados con datos de (ICCT, 2018) para valores faltantes, y corresponde a valores obtenidos en condiciones estacionarias. Para reflejar las condiciones reales de operación, caracterizadas por cambios dinámicos como aceleraciones y variaciones de carga, estos valores se ajustan mediante un factor de ajuste transitorio (FAT). Este factor, derivado de estudios experimentales, corrige las emisiones estimadas para adaptarlas al uso transitorio típico de la maquinaria, garantizando proyecciones más precisas y representativas.

La Tabla 4-35 muestra los factores de emisión para contaminantes clave (CO, HC, NOx y PM) clasificados por rango de potencia y estándar de emisión. En el Anexo 9 (ver Sección 9.6) se presenta un análisis comparativo de los factores de emisión.

Tabla 4-35 Factores de emisión (g/kW-hr) según rango de potencia y estándar de emisión.

Rango de potencia	Estándar de emisión	CO	HC	NOx	PTS/MP
19 ≤ kW < 37	Tier 0	6,8	2,45	9,38	1,09
	Tier 1	2,08	0,38	6,43	0,46
	Tier 2	2,08	0,38	6,43	0,46
	Tier 3	2,2	0,6	6,08	0,4
	Tier 4i	2,2	0,6	6,08	0,4
	Tier 4f	2,2	0,42	4,7	0,03
	Stage V	2,2	0,42	4,7	0,015
37 ≤ kW < 56	Tier 0	4,75	1,35	9,38	0,98
	Tier 1	3,22	0,71	7,61	0,64
	Tier 2	3,22	0,5	6,39	0,33
	Tier 3	2,2	0,4	3,81	0,2
	Tier 4i	2,2	0,28	3,81	0,025
	Tier 4f	2,2	0,28	3,81	0,025
	Stage V	2,2	0,28	3,81	0,015
56 ≤ kW < 75	Tier 0	4,75	1,35	9,38	0,98
	Tier 1	3,22	0,71	7,61	0,64
	Tier 2	3,22	0,5	6,39	0,33
	Tier 3	3,22	0,25	4,08	0,27
	Tier 4i	2,2	0,28	2,97	0,025
	Tier 4f	2,2	0,19	0,4	0,025
	Stage V	2,2	0,19	0,4	0,015
75 ≤ kW < 130	Tier 0	3,67	0,92	11,39	0,55
	Tier 1	1,18	0,46	7,68	0,38
	Tier 2	1,18	0,46	5,57	0,24
	Tier 3	1,18	0,25	3,4	0,3
	Tier 4i	1,5	0,19	2,97	0,025
	Tier 4f	1,5	0,19	0,4	0,025
	Stage V	1,5	0,19	0,4	0,015
130 ≤ kW < 225	Tier 0	3,67	0,92	11,39	0,55
	Tier 1	1,02	0,42	7,58	0,34
	Tier 2	1,02	0,42	5,44	0,18
	Tier 3	1,02	0,25	3,4	0,2
	Tier 4i	1,5	0,19	1,8	0,025
	Tier 4f	1,5	0,19	0,4	0,025
	Stage V	1,5	0,19	0,4	0,015
225 ≤ kW < 450	Tier 0	3,67	0,92	11,39	0,55
	Tier 1	1,78	0,28	8,18	0,27
	Tier 2	1,15	0,23	5,89	0,18
	Tier 3	1,15	0,23	3,4	0,2
	Tier 4i	1,5	0,19	1,8	0,025
	Tier 4f	1,5	0,19	0,4	0,025
	Stage V	1,5	0,19	0,4	0,015
450 ≤ kW < 560	Tier 0	3,67	0,92	11,39	0,55
	Tier 1	1,8	0,2	7,92	0,3
	Tier 2	1,8	0,23	5,57	0,18

Rango de potencia	Estándar de emisión	CO	HC	NOx	PTS/MP
	Tier 3	1,8	0,23	3,4	0,2
	Tier 4i	1,5	0,19	1,8	0,025
	Tier 4f	1,5	0,19	0,4	0,025
	Stage V	1,5	0,19	0,4	0,015

Fuente: Elaboración propia en base a y (CALAC+, 2021a) y (CALAC+, 2021b)

La Tabla 9-5 (ver Sección 9.7) presenta los factores de ajuste transitorio empleados para corregir los factores de emisión estacionarios y adaptarlos al uso dinámico de cada tipo de maquinaria. Cabe destacar que el factor de ajuste transitorio para tecnologías más avanzadas que Tier 3 es 1 debido a que el factor de emisión para dichas tecnologías se obtiene ya en operación transitoria y no necesita ser ajustado.

4.4.2.6 Factor de deterioro

Las siguientes ecuaciones se obtienen de la “Guía metodológica para la estimación de emisiones de maquinaria móvil no de carretera” (CALAC+, 2020).

Ecuación 13 Factor de deterioro de MMFR

$$FD_{sub,i} = 1 + A_{sub,i} \cdot (Factor\ Edad_{sub})^b; Si\ Factor\ Edad_{sub} \leq 1$$

Ecuación 14 Factor de deterioro de MFMR

$$FD_{sub,i} = 1 + A_{sub,i} ; Si\ Factor\ Edad_{sub} > 1$$

Ecuación 15 Factor Edad de MMFR

$$Factor\ Edad_{sub} = \frac{(Edad \cdot NA_{sub} \cdot FC_{sub})}{Vida\ Media_{sub}}$$

Donde

- sub : Índice que señala al subsegmento de la flota con iguales atributos técnicos: rango de potencia, tipo de motor, tipo de maquinaria, nivel de emisiones y edad.
- $A_{sub,i}$: Para cada contaminante, i es una constante definida para todos los equipos que pertenecen al subsegmento con idéntico estándar de emisiones. En términos porcentuales ($A \cdot 100$), esta constante representa el porcentaje máximo de incremento de las emisiones por deterioro, al cumplirse la vida media del motor.
- $FD_{sub,i}$: Factor de deterioro, representa el ajuste del factor de emisiones del contaminante i , por el envejecimiento o deterioro del motor y los sistemas de control de emisiones de los equipos del subsegmento sub (adimensional).
- b : Constante, para vehículos diésel se considera deterioro lineal en el tiempo de uso, por lo que $b = 1$.
- $Factor\ Edad_{sub}$: Fracción de la vida media en la que se encuentran todas las unidades que pertenecen al mismo subsegmento.

A continuación, en la Tabla 4-36 se detalla el parámetro A para cada estándar de emisión (Tier) y contaminante.

Tabla 4-36 Parámetro A según estándar de emisión y contaminante.

Estándar de emisión	Parámetro A			
	HC	CO	NOx	PM
Tier 0	0,047	0,185	0,024	0,473
Tier 1	0,036	0,101	0,024	0,473
Tier 2	0,034	0,101	0,009	0,473
Tier 3	0,027	0,151	0,008	0,473
Tier 4i	0,027	0,151	0,008	0,473
Tier 4f	0,027	0,151	0,008	0,473
Stage V	0,027	0,151	0,008	0,473

Fuente: Elaboración propia en base a (CALAC+, 2020)

4.4.2.7 Factor de carga y nivel de actividad

En la Tabla 4-37 se describe el nivel promedio de actividad anual (en horas) y el factor de carga (adimensional) para distintos tipos de maquinaria. Los datos fueron obtenidos del documento “Median Life , Annual Activity , and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling.

Tabla 4-37 Nivel de actividad y factores de carga por tipo de maquinaria

Tipo maquina	Nivel de actividad [hr/año]	Factor de carga
ASFALTADORA	392	0,59
BARREDORA	1220	0,43
BULLDOZER	899	0,59
CAMION FUERA DE CARRETERA	450	0,59
CARGADOR DE TRONCOS	175	0,59
CARGADOR FRONTAL	761	0,59
COSECHADORA	1276	0,59
EXCAVADORA	378	0,59
GRUA HORQUILLA	1800	0,59
GRUA TELESCOPICA	384	0,43
MANIPULADOR	1276	0,43
MANIPULADOR TELESCOPICO	1276	0,43
MOTONIVELADORA	899	0,59
OTROS EQUIPOS AGRICOLAS	124	0,59
OTROS EQUIPOS DE CONSTRUCCION	371	0,59
OTROS EQUIPOS EN MINAS SUBTERRANEAS	260	0,21
PERFORADOR	466	0,43
PLATAFORMA TELESCOPICA	1135	0,21
QUITANIEVE	40	0,34
RETROEXCAVADORA	1135	0,21
RODILLO	621	0,59
TRACTOR	1135	0,21
TRACTOR AGRICOLA	550	0,59
ZANJADORA	402	0,59

Fuente: Elaboración propia en base a a (CALAC+, 2021a), (PARTICULAS, 2022) y (EPA, 2010b)

4.4.2.8 Vida media

La Tabla 4-38 presenta la vida media estimada en horas de funcionamiento para maquinaria móvil fuera de ruta, destacando que el máximo corresponde a 7.000 horas para equipos con potencia superior a 225 kW.

Tabla 4-38 Vida media de MMFR según rango de potencia

Rango de potencia [kW]	Vida media [hrs]
$0 \leq kW < 37$	2.500
$37 \leq kW < 225$	4.667
$225 \leq kW$	7.000

Fuente: (EPA, 2010b)

4.4.2.9 Proyección de emisiones MMFR

Utilizando la metodología y datos mencionados en las secciones precedentes, se presenta la proyección de emisiones de HC, CO, NOx y MP para maquinarias de 19kW hasta 560 kW.

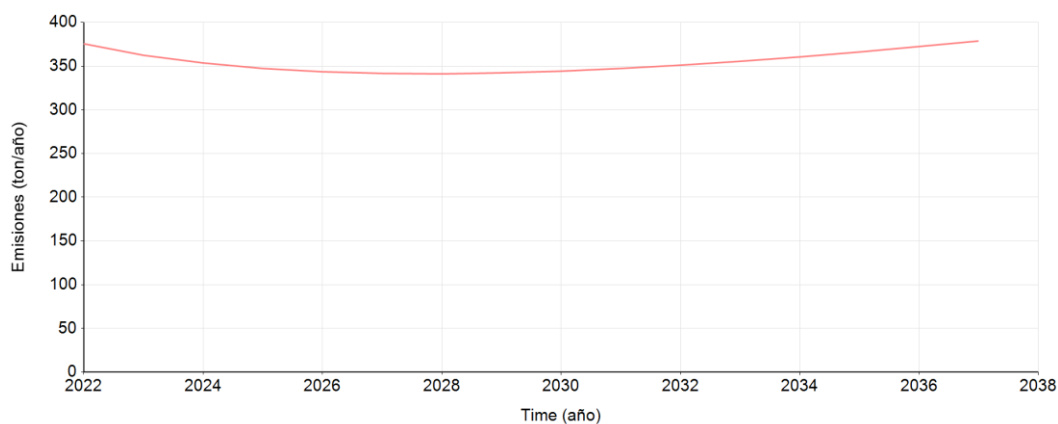


Figura 4-32 Emisiones de HC de MMFR proyectadas para el periodo 2022-2037 [ton/año]

Fuente: Elaboración propia

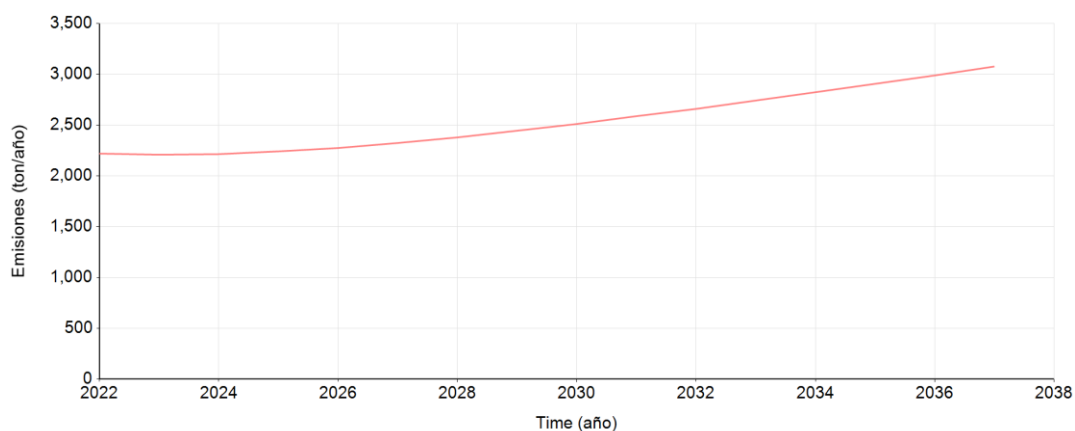


Figura 4-33 Emisiones de CO de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2037 [ton/año]

Fuente: Elaboración propia

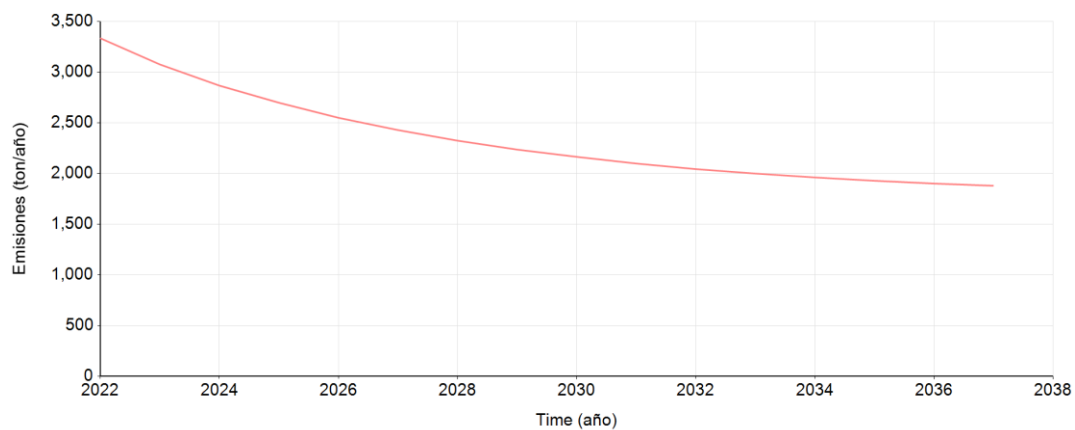


Figura 4-34 Emisiones de NOx de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2037
[ton/año]

Fuente: Elaboración propia

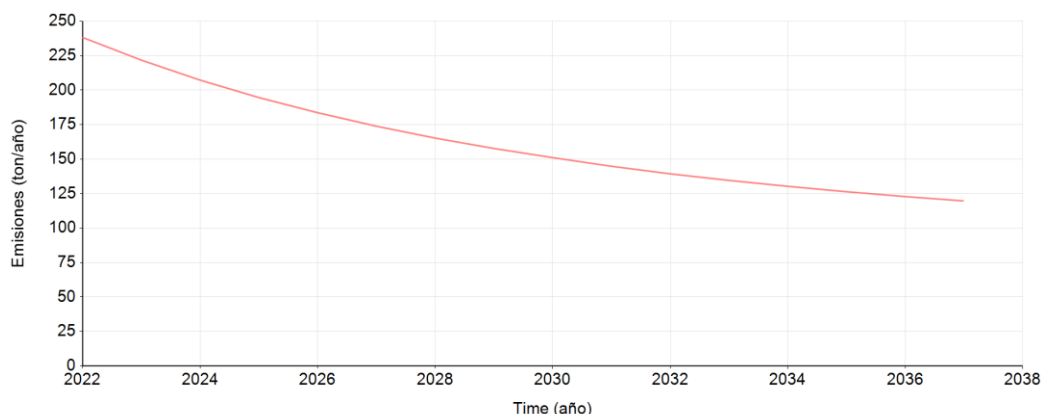


Figura 4-35 Emisiones de MP de transporte en ruta proyectadas para el periodo 2022-2037
[ton/año]

Fuente: Elaboración propia

Las proyecciones de emisiones del escenario base, bajo la aplicación del Decreto 39, indican una disminución de NOx y MP a lo largo del tiempo, impulsada por la renovación del parque de maquinaria hacia tecnologías más limpias. En contraste, la reducción de CO y HC es menos pronunciada, lo que podría atribuirse al crecimiento del parque y a que la disminución relativa de los factores de emisión de estos contaminantes ha sido menor en comparación con la de NOx y MP (ver Sección 9.6).

En términos absolutos, las emisiones del parque base (año 2022) son menores en comparación a el inventario de emisiones de (CALAC+, 2021a), lo que se debe a que el parque base de este estudio es de menor tamaño debido a los filtros aplicados, especificados en la Tabla 4-32. No obstante, al analizar la tasa de emisión por máquina, los valores obtenidos son muy similares a los reportados en CALAC, lo que valida la consistencia de la metodología utilizada en este análisis.

Tabla 4-39 Comparación emisiones NOx y PM con (CALAC+, 2021a)

Atributos	Contaminante	Este estudio	CALAC+	Unidad
Parque base	-	15.900	22.244	n° maquinas
Emisiones año base	NOx	3.300	4.995	ton/año
Emisiones por máquina	NOx	0,21	0,22	ton/año
Emisiones año base	PM	238	330	ton/año
Emisiones por máquina	PM	0,0150	0,0148	ton/año

Fuente: Elaboración propia en base a (CALAC+, 2021a)

5. Propuesta de medidas nuevas y/o una mantención o modificación de las medidas actuales, para la actualización del PPDA RMS

5.1 Revisión de antecedentes nacionales e internacionales sobre medidas de reducción de emisiones atmosféricas de fuentes móviles no incluidas en el actual PPDA

Se realizó una revisión de antecedentes nacionales e internacionales sobre medidas de reducción de emisiones atmosféricas de fuentes móviles que no se encuentren en el actual PPDA RMS. La sistematización de estas medidas se encuentra disponible en el anexo digital "TRANSRM2-RevAntecedentesc.1.xlsx". A continuación, se presenta la recopilación de medidas de descontaminación atmosférica para el sector transporte.

Tabla 5-1 Recopilación de medidas de descontaminación atmosférica sector Transporte

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Instrumentos de planificación territorial orientados al transporte público y la movilidad activa	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Gestión y diseño urbano orientados al transporte público y la movilidad activa	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Intersectorialidad con enfoque territorial	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Logística urbana sostenible	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Evaluación social de proyectos orientada hacia el cambio climático	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Desincentivos al uso de vehículos contaminantes	Límites máximos de emisión de la RM para vehículos livianos y medianos	9	Alto
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Desincentivos a la adquisición de vehículos contaminantes	Incentivos compra vehículos cero y baja emisión	11	Alto
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Fiscalización a vehículos contaminantes	Fiscalización cumplimiento DS N°18/2001	120	Alto
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Descarbonización de flotas	Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para vehículos de STP.	5	Alto
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Promoción de cambio tecnológico en vehículos privados	Límites máximos de emisión de la RM para vehículos livianos y medianos	9	Alto
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Reducción de la necesidad de viajar	No aplica	No aplica	Medio

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Redistribución del espacio vial	No aplica	No aplica	Medio
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Mejora de los niveles de servicio del transporte público	Plan de Desarrollo Intermodal para la RM	106	Medio
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Incentivos a la operación y a los usuarios del transporte público	Plan de Desarrollo Intermodal para la RM	106	Alto
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Promoción y facilitación de intermodalidad	Plan de Desarrollo Intermodal para la RM	106	Medio
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Desincentivos a la adquisición y uso de vehículos ineficientes	Límites máximos de emisión de la RM para vehículos livianos y medianos	9	Alto
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Infraestructura para peatones y ciclos	Plan Maestro de Ciclovías del Gran Santiago	104	Medio
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Iniciativas de seguridad vial que prioricen a peatones y ciclos	No aplica	No aplica	Medio
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Promoción de la intermodalidad entre ciclos y el transporte público	No aplica	No aplica	Medio
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Incentivos a la movilidad activa	No aplica	No aplica	Medio
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Infraestructura y espacios públicos universalmente accesibles	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Transporte público universalmente accesible	No aplica	No aplica	Bajo

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Transporte público seguro e inclusivo	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Procesos participativos oportunos y transparentes que conduzcan a acuerdos	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Gobernanza descentralizada para la movilidad sostenible	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Mecanismos para que la ciudadanía levante problemáticas y se informe de los procesos	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Mejora de los mecanismos de captura, procesamiento y análisis de datos de movilidad	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Transformación digital para una gestión integral del tránsito	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Fortalecimiento de los servicios de información a la ciudadanía	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2022)	Desarrollo de servicios integrados de transporte	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se trabajará en habilitar regulatoriamente la participación de los vehículos eléctricos en el esquema de Netbilling, de forma que puedan inyectar a la red excedentes de energía y por otro lado, se beneficien de contar con generación renovable en el punto de inyección.	No aplica	No aplica	Alto
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se trabajará en la búsqueda y aplicación de incentivos indirectos tales como ajuste al permiso de circulación, revisión de los gastos rechazados a empresas, estacionamientos preferentes, zonas exclusivas de circulación, entre otros a estudiar en profundidad.	Incentivos compra vehículos cero y baja emisión	11	Alto

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se continuará impulsando la penetración de la tecnología en el segmento de transporte público menor, actualizando el esquema del programa “Renueva Tu Colectivo” e incorporando el programa “Mi Taxi Eléctrico” en regiones.	Inscripciones taxis exclusivas para vehículos eléctricos	12	Alto
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se trabajará en la revisión de instrumentos económicos de fomento a tecnologías limpias y eficientes, tales como el impuesto “verde” de vehículos.	Incentivos compra vehículos cero y baja emisión	11	Medio
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Desde el Estado se generarán instancias de difusión para el llamado a instituciones financieras, tal como el Banco Estado, y otras de inversiones, a involucrarse en los programas de fomento a la electromovilidad con instrumentos de financiamiento ad hoc. Además se levantarán recursos regionales para llevar la electromovilidad a todo Chile.	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se desarrollará e implementará el reglamento que establece el procedimiento para la fijación de estándares de eficiencia energética vehicular y normas para su aplicación que deberán cumplir los vehículos nuevos motorizados livianos, medianos y pesados comercializados en el país. Adicionalmente se establecerá el primer estándar de eficiencia energética para vehículos livianos, medianos y pesados.	Marco normativo de estándares de Eficiencia Energética para parque vehicular	10	Alto
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se generarán incentivos para la incorporación de buses eléctricos al transporte público mayor urbano en la Región Metropolitana y se generará un Plan Nacional para incorporar buses eléctricos urbanos en regiones analizando distintos escenarios, identificando barreras y costos. Así, entender cuál es la mejor forma de abordar las particularidades regionales, definiendo mecanismos de electrificación para regiones. De esta manera se incorporarán buses eléctricos a nivel regional urbano en al menos 9 regiones del país.	Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para vehículos de STP.	5	Alto
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se potenciarán proyectos piloto a través del Programa Giro Limpio ejecutado por la Agencia de Sostenibilidad Energética y Electromovilidad Logística del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, con el fin de mostrar experiencias replicables a la adopción de esta tecnología, acelerando el transporte cero emisiones en el transporte de carga. Lo anterior además se dará a conocer a través de la publicación de guías de casos de éxito.	No aplica	No aplica	Bajo

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se potenciarán nuevos modelos de negocio que consideren incorporar la micromovilidad eléctrica como una opción de transporte. Apoyaremos el desarrollo de la electromovilidad en logística urbana mediante mesas de trabajo intersectoriales	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se impulsará la transición de la electromovilidad en el Estado a través de herramientas que nos ayuden a generar la línea base de consumos de la flota vehicular del Estado e identificar las flotas de uso intensivo para promover la transición a vehículos más eficientes, cero emisiones y cuya operación sea más económica. Se implementarán mecanismos que faciliten la adquisición de vehículos más eficientes eléctricos a través de convenio marco con proveedores de vehículos, proveedores de cargadores, empresas instaladoras, entre otros. Se elaborará un plan de recambio, para aquellas instituciones públicas con alta intensidad de consumo de combustibles, cuantificando los beneficios ambientales y económicos del recambio de las flotas de vehículos a su equivalente eléctricos.	Incentivos compra vehículos cero y baja emisión	11	Alto
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se trabajará en la regulación correspondiente al peso máximo de los vehículos que pueden circular por caminos públicos con el fin de impulsar buses y camiones eléctricos en carretera a nivel nacional. Además se promoverá “Proyectos Caminos Inteligentes” del Ministerio de Obras Públicas, que busca dar valor al uso de fajas fiscales, considerando servicios sustentables, incluyendo movilidad eléctrica.	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se promoverá la adopción de maquinaria minera y forestal cero emisiones con el fin de contribuir al proceso de descarbonización.	No aplica	No aplica	Medio

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se desarrollará, en el marco de la Ley N°20.920 sobre responsabilidad extendida del productor, el decreto específico de metas de recolección, valorización y otras obligaciones para baterías, el cual incluirá las baterías utilizadas en medios de transporte eléctricos. Para ello se considerarán los principios que contempla la ley sobre la gradualidad y la jerarquía en el manejo de residuos, que tiene como primera opción la prevención, luego la reutilización, posteriormente la valorización y como última opción la eliminación. Esto llevará, entre otras acciones, a establecer incentivos asociados a la reutilización, que en este caso implicaría que las baterías extraídas de distintos medios de transporte puedan ser utilizadas con otros fines, generando un mercado formal y establecido.	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Habilitación de la segunda vida de la batería en el mercado eléctrico	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se estudiará y promoverá soluciones tecnológicas para la segunda vida de las baterías con el fin de potenciar la reutilización de las baterías de vehículos eléctricos en los sistemas de almacenamiento de generación eléctrica aislados y conectados a la red y además se revisará la regulación correspondiente para habilitarlo.	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se promoverá el desarrollo de proyectos piloto de vehículos eléctricos que utilicen hidrógeno verde en transporte de carga y pasajeros, operaciones logísticas, buses interurbanos y maquinaria de la minería, así como en otras aplicaciones de transporte en que el hidrógeno presente competitividad, con el fin de mostrar casos de éxito y experiencias replicables. Además se trabajará en su regulación habilitante.	No aplica	No aplica	Bajo

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se impulsarán programas de la línea de transporte eficiente que buscan avanzar hacia la sostenibilidad energética del rubro de transporte. En este sentido se potenciará el piloto Vuelo Limpio de la Agencia de Sostenibilidad Energética y apoyado por la Junta Aeronáutica Civil (JAC), para promover tecnologías y buenas prácticas de ahorro de combustible en el transporte aéreo, además del consumo de combustibles sostenibles en el rubro de la aviación.	No aplica	No aplica	Bajo
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se identificarán iniciativas y se levantará información base de los consumos energéticos y de emisiones a través de trabajos de investigación aplicada y proyectos piloto con el fin de propiciar la electromovilidad del transporte marítimo tanto de cabotaje como internacional	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	La carga de vehículos eléctricos podría ser un estrés importante para la red eléctrica si no se incentiva la carga en horario fuera de punta	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Generar una coordinación activa entre la planificación de nuevos electroterminales y su demanda energética asociados al transporte público y la planificación de las redes eléctricas, de forma que los plazos de cada uno no sean una barrera para el desarrollo de la electromovilidad.	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se evaluarán las opciones y espacios de la electromovilidad y su relación con los nuevos actores del sector eléctrico con ocasión del Proyecto de Ley de Portabilidad y posteriores modificaciones legales.	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se desarrollará e implementará el reglamento de Interoperabilidad con el fin de facilitar el acceso y conexión de los usuarios de vehículos eléctricos a la red de carga. Además se realizarán pruebas y pilotos para alimentar las posibles actualizaciones del mismo reglamento en el futuro, y se estudiarán las particularidades a considerar para el caso de vehículos eléctricos con celdas de combustible.	No aplica	No aplica	No aplica

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se implementará el Pliego Técnico Normativo 15, realizando campañas de medición y monitoreo de instalaciones de carga en vista a levantar insumos para una eventual revisión de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS).	No aplica	No aplica	No aplica
Estrategia Nacional de Electromovilidad del Ministerio de Energía	Se desarrollará una guía para el desarrollo de proyectos especiales de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos y se estudiará la integración de nuevas tecnologías a la normativa vigente.	No aplica	No aplica	No aplica
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Programa renueva tu micro	Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para vehículos de STP.	5	Alto
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Programa renueva tu colectivo	Inscripciones taxis exclusivas para vehículos eléctricos	12	Alto
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Mesa de trabajo “Bunker” para el transporte marítimo	No aplica	No aplica	No aplica
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Impuesto Verde a Vehículos Motorizados Nuevos	Aplica	Aplica	Alto
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Etiquetado de consumo energético y emisiones de CO ₂ en vehículos livianos y medianos	Etiqueta con indicación de los niveles de emisiones de gases de escape	17	Medio
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Medidas del Sector Transportes en el Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana (RM)	Aplica	Aplica	Alto
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Expansión de la Red de Metro de Santiago (Línea 3 y 6)	No aplica	No aplica	Medio
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Proyecto Giro Limpio de Certificación y Validación del Transporte de Carga por Carretera del Programa Transforma Logística de CORFO	No aplica	No aplica	No aplica

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Electromovilidad - Transporte público RM	Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para vehículos de STP.	5	Alto
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Traspaso modal a trenes	No aplica	No aplica	Alto
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Traspaso modal a Metro	No aplica	No aplica	Alto
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Electromovilidad - Taxis y taxis colectivos	Inscripciones taxis exclusivas para vehículos eléctricos	12	Alto
Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del sector transporte	Traspaso modal bicicletas	Plan Maestro de Ciclovías del Gran Santiago	104	Alto
Geasur	Zona de Baja Emisión	Programa de Implementación de una Zona de Baja Emisión en la RM	8	Alto
Geasur	Aplicación Euro VI/EPA 2010 para Buses Transantiago	Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para vehículos de STP.	5	Alto
Geasur	Cero y Baja emisión Transantiago	Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para vehículos de STP.	6	Alto
Geasur	Restricción vehicular	Restricción Vehicular	120	Alto
Geasur	Límites ASM	Límite motores de buses locomoción colectiva urbana en Santiago, San Bernardo y Puente Alto.	4	Alto
Geasur	LÍMITES DE EMISIÓN CON RSD ("LIMPIO Y SUCIO") PARA VEHÍCULOS LIVIANOS Y PESADOS.	No aplica	No aplica	Alto

Antecedente	Medidas	Análogo a Medida PPDA	Artículo PPDA	Potencial de reducción de emisiones
Geasur	PROGRAMA REDUCCIÓN EMISIONES PARA MAQUINARIA CONSTRUCCIÓN	Filtros de partículas cerrados para maquinaria móvil fuera de ruta de obras de construcción	18	Alto
Geasur	IMPLEMENTACIÓN CORREDORES TRANSPORTE PÚBLICO	Plan de Gestión de Tránsito	120	Alto
Carbono Neutralidad en el Sector Energía	Vehículos comerciales	Incentivos compra vehículos cero y baja emisión	11	Alto
Carbono Neutralidad en el Sector Energía	Transporte público RM	Programa de Incentivo de Reducción de Emisiones y Eficiencia Energética para vehículos de STP.	5	Alto
Carbono Neutralidad en el Sector Energía	Vehículos livianos	Incentivos compra vehículos cero y baja emisión	11	Alto

Fuente: Elaboración propia

5.2 Propuesta de medidas

Según lo acordado junto a la contraparte técnica, las nuevas medidas de reducción de emisiones están enfocadas en proponer modificaciones, a través de la evaluación de nuevos escenarios de regulación del Artículo 9, considerando la información cuantitativa analizada en la Sección 4.2.2. Adicionalmente, se decide incluir en la propuesta una medida relacionada con maquinaria móvil fuera de ruta, que permita reducir las emisiones generadas por dicho sector. En la Tabla 5-2 se presentan las nuevas medidas propuestas.

Tabla 5-2 Modificaciones propuestas a medidas existentes en PPDA

Artículo	Medida	Propuesta de modificación/nueva medida
9	Límites de emisión para vehículos livianos y medianos	Aumentar la exigencia en los límites de emisión actuales, de acuerdo a los límites finales EPA. Es decir: <ul style="list-style-type: none"> Vehículos livianos: pasar a EPA 2004 tier 1 Vehículos medianos: pasar a EPA 2004 tier 1
-	Estándar de emisión MMFR	Elevar el estándar de emisiones exigido para maquinaria móvil fuera de ruta a Stage V para 2030.

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que, dado que la nueva medida propuesta para MMFR implicaría una modificación del Decreto N° 39 de 2020 del Ministerio del Medio Ambiente, cuyo alcance es nacional, podría corresponder más bien a una medida de carácter nacional en lugar de una medida regional dentro del PPDA RMS. No obstante, en el presente estudio se ha decidido incluir su evaluación como nueva medida dentro de la Región Metropolitana, considerando su potencial contribución a la reducción de emisiones en esta zona.

5.2.1 Stage V al 2030 para MMFRF

Se propone elevar el estándar de emisiones exigido para las importaciones de maquinaria móvil fuera de ruta a Stage V para 2030.

El escenario base considera que el 80% de la maquinaria importada corresponde a Tier 4f y el 20% a Stage V, manteniendo estos porcentajes constantes hasta 2037. En el escenario con normativa, se asume que, para 2030, el 100% de la maquinaria importada cumple con Stage V. Se contempla una adopción gradual de esta tecnología en los años previos a su obligatoriedad, como una reacción anticipada de los importadores ante el anuncio de la regulación.

La evolución del estándar normativo de la maquinaria importada en el período de proyección se presenta en la Figura 5-1 y Figura 5-2.

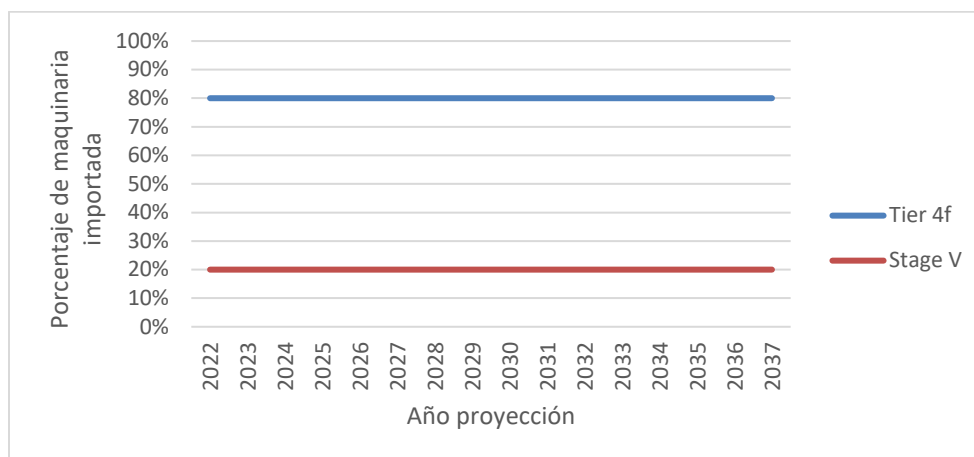


Figura 5-1 Porcentaje de importaciones según estándar normativo – Escenario Base

Fuente: Elaboración propia

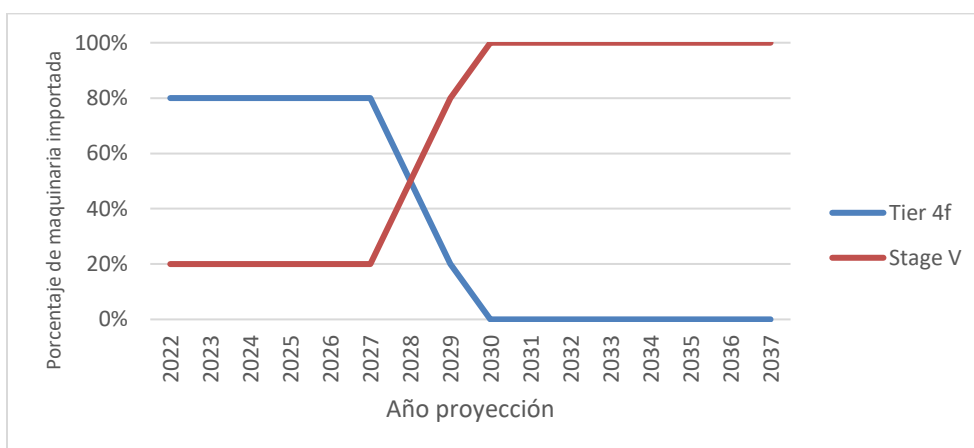


Figura 5-2 Porcentaje de importaciones según estándar normativo – Escenario propuesto

Fuente: Elaboración propia

5.3 Estimación de costos incrementales de inversión, operación y mantención de cada medida

Para las nuevas medidas propuestas en la Sección 5.2, se identificaron y calcularon los costos incrementales de inversión, operación y mantención. Los costos se estimaron para un periodo de 15 años, considerando también el cálculo del Valor Presente Neto de los flujos al año base 2022, con una tasa de descuento del 6%.

Un aspecto relevante para considerar en los costos son los asociados a la fiscalización del cumplimiento de las medidas. Los costos de fiscalización dependen de las medidas a incluir en el Plan, debido a que influye su tipo, características específicas y la cantidad de medidas en el costo. Por ejemplo, medidas que implican el monitoreo de equipos tecnológicos o fiscalizaciones en

terreno requieren mayores recursos en comparación con aquellas de educación ambiental u otro. Para ello, es útil conocer la magnitud de los costos para proporcionar un marco de referencia inicial, se presenta una estimación preliminar basada en información disponible.

Para esta estimación, se utiliza como referencia el valor unitario asociado al programa de fiscalización del PPDA del año 2024 (SMA, 2024). Dicho valor corresponde al costo unitario de las actividades de fiscalización en planes de prevención y/o descontaminación, siendo la información más actualizada disponible. Este valor considera los gastos asociados a la capacitación del personal, equipamiento técnico y actividades de seguimiento en terreno, lo cual refleja un panorama integral de los recursos necesarios para la implementación efectiva.

La Tabla 5-3 presenta un resumen del presupuesto correspondiente al año 2024, detallando el número de actividades de fiscalización planificadas para cada entidad fiscalizadora, así como el costo unitario por actividad de fiscalización.

Tabla 5-3 Costo unitario por actividad de fiscalización [CLP/act]

Entidad Fiscalizadora	Presupuesto 2024 [CLP]	N° Actividades	Costo Unitario [CLP/act]
SMA	569.080.622	468	1.215.984
Salud	135.800.000	380	357.368
SAG	135.223	1	135.223

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan los costos estimados para cada nueva medida.

5.3.1 Modificación Artículo 9 – Límites de emisión EPA

Para la estimación de los costos asociados a la disminución de los límites ASM a los establecidos en la EPA, se utilizó como principal fuente de información el estudio (Geasur, 2015). Basado en dicho estudio, se contemplan únicamente los costos de reparación del vehículo rechazado debido a los nuevos límites propuestos, mientras que otros costos, como el aumento de la fiscalización estatal y la actualización de software en las Plantas de Revisión Técnica (PRT), se consideran despreciables frente al gasto de reparación o no presentan alteraciones significativas con la propuesta. Las opciones de reparación para dar cumplimiento a la normativa de emisión son diversas y pueden incluir desde ajustes menores en el sistema de inyección hasta intervenciones mayores, como el reemplazo del convertidor catalítico (GEASUR, 2015). Para efectos del presente análisis, se adoptó una postura conservadora en términos de costos, asumiendo que en todos los casos será necesario el recambio del convertidor catalítico, lo que podría implicar una sobrestimación de los valores reales.

De esta forma, para esta medida se consideran principalmente los costos asociados a la reparación del convertidor catalítico, los cuales incluyen el diagnóstico vehicular, la mano de obra y la reposición del convertidor catalítico. En base al estudio “Análisis General de Impacto Económico y Social de la Conveniencia de Adelantar un Año la Entrada en Vigencia de la Norma

de Emisiones para Vehículos Bajo el Método ASM en Regiones, del Ministerio del Medio Ambiente, el costo estimado para el recambio de un convertidor de alta eficiencia es de 215 USD, con una vida útil proyectada de 120.000 kilómetros (MMA, 2015). Este valor incluye los costos de diagnóstico, mano de obra y convertidor catalítico de reposición, y es equivalente a 4,3 UF.

La estimación de costos se incorporó en el modelo de Analytica desarrollado en el presente estudio. En la Figura 5-3 se presenta la proyección en el tiempo de los costos de implementación de los nuevos límites EPA y, para complementar su análisis, se presenta también la proyección de los costos para los límites actuales del PPDA RMS. Se observa que los costos asociados a la implementación de los límites EPA son mayores, dado que implica que más vehículos deban reparar su convertidor catalítico para cumplir con límites de emisión más exigentes.

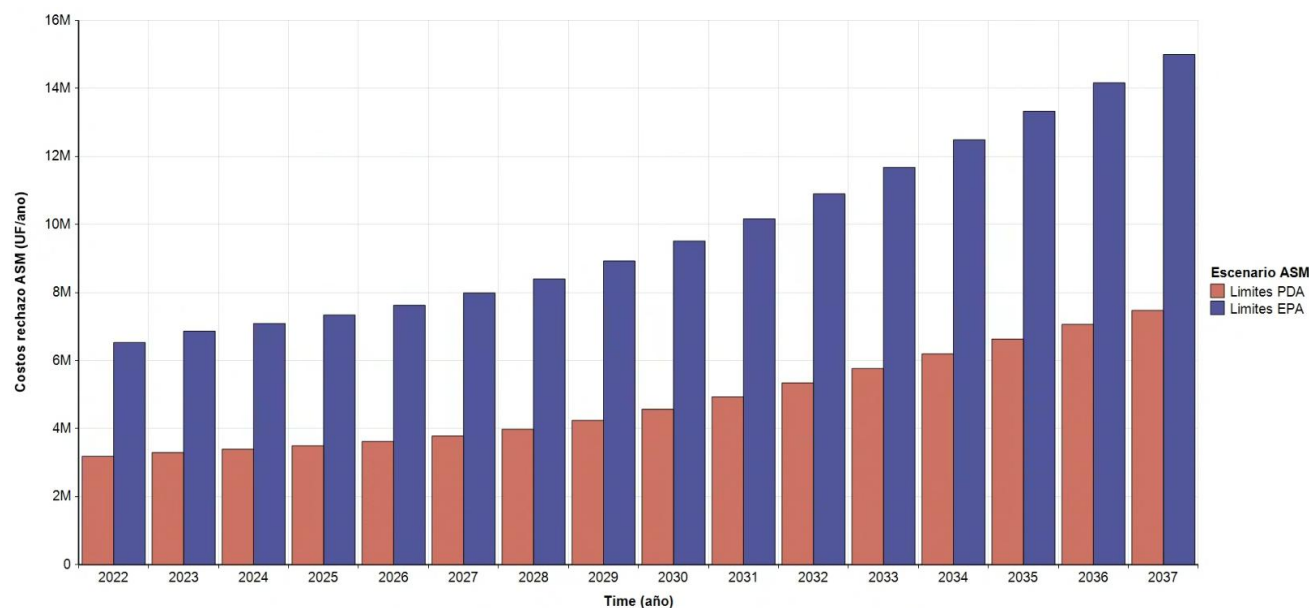


Figura 5-3 Proyección de costos asociados a la implementación de límites EPA [UF/año]

Fuente: Elaboración propia

El VPN de los costos asociados a la implementación de los nuevos límites EPA alcanza los UF MM 93, duplicando el valor asociado a los límites actuales.

5.3.2 MMFR – Estándar emisión Stage V

El análisis de costos asociados a la transición de Tier 4F a Stage V se basa en el estudio *“Costs of emission reduction technologies for diesel engines used in non-road vehicles and equipment”* (Tim Dallmann et al., 2018), el cual evalúa costos de inversión en tecnologías de control de emisiones, sin considerar costos operacionales ni de mantención.

La búsqueda bibliográfica sobre costos de operación y mantención no arrojó información consistente, probablemente debido a la reciente comercialización de esta tecnología tras la entrada en vigor de la Normativa Europea de Emisiones para Maquinaria (NRMM) 2016/1628/CE.

Dado que Stage V es un estándar relativamente nuevo, aún no existen estudios públicos detallados que evalúen sus costos operativos a largo plazo, lo que limita el acceso a datos concretos sobre su impacto económico en el mantenimiento y uso de la maquinaria. No obstante, la exigencia de Stage V implica un mayor uso de AdBlue y la obligatoriedad de Diésel de Ultra Bajo Azufre (ULSD), lo que podría impactar costos de operación y requerir modificaciones en la red de abastecimiento. Stage V ha generalizado el uso de SCR, aumentando el consumo de AdBlue, especialmente en generadores y compresores. Además, su manejo inadecuado puede afectar el sistema SCR, lo que añade costos adicionales.

El modelado de costos en el estudio clasifica motores por potencia y estándar, considerando tecnologías como la recirculación de gases (EGR), la reducción catalítica selectiva (SCR) y los filtros de partículas diésel (DPF). Los costos incrementales de la transición a Stage V fueron estimados a partir de datos de certificación de motores de la EPA y otras fuentes, evaluando su impacto en la sostenibilidad y competitividad de los fabricantes.

Para actualizar los costos de inversión a 2024, se aplicó un ajuste del 45,3%, basado en la variación acumulada del Índice de Precios al Consumidor (IPC) de Chile entre 2017 y 2024, utilizando valores del dólar obtenidos del Servicio de Impuestos Internos (SII).

La Tabla 5-4 muestra los costos de inversión para motores de 19 a 560 kW, evidenciando un aumento exponencial con la potencia instalada. Estos valores se emplean como referencia para estimar el costo por máquina en la implementación de una normativa que exija Stage V, tomando Tier 4F como caso base.

Tabla 5-4 Costos de inversión Tier 4F/Stage V

Potencia [kW]	Costo [USD] 2017	Costo [USD] 2024	Costo [CLP] 2024	UF 2024
0 - 8	\$6	\$9	\$5.658	0
8 - 19	\$6	\$9	\$5.658	0
19 - 37	\$215	\$312	\$202.730	5
37 - 56	\$285	\$414	\$268.734	7
56 - 75	\$657	\$955	\$619.504	16
75 - 130	\$766	\$1.113	\$722.283	19
130 - 225	\$1.088	\$1.581	\$1.025.906	27
225 - 450	\$1.405	\$2.041	\$1.324.814	35
450 - 560	\$2.607	\$3.788	\$2.458.213	64
560	\$2.607	\$3.788	\$2.458.213	64

Fuente: Elaboración propia en base a Tim Dallmann et al., 2018

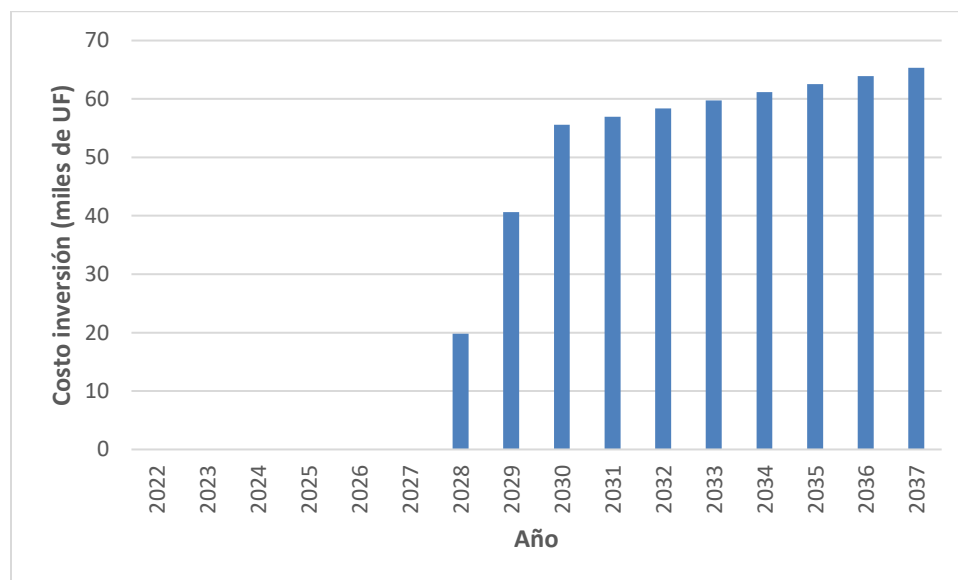
Para el cálculo del costo total de inversión de la normativa propuesta se calcula el número de maquinarias que serían afectadas por la misma. Para esto, se calculan las máquinas que en el caso base serían importadas con motor Tier 4f pero que en la propuesta de normativa serían importadas Stage V. En la Tabla 5-5 se presenta la maquinaria afectada anualmente.

Tabla 5-5 Maquinaria afectada por propuesta normativa

Año	Máquinas
2022	0
2023	0
2024	0
2025	0
2026	0
2027	0
2028	1.058
2029	2.173
2030	2.972
2031	3.047
2032	3.123
2033	3.197
2034	3.272
2035	3.347
2036	3.423
2037	3.498
Total	29.110

Fuente: Elaboración propia

Con esta información, se calcula el costo anual de inversión de la medida propuesta mostrado en la Figura 5-4.


Figura 5-4 Costos anuales de inversión [UF]

Fuente: Elaboración propia

Estos valores se llevan a valor presente, obteniéndose un costo total de inversión de **UF 270.000**.

6. Determinación del potencial de reducción de emisiones de las medidas propuestas, con una proyección de 15 años a partir del año base 2022

La determinación del potencial de reducción de emisiones de las medidas propuestas y su proyección se realizó en coherencia con lo indicado en la “Guía Metodológica Para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire”(MMA, 2013) , publicada por el MMA en 2013 en base al trabajo realizado por GreenLab Dictuc.

6.1 Metodología para determinar los potenciales de reducción de emisiones de las medidas propuestas

Para la estimación del potencial de reducción de las nuevas medidas propuestas se utiliza la herramienta desarrollada en la Sección 4.3. A continuación, se presenta la metodología utilizada para estimar la reducción de emisiones que se lograría al implementar las nuevas medidas propuestas.

6.1.1 Modificación Artículo 9 – Límites de emisión EPA

En la Sección 4.2.2 se detalla la metodología de evaluación del Artículo 9 considerando los límites de emisión EPA. Este análisis incluye la estimación del porcentaje de reducción de emisiones que estaría asociado a la reparación de los vehículos que se rechazarían con los nuevos límites. Estos porcentajes de reducción se aplicaron a la proyección de emisiones estimada en la Sección 4.4.1 con el propósito de estimar la reducción de emisiones que generaría la disminución de los límites de emisión del Artículo 9. En la Figura 6-1 se presenta la proyección del parque de vehículos utilizado para evaluar la medida, correspondiente a vehículos livianos y medianos, mientras que en la Figura 6-2 se presenta el parque de vehículos rechazados por no cumplir los límites de emisión de la EPA, propuestos como nueva medida, y los límites actuales del PPDA.

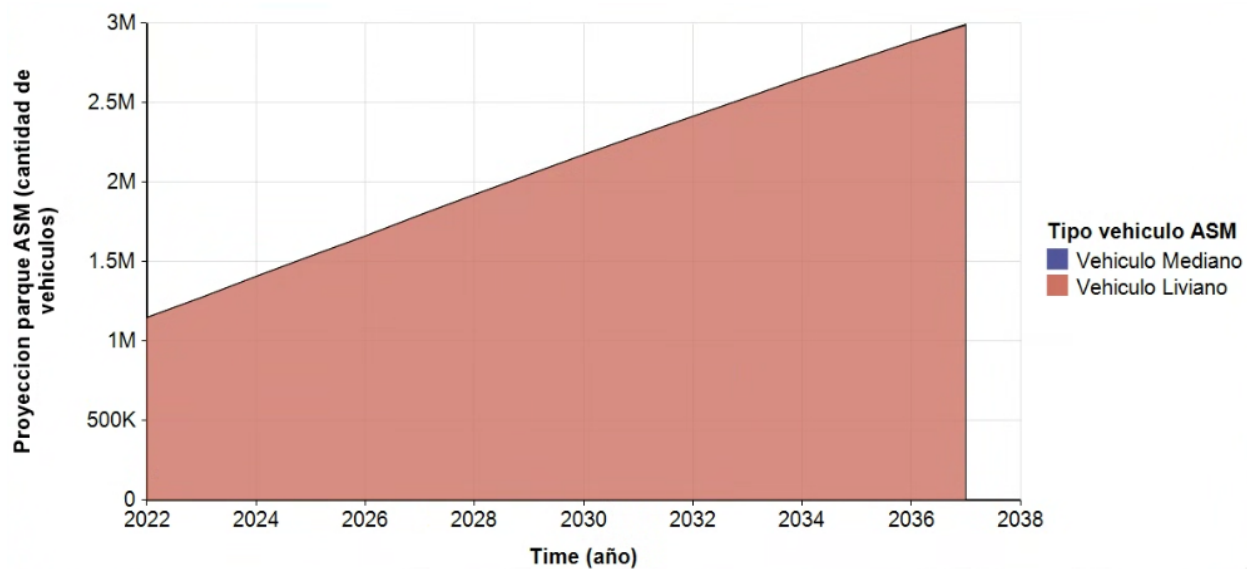


Figura 6-1 Parque de vehículos medianos y livianos proyectado, 2022-2038

Fuente: Elaboración propia

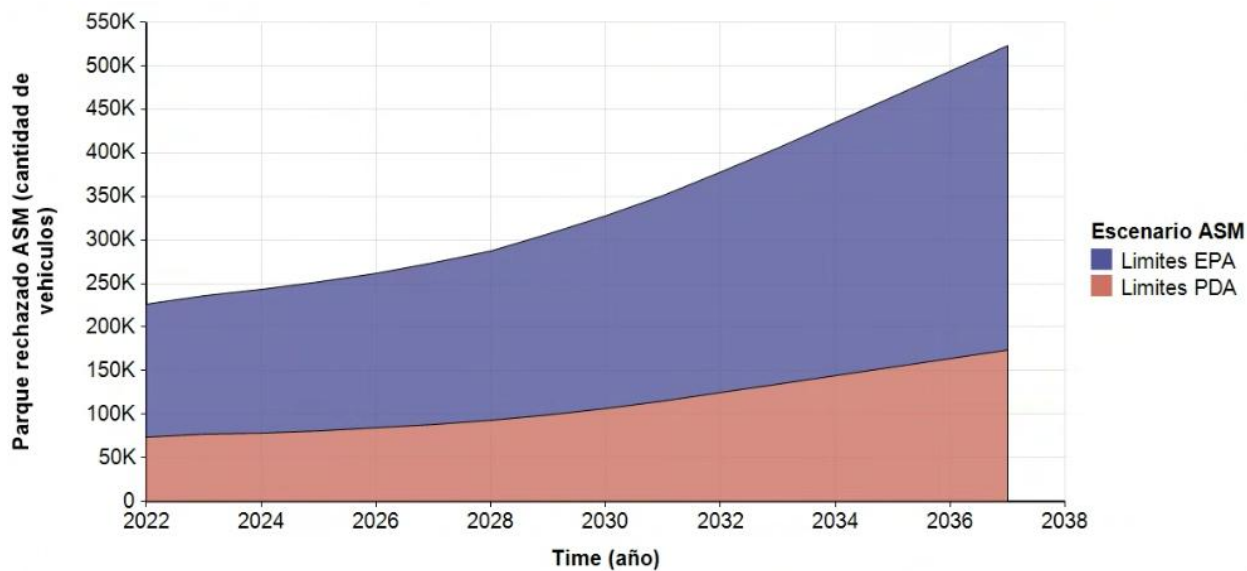


Figura 6-2 Parque de vehículos rechazados por límites de emisión EPA y límites actuales PPDA

Fuente: Elaboración propia

6.1.2 Stage V al 2030 para MMFR

Para determinar el potencial de reducción de la medida propuesta se calcularon las emisiones modificando la distribución de las importaciones en relación al estándar normativo, de acuerdo a lo presentado en la Sección 5.2. Luego, se calcula la diferencia de las emisiones de ambos escenarios.

6.2 Resultados de potenciales de reducción de emisiones con proyección a 15 años

Se proyectaron los potenciales de reducción de emisiones de los distintos escenarios de cada medida, considerando un horizonte de 15 años a partir del año base 2022. Se siguió la metodología de proyección presentada en la Sección 4.4.

6.2.1 Modificación Artículo 9 – Límites de emisión EPA

En la Figura 6-3, Figura 6-4 y Figura 6-5 se presenta la proyección de la reducción de emisiones de NO_x, CO y HC, respectivamente, que se lograría por la implementación de los nuevos límites EPA, y si se mantienen los actuales límites del PPDA. Se puede observar que, tal como se esperaba, al disminuir los límites de emisión exigidos a los límites EPA se alcanza una mayor reducción de emisiones de todos los contaminantes analizados.

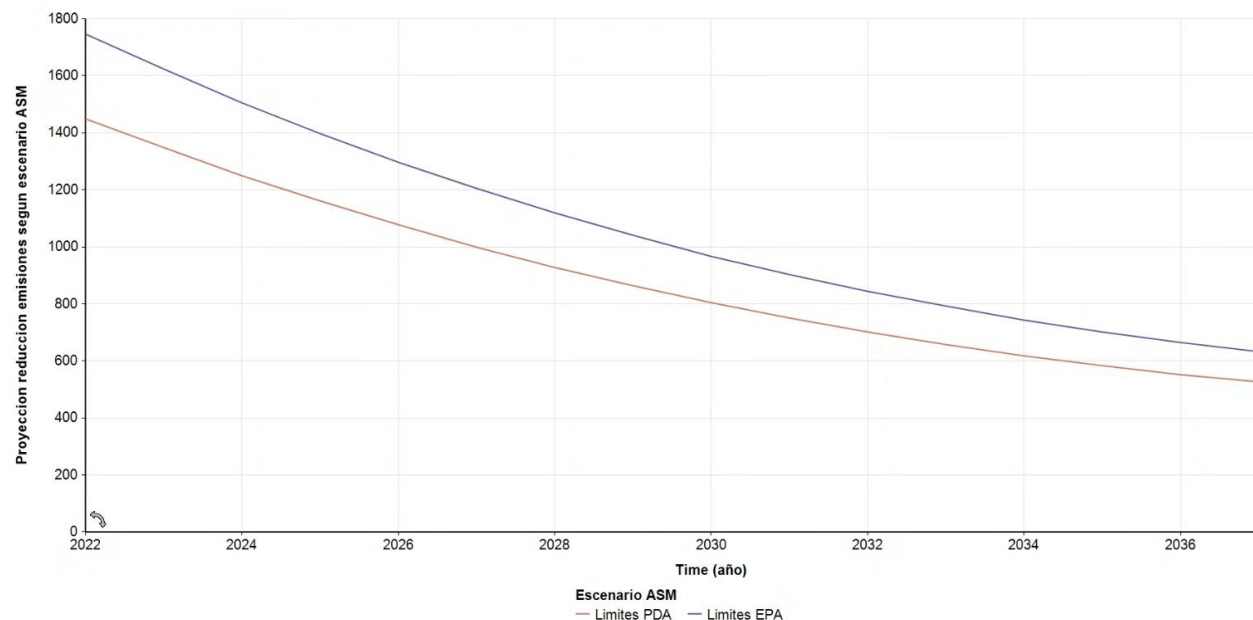


Figura 6-3 Proyección de la reducción de emisiones de NO_x [ton/año] – Artículo 9

Fuente: Elaboración propia

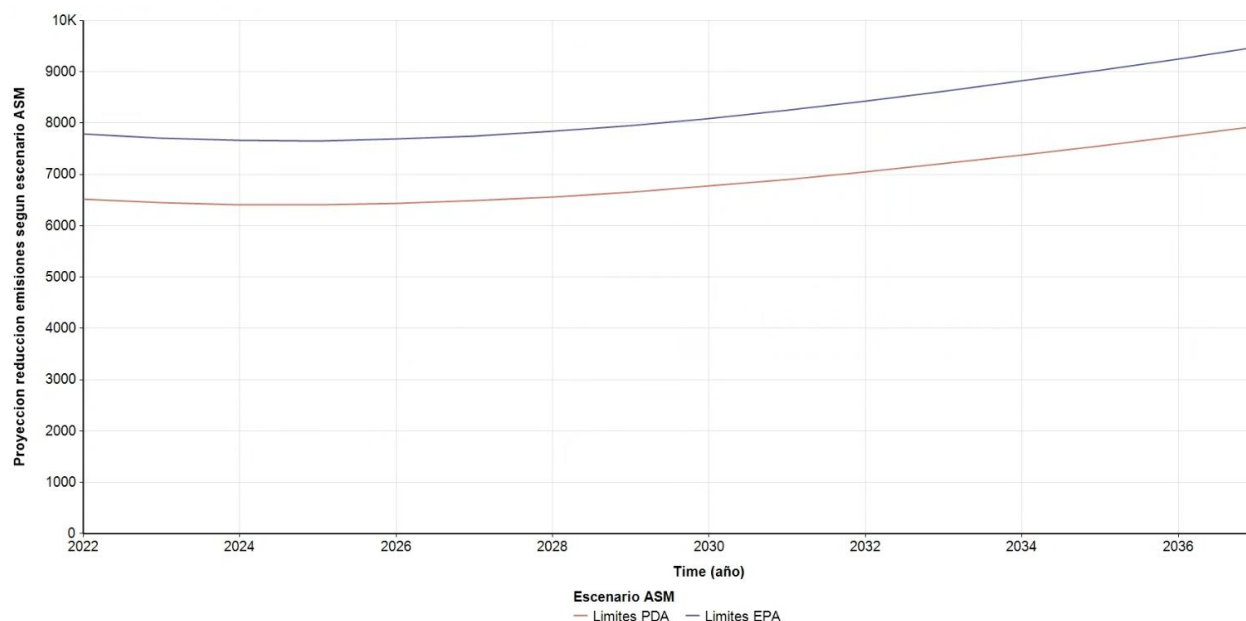


Figura 6-4 Proyección de la reducción de emisiones de CO [ton/año] – Artículo 9

Fuente: Elaboración propia

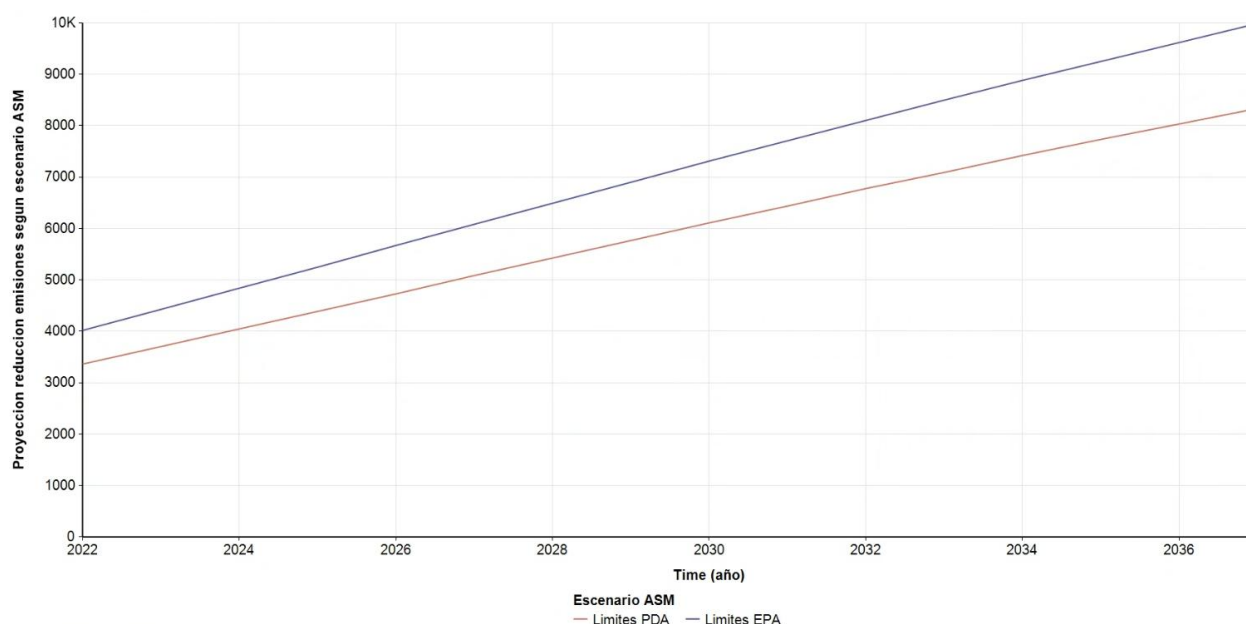


Figura 6-5 Proyección de la reducción de emisiones de HC [ton/año] – Artículo 9

Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Stage V al 2030 para MMFR

La medida propuesta solo reduciría emisiones de material particulado (MP), ya que es el único contaminante con un límite de emisión más estricto en Stage V en comparación con Tier 4F, como

se observa en las Figura 6-6, Figura 6-7, Figura 6-8 y Figura 6-9 para los contaminantes HC, CO, NOx y MP, respectivamente.

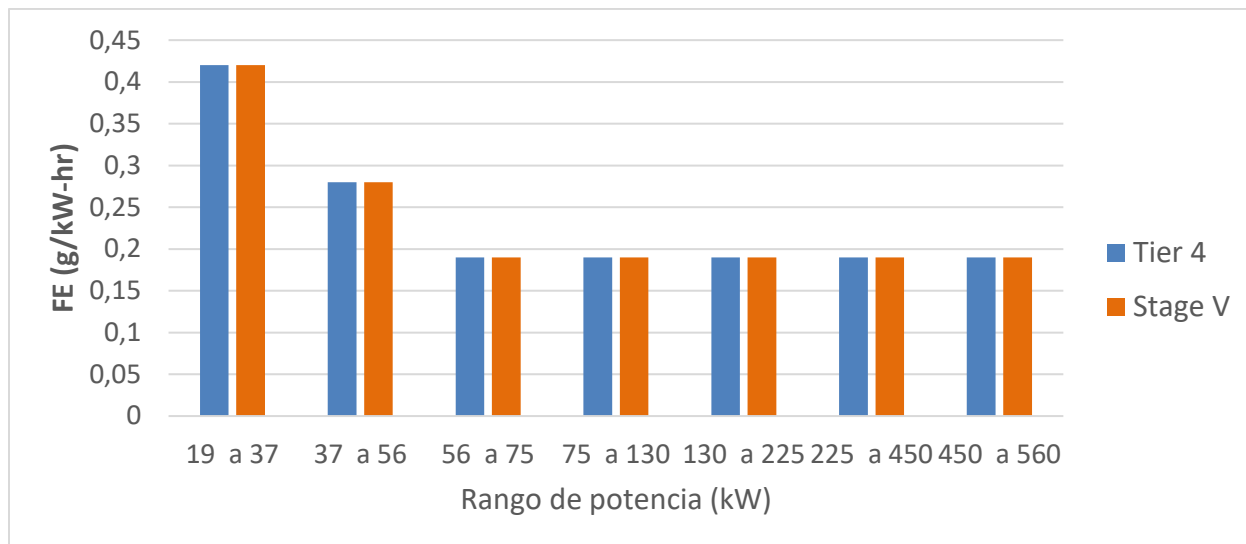


Figura 6-6 Factores de emisión para Tier 4f y Stage V para HC.

Fuente: Elaboración propia

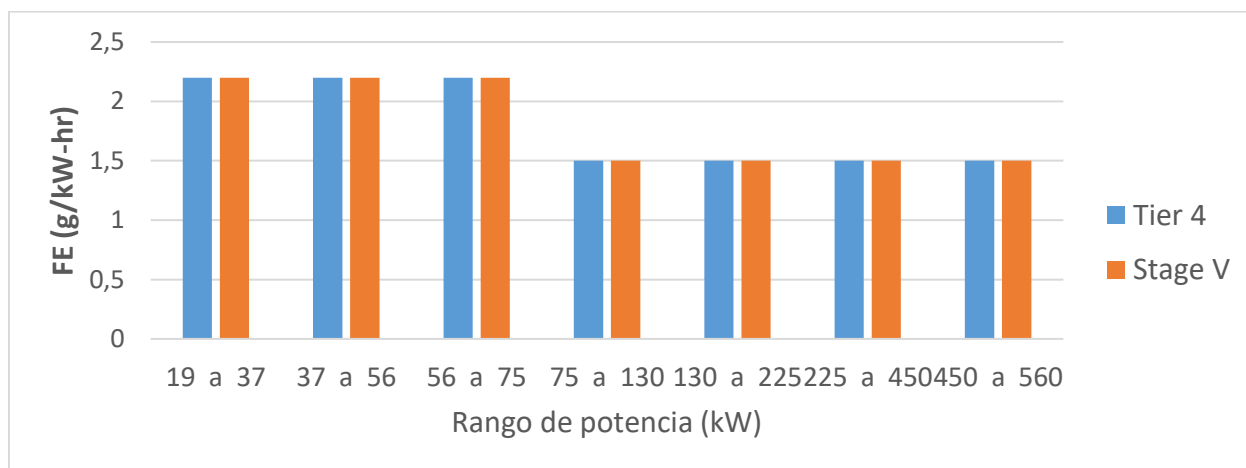


Figura 6-7 Factores de emisión para Tier 4f y Stage V para CO

Fuente: Elaboración propia

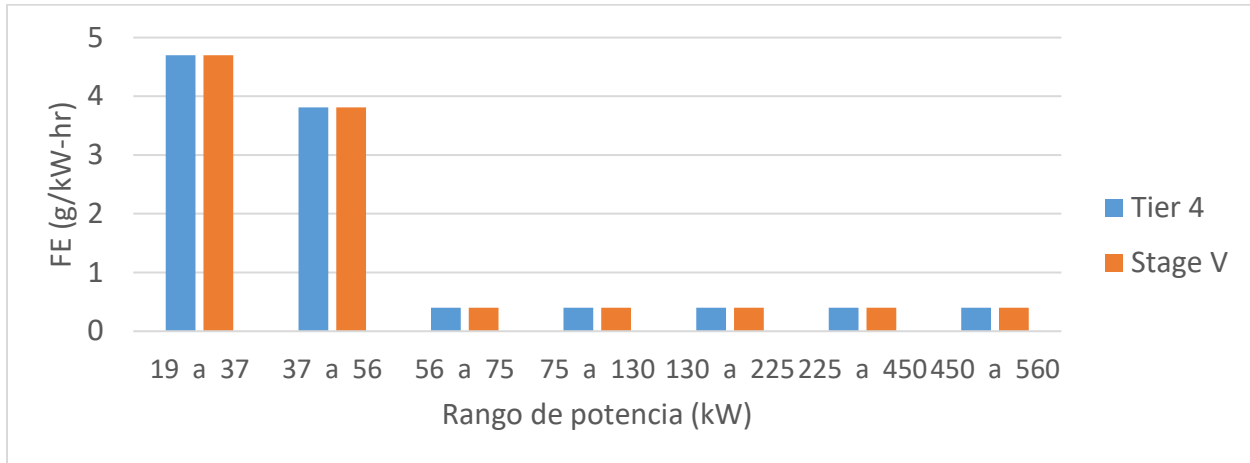


Figura 6-8 Factores de emisión para Tier 4f y Stage V para NOx

Fuente: Elaboración propia

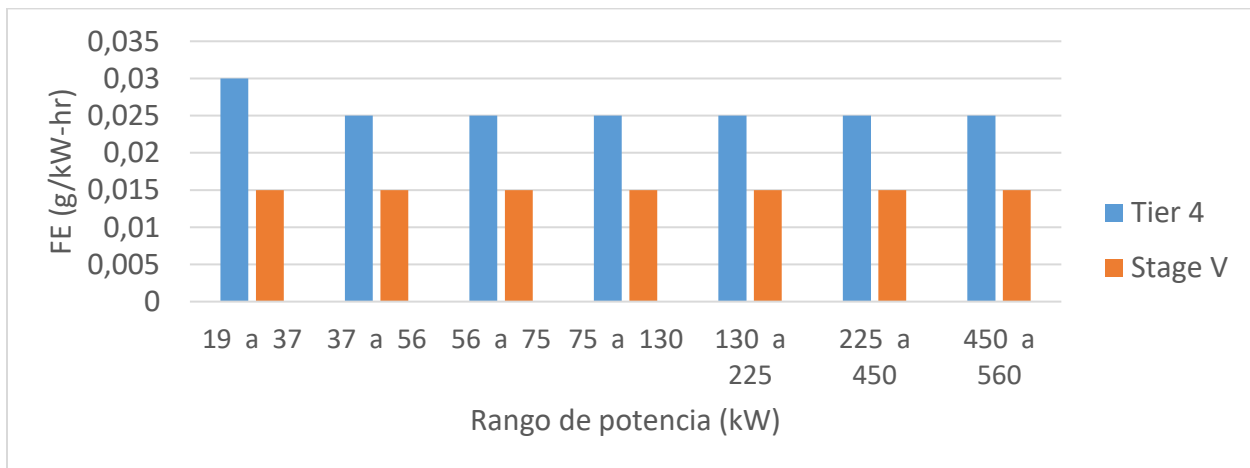


Figura 6-9 Factores de emisión para Tier 4f y Stage V para MP.

Fuente: Elaboración propia

Así, la Figura 6-10 presenta la comparación de emisiones de MP entre el caso base y la propuesta normativa, evidenciando el impacto de la medida en la reducción de este contaminante.

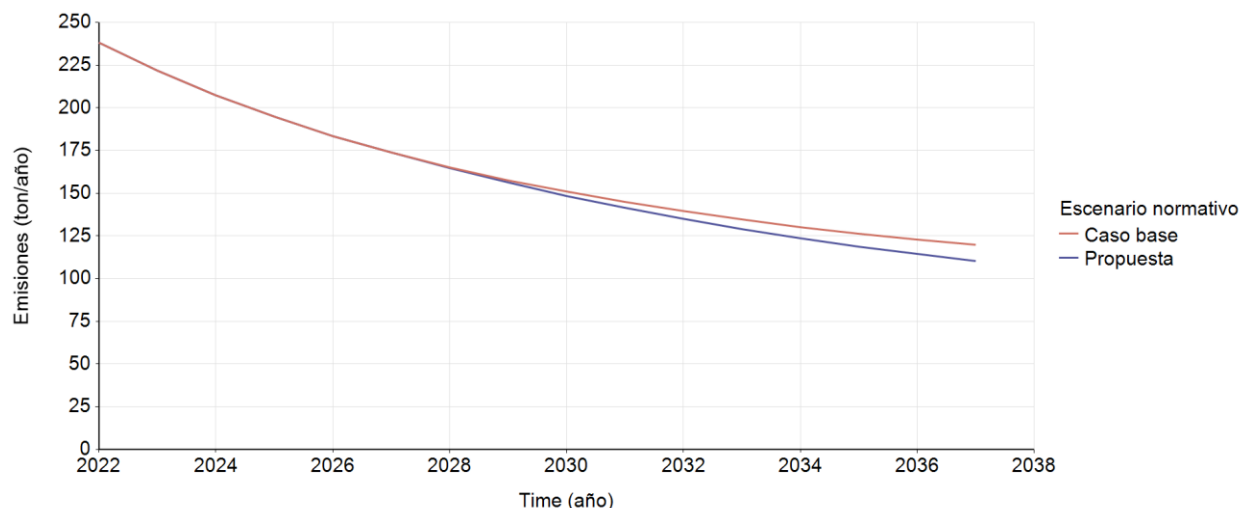


Figura 6-10 Emisiones de MP para los distintos escenarios.

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre ambas curvas representa el potencial de reducción de emisiones asociado a la medida propuesta, cuantificado en la Tabla 6-1. En total, se estima una reducción de 54 toneladas, equivalente al 2,1% en comparación con el escenario base.

Tabla 6-1 Potencial de reducción de emisiones de propuesta normativa MMFR [ton/año]

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	TOTAL
AGRICOLA-FORESTAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	4
CONSTRUCCION	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	4	4	5	6	6	8	40
INDUSTRIA	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
MINERIA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
TOTAL	0	0	0	0	0	0	1	3	3	4	6	5	6	8	8	10	54

Fuente: Elaboración propia

La comparación entre Stage IV y Stage V muestra que, aunque los límites de HC, CO y NO_x se mantienen sin cambios, Stage V endurece los límites de PM y establece, por primera vez, un control sobre el número de partículas (PN). En particular, reduce los valores permitidos de PM y regula la cantidad total de partículas emitidas en diversas categorías de motores.

La disminución de material particulado es crucial en términos de salud pública y toxicología ambiental, ya que la exposición a partículas finas y ultrafinas está vinculada a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente en entornos urbanos e industriales.

En el análisis comparativo entre el Decreto 39 y la propuesta de Stage V para importaciones a partir de 2030, la reducción de partículas debe evaluarse no solo desde un enfoque cuantitativo,

sino también considerando su impacto toxicológico. Aunque la reducción de emisiones puede parecer limitada en términos absolutos, su efecto sobre la salud es significativo, lo que justifica la necesidad de estudios adicionales para evaluar su relevancia en distintos sectores y condiciones operativas.

6.3 Análisis y priorización de medidas propuestas en términos de costos, potencial de reducción y dificultad de implementación

A partir de la estimación del potencial de reducción (ver Sección 6.2 y los costos asociados a cada medida (ver Sección 5.3), se estima la costo-eficiencia de las medidas propuestas mediante la Ecuación 16, considerando todo el periodo de evaluación.

Ecuación 16 Costo eficiencia

$$\text{Costo} - \text{eficiencia} \left[\frac{\text{MM UF}}{\text{ton reducida}} \right] = \frac{\text{VPN Costo [MM UF]}}{\text{Potencial reducción [ton]}}$$

Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 6-2, permiten analizar cada medida en función de su impacto en la reducción de emisiones y los costos asociados. Al ser solo dos propuestas evaluadas en el presente estudio, cada una dirigida a una fuente emisora distinta (transporte en ruta y MMFR) y con reducción de emisiones de contaminantes distintos, no se considera pertinente priorizarlas en función de su costo-eficiencia. No obstante, es posible identificar ciertos aspectos relevantes de cada medida, analizándolas de forma independiente.

Dado que la modificación del Artículo 9 afecta al transporte en ruta, su implementación implica costos distribuidos en una amplia flota vehicular (vehículos livianos y medianos), lo que facilita una reducción significativa de emisiones a nivel regional. No obstante, su efectividad dependerá del grado de cumplimiento por parte de los propietarios de vehículos y del sistema de fiscalización en las PRT. Además, es relevante considerar los impactos económicos que podría generar en usuarios que necesiten realizar reparaciones o ajustes tecnológicos para cumplir con la normativa.

Por otro lado, la implementación del estándar de emisión Stage V en MMFR tiene un impacto exclusivo en la reducción de material particulado (MP), ya que es el único contaminante con un límite de emisión más estricto en comparación con Tier 4F. La estimación de costo-eficiencia para esta medida es de 5,22 MM UF/ton de MP reducida, un valor calculado en base a los costos de inversión asociados al recambio de maquinaria. Sin embargo, es importante destacar que estos costos consideran únicamente la adquisición de equipos nuevos y no incluyen otros aspectos relevantes, como costos de operación, mantenimiento, disponibilidad de tecnología y posibles impactos en la productividad del sector.

Tabla 6-2 Costo-eficiencia de medidas propuestas [M UF/ton reducida]

Contaminante	Medidas	
	Límites emisión EPA	Stage V MMFR
NOx	5,41	-
CO	0,70	-
HC	0,82	-
MP	-	5,22

Fuente: Elaboración propia

6.4 Recomendaciones de implementación de las medidas propuestas

En la presente sección se presentan recomendaciones para la implementación de las medidas propuestas, considerando escenarios de gradualidad en la implementación tomando en cuenta impactos económicos, sociales y ambientales, junto con la factibilidad de implementación de las medidas.

6.4.1 Modificación Artículo 9 – Límites de emisión EPA

A continuación, se presentan las recomendaciones para la implementación de los límites de emisión EPA en el Artículo 9 del PPDA.

6.4.1.1 Implementación gradual

Para garantizar una transición efectiva hacia la adopción de los límites de emisión establecidos por la EPA en el Artículo 9 del PPDA RMS, se recomienda una implementación progresiva que permita la adaptación de los actores involucrados y minimice los impactos económicos y sociales. En una primera etapa, se debería realizar un ajuste normativo acompañado de campañas de difusión dirigidas a propietarios de vehículos, talleres mecánicos y plantas de revisión técnica, con el fin de informar sobre los nuevos estándares de emisión y los requisitos de cumplimiento.

En una segunda etapa, los nuevos estándares de emisión deberían aplicarse de manera parcial, comenzando con su exigencia a los vehículos nuevos y aquellos que renueven su revisión técnica. Paralelamente, se podría implementar un programa de inspección en las PRT que permita evaluar el grado de cumplimiento de los límites en el parque vehicular existente, lo que facilitaría realizar ajustes antes de la implementación total de la medida. También sería importante fortalecer el sistema de certificación y monitoreo de emisiones para evitar impactos económicos desproporcionados en pequeños propietarios de vehículos, asegurando que las exigencias sean graduales y proporcionales a la capacidad de cumplimiento de los distintos segmentos del parque vehicular.

Finalmente, en una tercera etapa, los límites de emisión de la EPA deberían ser exigidos de manera obligatoria para toda la flota vehicular, de forma que cualquier vehículo que no cumpla con la normativa verá rechazada su revisión técnica, lo que impedirá su circulación hasta que realicen las reparaciones necesarias para cumplir con los nuevos estándares. Para facilitar la transición y evitar impactos negativos en los propietarios de vehículos más antiguos, se

recomienda establecer programas de apoyo que faciliten las reparaciones requeridas, así como evaluar la posibilidad de otorgar plazos adicionales de cumplimiento para ciertos segmentos del parque vehicular, especialmente aquellos de uso comercial o que pertenezcan a sectores de menor capacidad económica.

6.4.1.2 Monitoreo y fiscalización

Para asegurar el cumplimiento de la medida y maximizar su efectividad en la reducción de emisiones, es fundamental fortalecer los mecanismos de monitoreo y fiscalización. En este sentido, se recomienda mejorar los sistemas de control en las PRT mediante auditorías periódicas que permitan verificar la correcta aplicación de los nuevos límites de emisión. Junto con esto, la instalación de sensores de medición en tiempo real en puntos estratégicos de la ciudad facilitaría la detección de vehículos altamente contaminantes, permitiendo una fiscalización más efectiva.

El uso de tecnologías de monitoreo remoto podría complementar estos esfuerzos, a través de la implementación de sistemas de detección de emisiones en circulación (RSD), que permitirían identificar vehículos que superen los límites permitidos sin necesidad de una inspección presencial. Además, el cruce de datos con registros de PRT ayudaría a detectar patrones de incumplimiento y a aplicar medidas correctivas de manera más eficiente.

Dado que el principal mecanismo de cumplimiento de la medida es el rechazo de la revisión técnica en caso de superación de los límites de emisión, es fundamental garantizar que el sistema de inspección sea riguroso y transparente. Para ello, se recomienda mejorar la capacitación del personal de las PRT y asegurar la correcta calibración de los equipos de medición, minimizando así errores en la evaluación de emisiones. También sería pertinente evaluar la posibilidad de establecer mecanismos de apelación para los propietarios de vehículos que consideren que su inspección ha sido realizada de manera incorrecta, asegurando así un proceso justo y confiable.

6.4.2 Stage V al 2030 para MMFR

La transición a Stage V para maquinaria móvil fuera de ruta en Chile hacia 2030 requiere una implementación estratégica para optimizar su efectividad y minimizar impactos económicos y operacionales. A continuación, se presentan las recomendaciones clave para su ejecución.

6.4.2.1 Implementación gradual

Se recomienda establecer un cronograma progresivo, con un anuncio anticipado que permita a los importadores ajustar su oferta y a los compradores adaptar sus decisiones de inversión. En la Unión Europea, la transición a Stage V comenzó en 2019 y fue facilitada por el uso de tecnologías como filtros de partículas (DPF) y reducción catalítica selectiva (SCR), lo que permitió una reducción significativa de emisiones sin afectar la disponibilidad de maquinaria.

Para minimizar impactos en el sector industrial, Suiza implementó incentivos para la importación de maquinaria limpia y medidas de financiamiento que promovieron la modernización del parque

de maquinaria móvil. En Chile, se podría explorar la aplicación de reducciones arancelarias o subsidios temporales para acelerar la renovación del parque sin generar sobrecostos excesivos para los operadores.

Dado que en la implementación del Decreto 39 algunos sectores, como el agrícola, manifestaron preocupaciones que llevaron a la postergación de su aplicación a tractores agrícolas, es clave desarrollar una estrategia de concientización y comunicación, asegurando que los actores involucrados comprendan los beneficios ambientales, de salud y operacionales de la transición a Stage V.

6.4.2.2 Adecuación de infraestructura de abastecimiento

La implementación de Stage V en Chile requiere ajustes en la infraestructura de abastecimiento de Diésel de Ultra Bajo Azufre (ULSD) y AdBlue, esenciales para el funcionamiento de la tecnología de control de emisiones en maquinaria móvil fuera de ruta. La disponibilidad y distribución de estos insumos serán clave para el éxito de la normativa y la continuidad operativa del sector.

La implementación de Stage V en Chile exige asegurar la disponibilidad de ULSD con menos de 10 ppm de azufre y la expansión del uso de AdBlue, cuya distribución en zonas remotas aún es limitada. Es fundamental evaluar su cobertura y coordinar con distribuidores para garantizar su acceso, especialmente en sectores mineros y agrícolas, tomando como referencia la experiencia de la Unión Europea y Suiza. Además, la capacitación en su correcto almacenamiento y manejo es clave para prevenir fallos en los sistemas SCR y asegurar una transición eficiente.

6.4.2.3 Monitoreo y fiscalización

El Decreto 39, que regula las emisiones de maquinaria móvil en Chile, establece procedimientos de verificación y control que pueden adaptarse a la implementación de Stage V. La Resolución Exenta N° 2207 de la SMA exige que fabricantes, distribuidores e importadores presenten un certificado de cumplimiento de emisiones antes de la importación, validado por la Superintendencia del Medio Ambiente. La nueva normativa puede aprovechar estos mecanismos de fiscalización, reforzados por el Sistema de Seguimiento Atmosférico (SISAT), el cual complementa el control mediante un proceso estructurado en tres etapas, facilitando la supervisión de las importaciones y asegurando el cumplimiento de los estándares de emisiones establecidos.

7. Conclusiones

El presente informe corresponde a la entrega final del estudio que tiene por objetivo general determinar medidas de reducción de emisiones de material particulado, sus precursores y otros gases para el sector transporte en ruta y fuera de ruta, además de generar los insumos necesarios para llevar a cabo el Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) sobre estas medidas, en el marco de la actualización del PPDA RMS. Para ello, se realizó un análisis cualitativo de las medidas actuales del PPDA RMS a partir del estudio “Revisión de las Medidas del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana de Santiago – PPDA” (ECOS, 2023). Además, se sistematizó información relevante respecto a costos, eficiencias de abatimiento y la estimación de los potenciales de reducción del estudio “Generación de Antecedentes para la Evaluación Técnica-Económica a la Aplicación de Medidas de Control para Fuentes Móviles en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA)” (Geasur, 2015).

Adicional a lo anterior, se recopiló información cuantitativa de los artículos 8, 9 y 120 del PPDA actual. El análisis de la medida de Zona de Baja Emisión (ZBE) en la RM, que corresponde al artículo 8, reveló un incremento en la fiscalización mediante tecnología de cámaras, con un aumento del 60% en el número de infracciones detectadas entre 2022 y 2023. Sin embargo, la metodología de fiscalización basada en la detección exclusiva de incumplimientos impide un diagnóstico preciso sobre la efectividad de la medida. Respecto a la renovación del parque vehicular, el análisis econométrico no evidenció un cambio positivo en la tasa de adquisición de camiones nuevos en la RM en comparación con otras regiones, sugiriendo una eficacia limitada de la ZBE en la aceleración de la transición tecnológica vehicular.

Respecto al análisis del artículo 9, la base de datos de las PRT permitió evaluar el cumplimiento de los límites de emisión de CO, HC y NO en vehículos livianos y medianos. Se identificó que el porcentaje de rechazo por emisiones ha disminuido progresivamente previa a la aplicación del artículo. Con la entrada en vigencia de esta medida el año 2019, las tasas de rechazo volvieron a aumentar alcanzando casi el doble, mostrando luego un comportamiento a la baja. Las tasas de rechazo de vehículos aumentan con la antigüedad y el año de modelo, especialmente en vehículos con más de 10 años. Por otro lado, al analizar los porcentajes de reducción en las emisiones se observan diferencias según el tipo de contaminante, siendo el NOx el gas que mayor reducción promedio presenta, lo que sugiere que es más sensible a reparaciones de los vehículos.

El impacto de la restricción vehicular en la RM (artículo 120) fue evaluado a través del análisis de la antigüedad del parque vehicular y su renovación en comparación con regiones sin esta medida. El análisis del período 2019-2022 muestra una tendencia positiva en la renovación tecnológica del parque vehicular en la RM, con un aumento en la cantidad de vehículos con certificación Euro VI y una reducción de aquellos con estándar Euro I. Además, a diferencia de otras regiones del país, en la RM se observa una disminución progresiva de vehículos Euro IV y Euro V, lo que sugiere

que la medida ha contribuido a acelerar la adopción de tecnologías menos contaminantes en esta zona.

El estudio también evaluó escenarios adicionales para mejorar la eficacia del PPDA. El primer escenario corresponde a la modificación de los límites de emisión en el Artículo 9, cuya implementación de límites finales de la EPA duplica las tasas de rechazo en algunas categorías como los vehículos livianos comerciales y medianos. Al comparar el escenario actual con límites más estrictos se observó que la reducción de emisiones totales pasa de 10% a 25% en el caso del HC, 15% a 29% para el CO, y 17% a 24% para el NO.

La segunda propuesta corresponde a la actualización de la norma de emisiones para MMFR mediante la adopción del estándar Stage V, lo que podría generar una reducción de 54 toneladas de MP para todo el periodo de evaluación (2021 a 2037), equivalente al 2,1% en comparación con el escenario base.

El análisis cuantitativo realizado indica que, si bien las medidas actuales han generado algunos avances en la reducción de emisiones del sector transporte, su eficacia podría mejorarse mediante ajustes normativos y la implementación de nuevas estrategias. El fortalecimiento de la fiscalización es un elemento clave para potenciar el impacto del PPDA RMS en la mejora de la calidad del aire en la región.

8. Bibliografía

- CALAC+. (2020). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE MAQUINARIA MÓVIL NO DE CARRETERA*.
- CALAC+. (2021a). *Inventario Nacional y Proyecciones de Emisiones de Maquinaria Móvil Fuera de Ruta*.
- CALAC+. (2021b). *Manual de HEMAQ+ Herramienta para el Análisis del Impacto Económico y Ambiental de la Migración a Normas de Emisiones para Maquinaria Móvil No de Carretera (Non-Road)*.
- ECOS. (2023). *Informe Final Revisión de las medidas del PPDA Región Metropolitana*. www.ecos-chile.com
- EMEP/EEA. (2019). 1.A.3.b Road Transport. In *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2019* (Vol. 53, Issue 9).
- EPA. (2010a). Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition. *EPA-420-R-10-018. NR-009d. U.S. Environmental Protection Agency*, 1–141.
- EPA. (2010b). *Median Life , Annual Activity , and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling*. 1–47.
- Fardella, C., Barahona, N., Montero, J. P., & Sepúlveda, F. (2023). On the geography of vintage-specific restrictions. *Resource and Energy Economics*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2023.101405>
- GEASUR. (2015). *Generación de antecedentes para la evaluación técnica-económica a la aplicación de medidas de control para fuentes móviles en PPDA Región Metropolitana Informe Final*. www.geasur.cl
- Geasur. (2015). *Generación de antecedentes para la evaluación técnico-económica a la aplicación de medidas de control para fuentes móviles en PPDA Región Metropolitana*.
- ICCT. (2018). *COSTS OF EMISSION REDUCTION TECHNOLOGIES FOR DIESEL ENGINES USED IN NON-ROAD VEHICLES AND EQUIPMENT*.
- MMA. (2013). *Guía Metodológica. Para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire*.
- MMA. (2015). *ANÁLISIS GENERAL DE IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DE LA CONVENIENCIA DE ADELANTAR UN AÑO LA ENTRADA EN VIGENCIA DE LA NORMA DE EMISIONES PARA VEHÍCULOS BAJO EL MÉTODO ASM EN REGIONES*. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2015/proyectos/2014_DEA_AGIES_ASM_Regiones.pdf
- MMA. (2017). *Manual para el Desarrollo de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*.
- Montero, J. P., Basso, L., & Valenzuela, P. (2018). *Una restricción vehicular inteligente para la congestión y contaminación de Santiago CAPÍTULO III*.
- MTT. (2023). *Análisis del Parque Vehicular Región Metropolitana*.
- PARTICULAS. (2022). *Inventario de emisiones de maquinaria fuera de ruta para la región Metropolitana*.

SMA. (2024). *FIJA PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS DE FISCALIZACIÓN AMBIENTAL DE PLANES DE PREVENCIÓN Y/O DESCONTAMINACIÓN PARA EL AÑO 2024.*

Tim Dallmann, Francisco Posada, & Anup Bandivadekar. (2018). *COSTS OF EMISSION REDUCTION TECHNOLOGIES FOR DIESEL ENGINES USED IN NON-ROAD VEHICLES AND EQUIPMENT.*
<https://theicct.org/publication/costs-of-emission-reduction-technologies-for-diesel-engines-used-in-non-road-vehicles-and-equipment/>

9. Anexos

9.1 Anexo 1: Renombre de columnas en base de datos SGPRT 2012-2022

Tabla 9-1 Renombre de columnas en base de datos SGPRT 2012-2022

Nombre original del campo	Nombre nuevo del campo
COD_PRT	codigo_planta
PPU	patente
COD_VEHICULO	codigo_vehiculo
COD_COMBUSTIBLE	codigo_combustible
COD_SERVICIO	codigo_servicio
COD_TIPO_SELLO	codigo_sello
COD_TIPO_CERTIFICACION	codigo_certificacion
TARA	tara
PBV	peso_bruto_vehicular
MARCA	marca
MODELO	modelo
ANO_FABRICACION	ano_modelo
KILOMETRAJE	kilometraje
FEC_REVISION	fecha_revision
HORA_INI	hora_revision
RESULTADO_CRT	resultado_revision
RESULTADO_CRT_GASES	resultado_gases
VALOR_HC_STDR5015	VALOR_HC_5015
RESULTADO_HC_STDR5015	RESULTADO_HC_5015
VALOR_CO_STDR5015	VALOR_CO_5015
RESULTADO_CO_STDR5015	RESULTADO_CO_5015
VALOR_NO_STDR5015	VALOR_NO_5015
RESULTADO_NO_STDR5015	RESULTADO_NO_5015
VALOR_HC_STDR2525	VALOR_HC_2525
RESULTADO_HC_STDR2525	RESULTADO_HC_2525
VALOR_CO_STDR2525	VALOR_CO_2525
RESULTADO_CO_STDR2525	RESULTADO_CO_2525
VALOR_NO_STDR2525	VALOR_NO_2525
RESULTADO_NO_STDR2525	RESULTADO_NO_2525
GAS_V_INERCIA_EQUIVALENTE	inercia_equivalente
RESULTADO_HUMO	resultado_humo_visible

Fuente: Elaboración propia

9.2 Anexo 2: Registros cuya clasificación inicial fue corregida manualmente en el análisis cuantitativo del Artículo 9

Tabla 9-2 Cantidad de registros de vehículos cuya clasificación inicial fue corregida manualmente

Tipo de Vehículo (corregido)	Código de categoría vehicular PRT	Categoría vehicular PRT	Cantidad de registros de vehículos*	Porcentaje dentro de la categoría vehicular PRT [%]
Vehículo Liviano Pasajeros	1	AUTOMOVIL	298	0,00%
	2	CAMIONETA (CAP. DE CARGA MENOR A 1.750 KGS.) [B] (A2)	2.410	0,21%
	4	STATION WAGON	1.698	0,05%
	5	JEEP	151	0,09%
	9	MINIBUS PARTICULAR [B] (A2)	15	1,18%
	10	COCHE MORTUORIO	4	0,09%
	16	CASA RODANTE MOTORIZADA (CAP. CARGA MENOR A 1.750 KGS.) [B]	13	2,26%
	118	STATION WAGON [A2]	7	28,00% ⁽¹⁾
	204	TAXI TURISMO	42	0,53%
	205	TAXI BASICO	470	0,14%
	206	TAXI COLECTIVO	307	0,19%
	207	TAXI EJECUTIVO	1	0,00%
	208	AUTO ESCUELA	49	0,84%
Vehículo Liviano Comercial	3	FURGON (CAP. DE CARGA MENOR A 1.750 KGS.) [B]	385	0,10%
Vehículo Mediano	203	MINIBUS	154.44	56,83% ⁽²⁾
	221	CAMIONETA (CAP. DE CARGA MAYOR A 1.750 KGS.) [A2]	873	90,65% ⁽³⁾
	225	FURGON (CAP. DE CARGA MAYOR A 1.750 KGS.) [A2]	671	92,55% ⁽⁴⁾

* Considera todo el periodo analizado (2012-2022) y ambas plantas de revisión técnica (A2 y B)

(1): Se clasificó originalmente como Vehículo Mediano

(2): Se clasificó originalmente como Vehículo Liviano (52,39%) o Vehículo Pesado (4,45%)

(3): Se clasificó originalmente como Vehículo Liviano (46,94%) o Vehículo Pesado (43,72%)

(4): Se clasificó originalmente como Vehículo Liviano (21,93%) o Vehículo Pesado (70,62%)

Fuente: Elaboración propia

9.3 Anexo 3: Categorías vehiculares que se dejaron fuera del análisis cuantitativo del Artículo 9

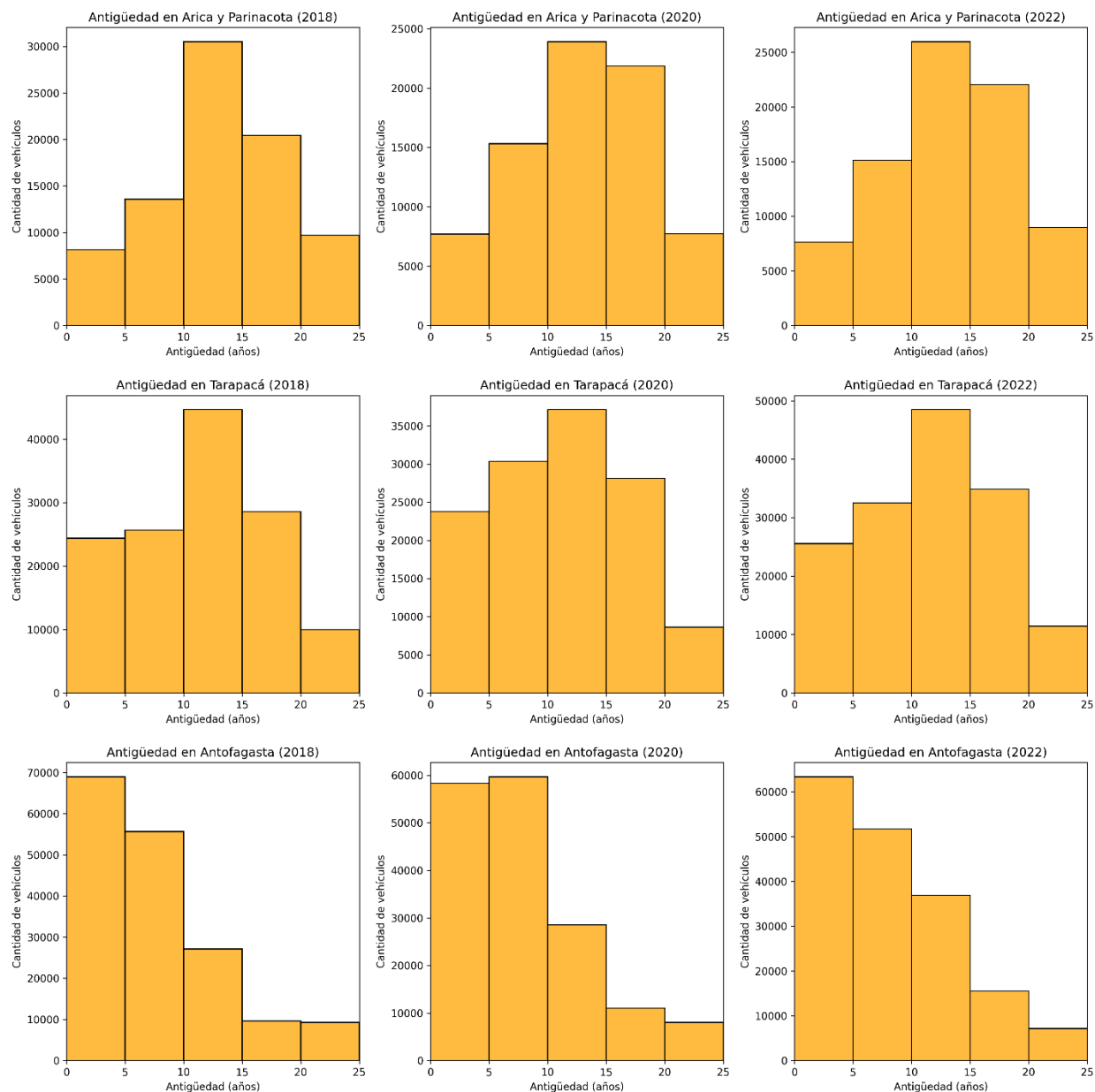
Tabla 9-3 Cantidad de registros y categorías vehiculares que no se incluyeron en el análisis del Artículo 9.

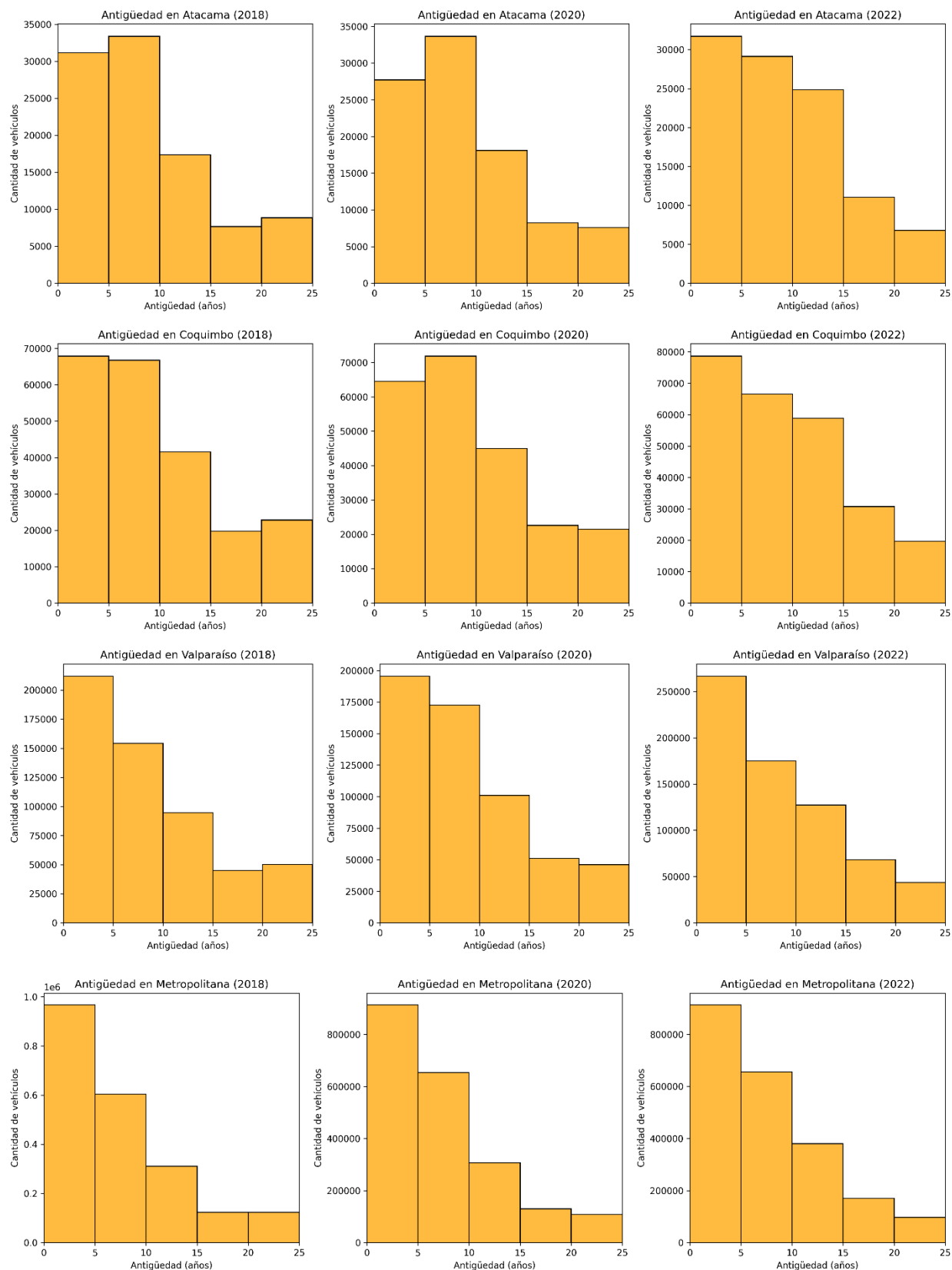
Código de categoría vehicular PRT	Categoría vehicular PRT	Cantidad de registros de vehículos*
6	MOTOCICLETA	635.767
7	TRICICLO MOTORIZADO	83
8	REMOLQUE O SEMIREMOLQUE [B]	532
11	BUGGI	247
12	CUATRIMOTO	1.314
20	MOTOCICLETA (ANTIGUO O HISTORICO)	9
101	BUS	40
102	BUS PULLMAN	8
105	BUS LIVIANO (SOLO SERVICIO URBANO)	1
106	BUS MEDIANO (SOLO SERVICIO URBANO)	3
110	BUS CLASE B >= 11 m y < 14 m	7
115	CASA RODANTE MOTORIZADA (CAP. CARGA MAYOR A 1.750 KGS.) [A2]	3.193
116	AMBULANCIA (CAP. CARGA MAYOR A 1.750 KGS.) [A2]	446
117	CARROBOMBA (CAP. CARGA MAYOR A 1.750 KGS.) [A2]	8
222	CAMION	1.120
224	TRACTO CAMION	77
226	REMOLQUE [A2]	2
227	SEMI-REMOLQUE [A2]	22
241	TRACTOR	69
244	PALA MECANICA	1
245	CARGADOR FRONTAL	19
247	RETROEXCAVADORA	26
250	GRUA	141
252	MAQUINARIA INDUSTRIAL	201
253	MAQUINARIA AGRICOLA	34
	Total de registros	643.370

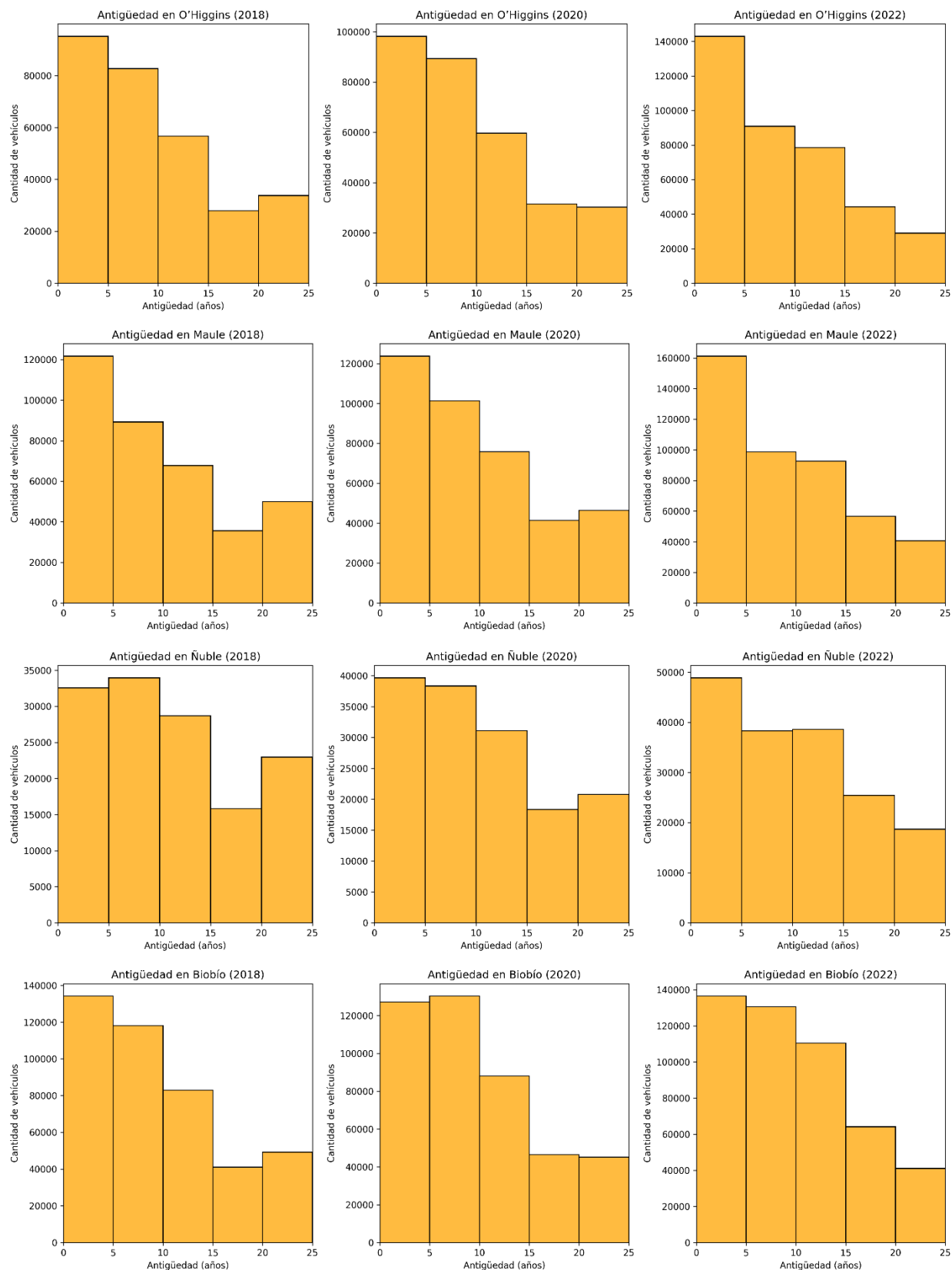
* Considera todo el periodo analizado (2012-2022) y ambas plantas de revisión técnica (A2 y B).

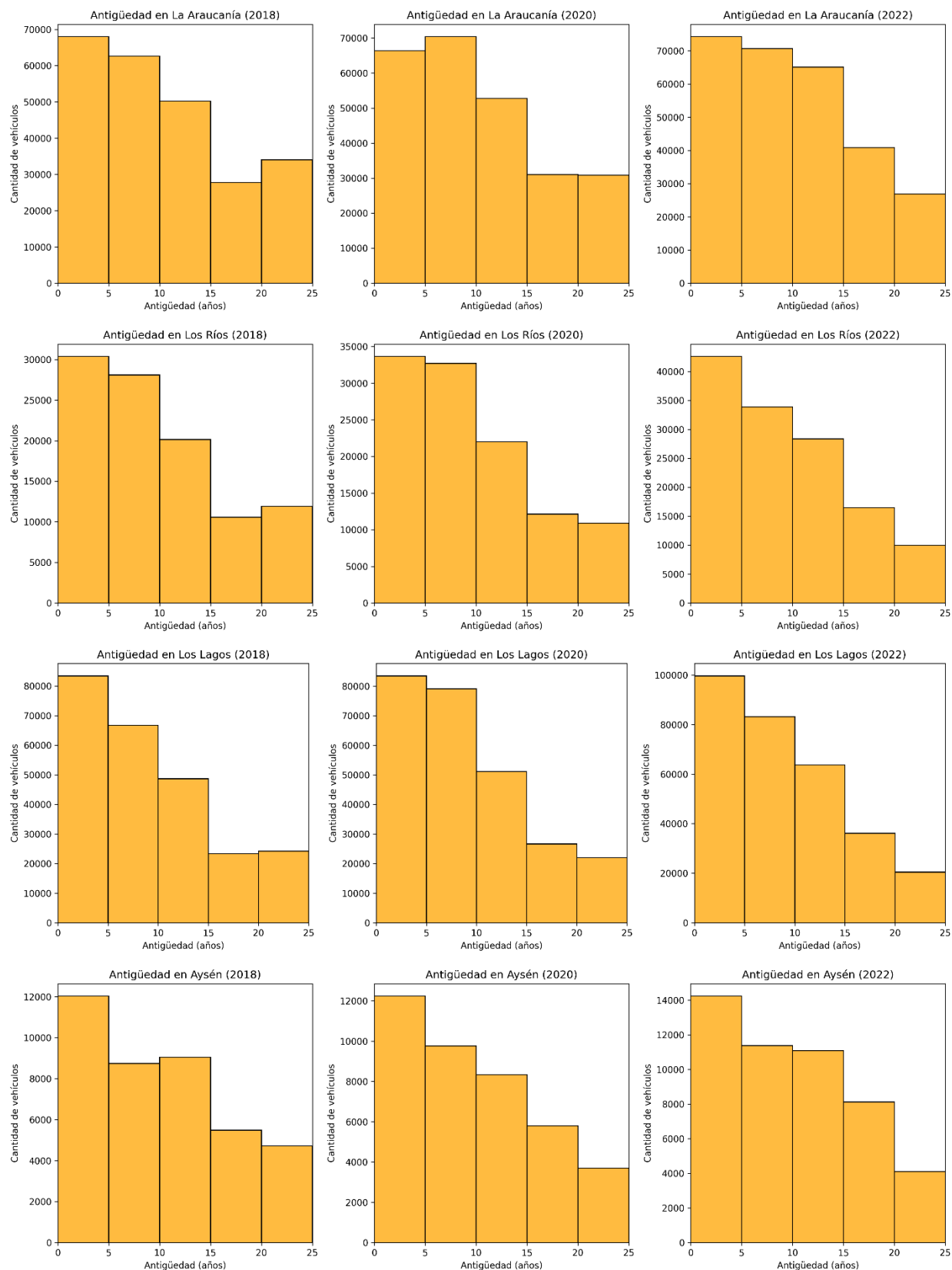
Fuente: Elaboración propia

9.4 Anexo 4: Histogramas de antigüedad del Parque Vehicular INE









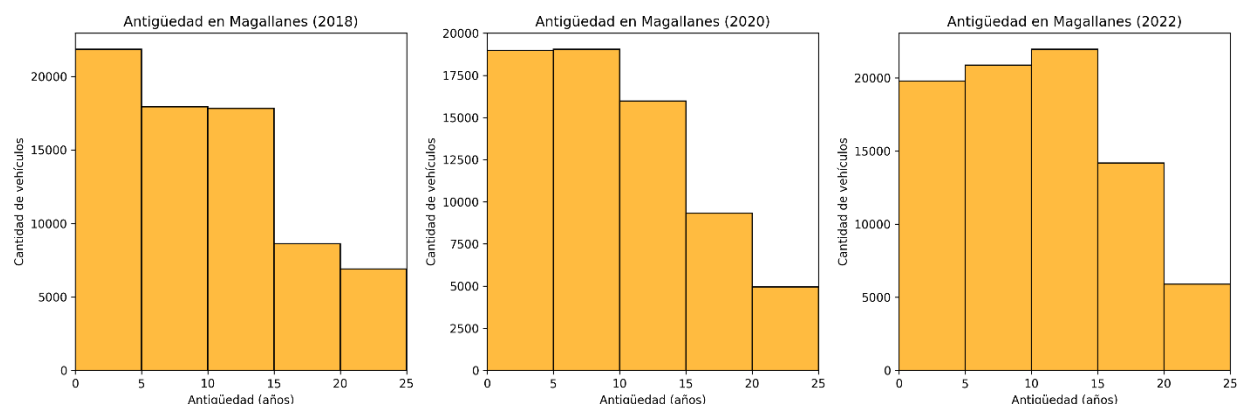


Figura 9-1 Antigüedad del parque vehicular INE por región para los años 2018, 2020 y 2022

Fuente: Elaboración propia a partir de información del INE.

9.5 Anexo 5: Asignación de tecnología al parque vehicular INE

Tabla 9-4 Diccionario de asignación de tecnología para el parque vehicular INE

Año	Cobertura	Buses	Camiones	Particulares Bencina	Particulares Diesel	Motos
1900	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1901	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1902	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1903	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1904	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1905	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1906	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1907	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1908	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1909	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1910	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1911	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1912	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1913	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1914	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1915	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1916	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1917	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1918	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1919	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1920	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1921	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1922	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1923	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1924	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1925	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1926	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1927	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA

Año	Cobertura	Buses	Camiones	Particulares Bencina	Particulares Diesel	Motos
1928	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1929	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1930	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1931	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1932	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1933	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1934	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1935	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1936	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1937	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1938	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1939	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1940	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1941	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1942	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1943	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1944	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1945	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1946	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1947	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1948	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1949	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1950	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1951	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1952	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1953	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1954	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1955	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1956	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1957	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1958	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1959	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1960	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1961	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1962	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1963	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1964	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1965	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1966	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1967	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1968	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1969	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1970	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1971	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1972	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1973	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1974	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1975	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA

Año	Cobertura	Buses	Camiones	Particulares Bencina	Particulares Diesel	Motos
1976	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1977	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1978	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1979	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1980	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1981	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1982	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1983	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1984	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1985	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1986	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1987	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1988	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1989	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1990	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1991	Regiones	NA	NA	NA	NA	NA
1992	Regiones	NA	NA	Euro I	Euro I	NA
1993	Regiones	NA	NA	Euro I	Euro I	NA
1994	Regiones	Euro I	NA	Euro I	Euro I	NA
1995	Regiones	Euro I	Euro I	Euro I	Euro I	NA
1996	Regiones	Euro I	Euro I	Euro I	Euro I	NA
1997	Regiones	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I	NA
1998	Regiones	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I	NA
1999	Regiones	Euro II	Euro II	Euro I	Euro I	NA
2000	Regiones	Euro II	Euro II	Euro I	Euro I	NA
2001	Regiones	Euro II	Euro II	Euro I	Euro I	NA
2002	Regiones	Euro II	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I
2003	Regiones	Euro III	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I
2004	Regiones	Euro III	Euro III	Euro I	Euro I	Euro I
2005	Regiones	Euro III	Euro III	Euro I	Euro I	Euro I
2006	Regiones	Euro III	Euro III	Euro I	Euro I	Euro I
2007	Regiones	Euro III	Euro III	Euro III	Euro III	Euro I
2008	Regiones	Euro III	Euro III	Euro III	Euro III	Euro I
2009	Regiones	Euro III	Euro III	Euro III	Euro III	Euro I
2010	Regiones	Euro III	Euro III	Euro III	Euro III	Euro I
2011	Regiones	Euro III	Euro III	Euro IV	Euro IV	Euro I
2012	Regiones	Euro III	Euro III	Euro IV	Euro IV	Euro I
2013	Regiones	Euro III	Euro III	Euro IV	Euro IV	Euro I
2014	Regiones	Euro III	Euro III	Euro V	Euro V	Euro I
2015	Regiones	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro I
2016	Regiones	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro I
2017	Regiones	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro I
2018	Regiones	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro I
2019	Regiones	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro III
2020	Regiones	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro III
2021	Regiones	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro III
2022	Regiones	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro III
1900	RM	NA	NA	NA	NA	NA

Año	Cobertura	Buses	Camiones	Particulares Bencina	Particulares Diesel	Motos
1901	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1902	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1903	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1904	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1905	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1906	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1907	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1908	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1909	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1910	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1911	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1912	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1913	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1914	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1915	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1916	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1917	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1918	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1919	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1920	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1921	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1922	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1923	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1924	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1925	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1926	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1927	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1928	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1929	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1930	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1931	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1932	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1933	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1934	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1935	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1936	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1937	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1938	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1939	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1940	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1941	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1942	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1943	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1944	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1945	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1946	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1947	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1948	RM	NA	NA	NA	NA	NA

Año	Cobertura	Buses	Camiones	Particulares Bencina	Particulares Diesel	Motos
1949	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1950	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1951	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1952	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1953	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1954	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1955	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1956	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1957	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1958	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1959	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1960	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1961	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1962	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1963	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1964	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1965	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1966	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1967	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1968	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1969	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1970	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1971	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1972	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1973	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1974	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1975	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1976	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1977	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1978	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1979	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1980	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1981	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1982	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1983	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1984	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1985	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1986	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1987	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1988	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1989	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1990	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1991	RM	NA	NA	NA	NA	NA
1992	RM	NA	NA	Euro I	Euro I	NA
1993	RM	NA	NA	Euro I	Euro I	NA
1994	RM	Euro I	NA	Euro I	Euro I	NA
1995	RM	Euro I	Euro I	Euro I	Euro I	NA
1996	RM	Euro I	Euro I	Euro I	Euro I	NA

Año	Cobertura	Buses	Camiones	Particulares Bencina	Particulares Diesel	Motos
1997	RM	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I	NA
1998	RM	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I	NA
1999	RM	Euro II	Euro II	Euro I	Euro I	NA
2000	RM	Euro II	Euro II	Euro I	Euro I	NA
2001	RM	Euro II	Euro II	Euro I	Euro I	NA
2002	RM	Euro II	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I
2003	RM	Euro III	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I
2004	RM	Euro III	Euro II	Euro I	Euro I	Euro I
2005	RM	Euro III	Euro II	Euro III	Euro III	Euro I
2006	RM	Euro III	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro I
2007	RM	Euro III	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro I
2008	RM	Euro III	Euro III	Euro III	Euro IV	Euro I
2009	RM	Euro III	Euro III	Euro III	Euro IV	Euro I
2010	RM	Euro III	Euro III	Euro III	Euro IV	Euro I
2011	RM	Euro III	Euro IV	Euro IV	Euro V	Euro III
2012	RM	Euro III	Euro IV	Euro IV	Euro V	Euro III
2013	RM	Euro III	Euro IV	Euro IV	Euro V	Euro III
2014	RM	Euro III	Euro V	Euro V	Euro V	Euro III
2015	RM	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro III
2016	RM	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro III
2017	RM	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro III
2018	RM	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro III
2019	RM	Euro V	Euro V	Euro V	Euro V	Euro III
2020	RM	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro III
2021	RM	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro III
2022	RM	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro III

NA: No Aplica (No Certificado).

Fuente: Elaboración propia

9.6 Anexo 6: Factores de emisión de MMFR

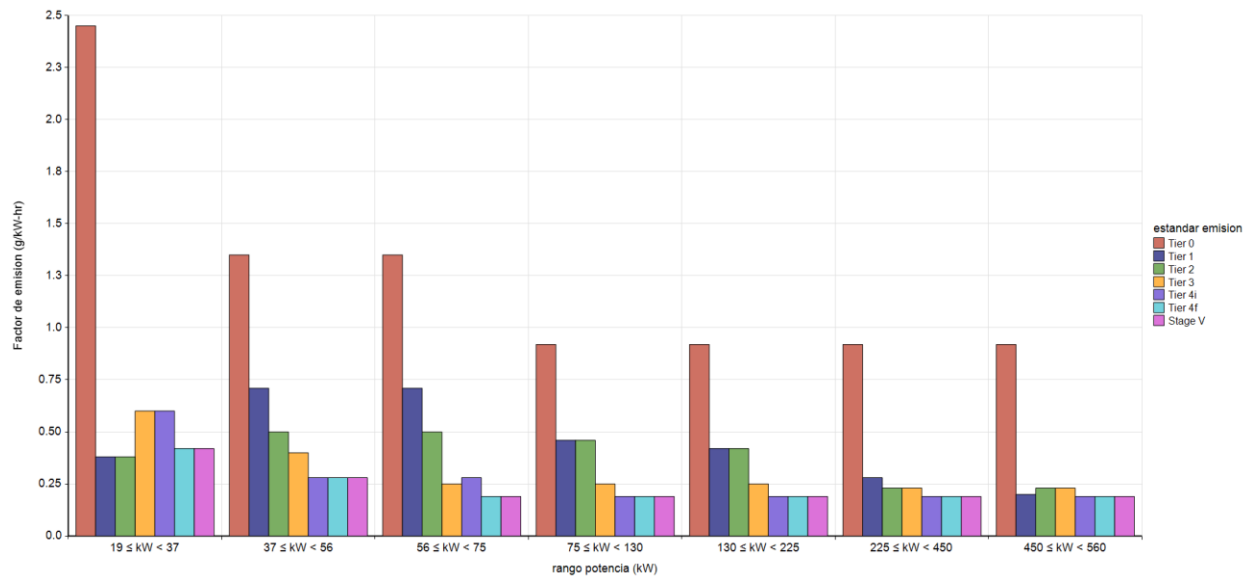


Figura 9-2 Factores de emisión para HC.

Fuente: Elaboración propia

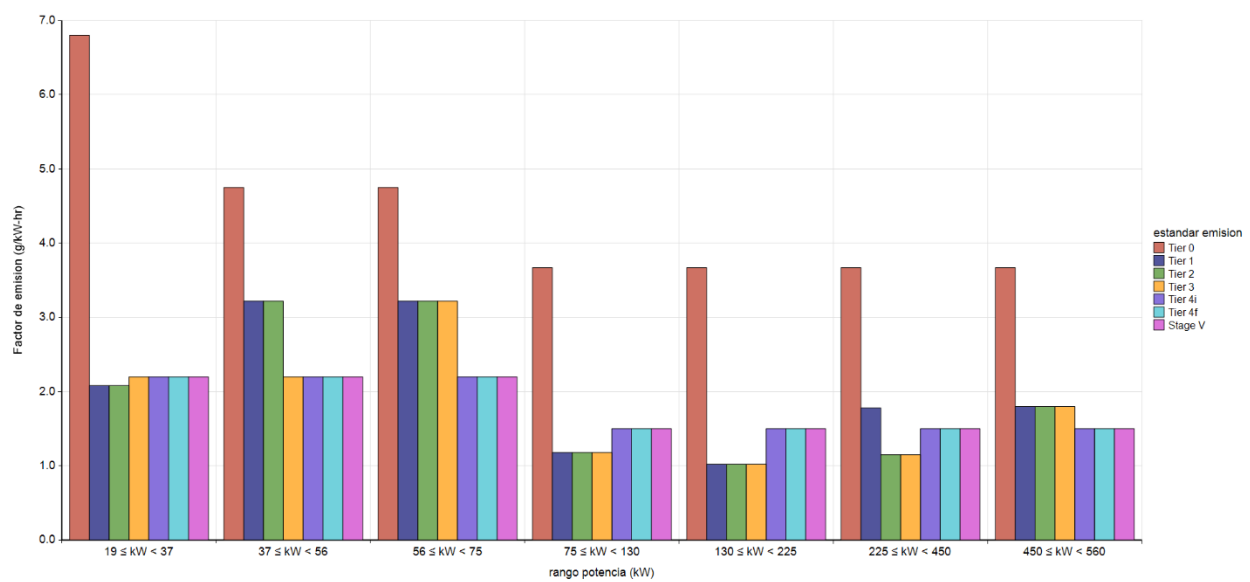


Figura 9-3 Factores de emisión para CO.

Fuente: Elaboración propia

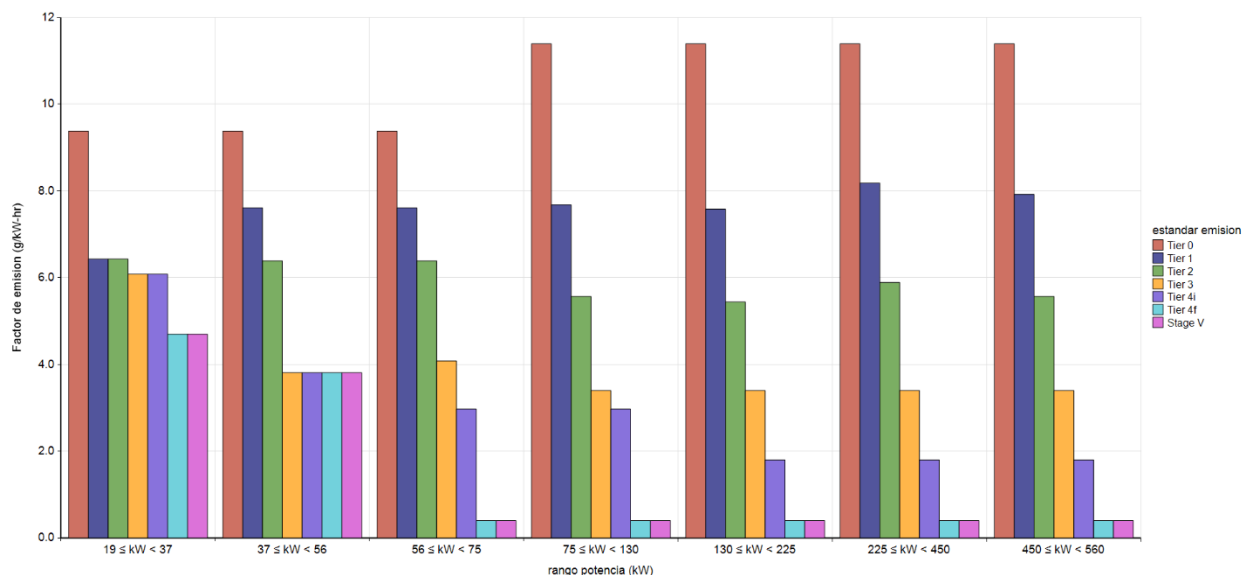


Figura 9-4 Factores de emisión para NOx.

Fuente: Elaboración propia

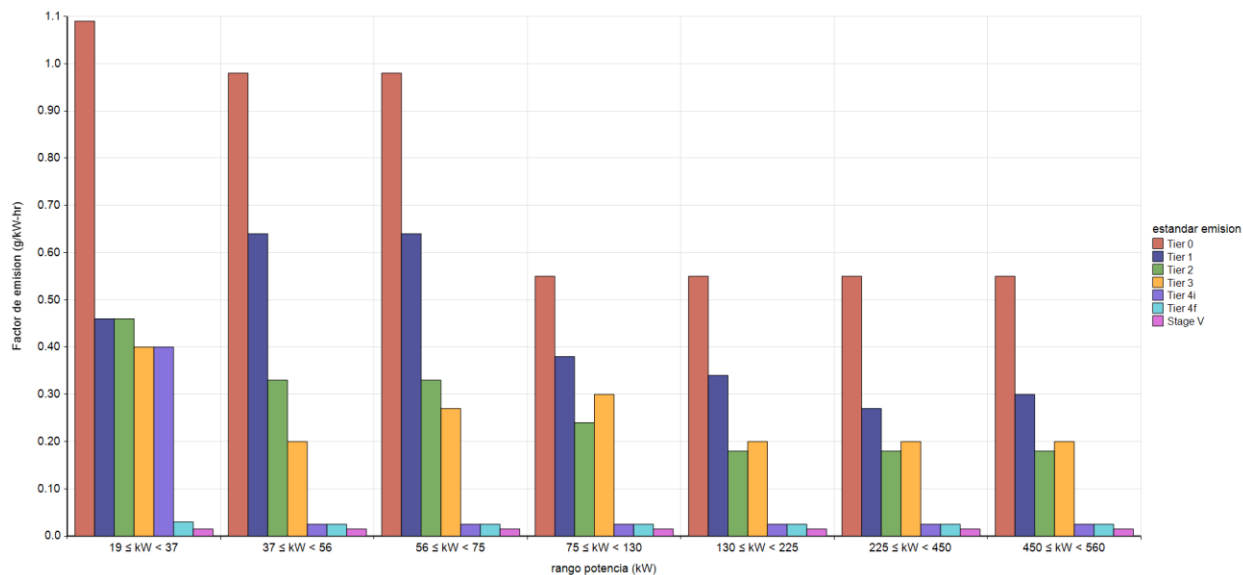


Figura 9-5 Factores de emisión para MP.

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que los gráficos muestran los factores de emisión sin considerar la operación transitoria. Por ello, algunos valores para Tier 1 y Tier 2 pueden ser menores que los de Tier 3 y superiores, ya que al aplicar el factor de ajuste transitorio, los valores se normalizan.

9.7 Anexo 7: Factor de ajuste transitorio MMFR

Tabla 9-5 Factores de ajuste transitorio según tipo de maquinaria

Maquinaria	Factor de ajuste transitorio					
	HC (SN-T3)	CO (SN-T3)	NOx (SN-T2)	NOx (Tier 3)	MP10 (SN-T2)	MP10 (Tier 3)
BARREDORA	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
BULLDOZER	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4
CAMION FUERA DE CARRETERA	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
CARGADOR FRONTAL	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4
MANIPULADOR TELESCOPICO	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
PLATAFORMA TELESCOPICA	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4
EXCAVADORA	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
GRUA TELESCOPICA	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
COSECHADORA	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
MANIPULADOR	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4
GRUA HORQUILLA	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
RETROEXCAVADORA	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,5
MOTONIVELADORA	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
QUITANIEVE	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4
OTROS EQUIPOS AGRICOLA	2,3	1,5	1	1	1,2	1,5
OTROS EQUIPOS EN MINAS SUBTERRANEA	1,1	1	1	1	1	1
OTROS EQUIPOS DE CONSTRUCCION	1	1,5	1	1	1,2	1,5
CARGADOR DE TRONCOS	1,1	2,6	1,1	1,2	2	2,4
ASFALTADORA	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4
PERFORADOR	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4
RODILLO	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4
TRACTOR	1,1	1,5	1	1	1,2	1,5
TRACTOR AGRICOLA	1	1	1	1	1	1
ZANJADORA	2,3	2,6	1,1	1,2	2	2,4

SN= sin normativa

Fuente: Elaboración propia en base a (EPA, 2010a)

9.8 Anexo 8: Herramienta de evaluación de medidas actuales y de posibles escenarios para medidas propuestas

A continuación, se describe el modelo elaborado en el software Analytica, el cual consta de una sección para transporte en ruta y otra para MMFR.

9.8.1 Transporte en ruta

En la Figura 9-6 se muestra la estructura general del modelo de transporte en ruta elaborado en Analytica.

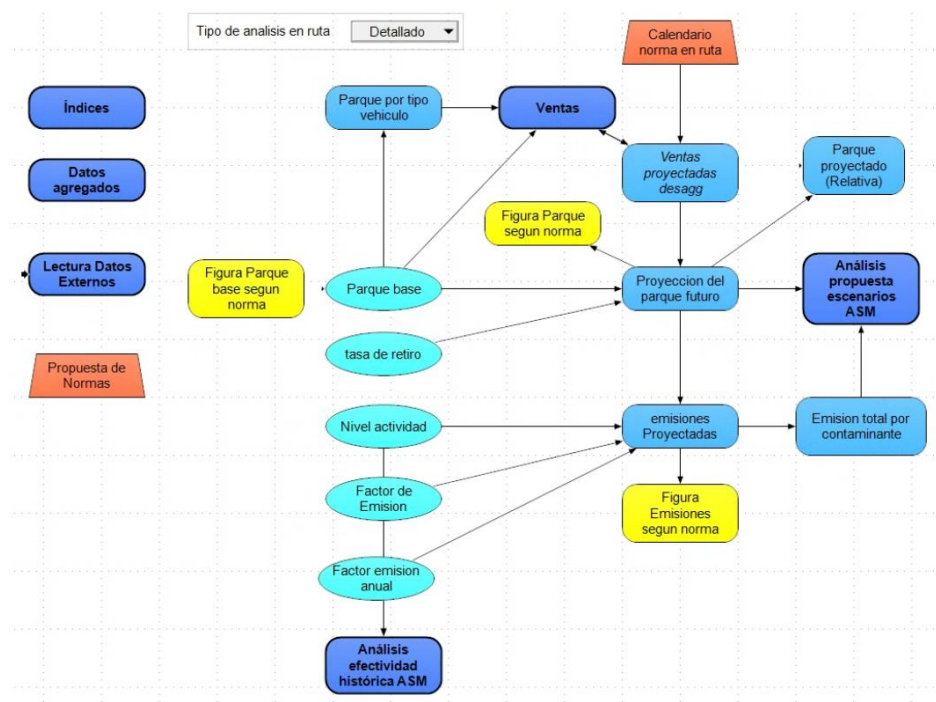


Figura 9-6 Modelo de parque vehicular y emisiones de transporte en ruta

Fuente: Elaboración propia en software Analytica

9.8.1.1 Índices

El módulo “Índices”, presentado en la Figura 9-7, contiene todos los índices necesarios para la construcción del modelo, tales como el año, año modelo, tipo de vehículo, norma de emisión, entre otros.

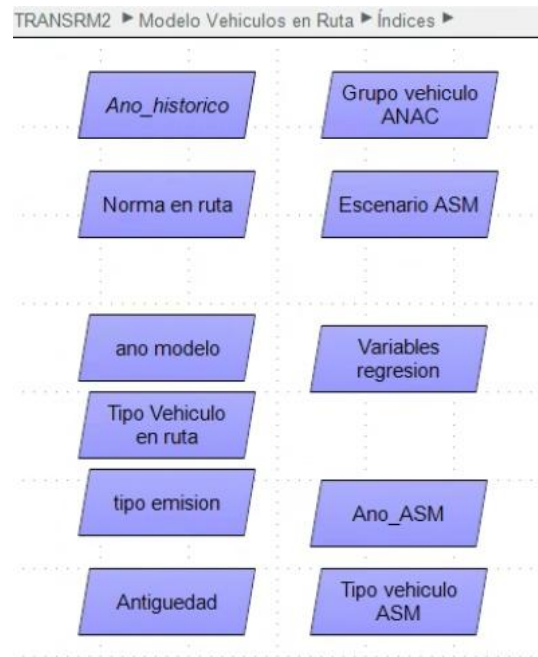


Figura 9-7 Índices del modelo de transporte en ruta

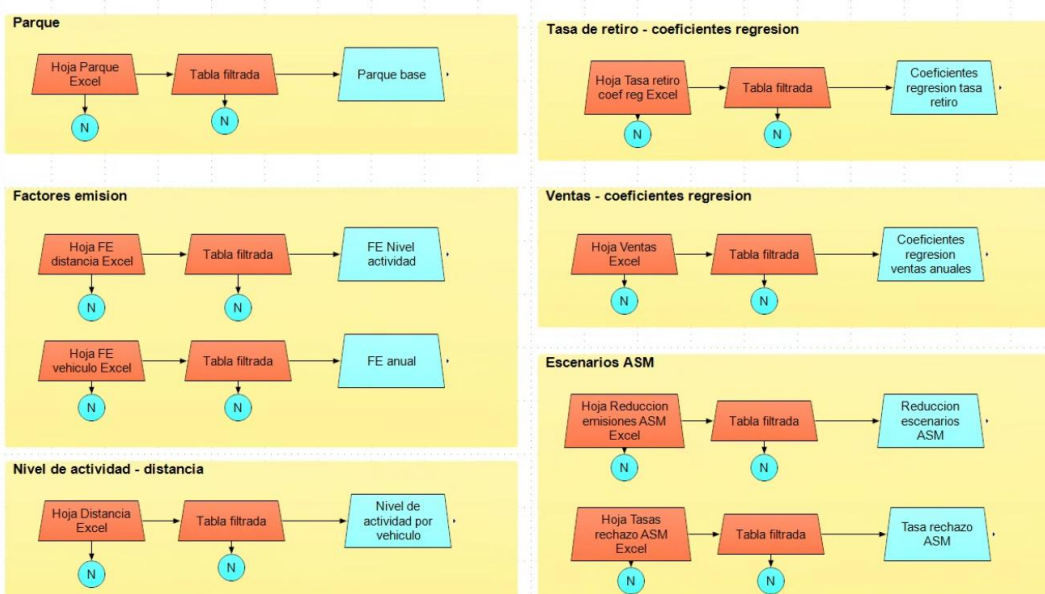
Fuente: Elaboración propia

9.8.1.2 Lectura de Datos

Este módulo, presentado en la Figura 9-8, contiene los nodos de lectura de datos en formato Excel, que corresponden a los inputs del modelo, tales como el parque vehicular, factores de emisión, niveles de actividad, entre otros. El archivo que contiene los inputs del modelo está disponible en el anexo digital del modelo “TransRM-Data-Vehiculos.xlsm”.

Cabe destacar que, en caso de realizarse actualizaciones a las bases de datos externas que lee el modelo, se debe presionar el *button node* “Releer Bases de Datos”.

Releer Bases de Datos


Figura 9-8 Lectura de datos en modelo de transporte en ruta

Fuente: Elaboración propia

9.8.1.3 Ventas Proyectadas

El modelo estima el tamaño y composición del parque futuro, considerando:

- Ventas proyectadas totales: Cantidad de vehículos nuevos que ingresan al parque, calculado a partir de la tasa de ventas anuales.
- Proporción de categorías de parque: Define la distribución relativa de vehículos en cada categoría. Utilizada para mantener la distribución histórica del parque de tipo de vehículo y combustible.
- Calendario de norma en ruta: Corresponde a una matriz de 1 y 0 con las dimensiones año y norma, tal como se presenta en la Figura 9-9. Determina qué regulaciones estarán vigentes para los vehículos en distintos años de proyección para realizar la asignación de norma a los vehículos entrantes. Este input puede ser modificado por el usuario para evaluar distintos escenarios normativos.

Mid Value of Calendario norma en ruta																
	Time (año)															
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Euro 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Euro 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Euro 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Euro 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Euro 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Euro 6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sin Norma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 9-9 Nodo “Calendario norma en ruta”

Fuente: Elaboración propia

9.8.1.4 Proyección del parque vehicular

El modelo estima el tamaño y composición del parque futuro, considerando:

- Parque base: Vehículos existentes en la línea base.
- Tasa de retiro: Estimación de cuántos vehículos salen del parque cada año.
- Ventas proyectadas (ver Sección 9.8.1.3).

En caso de realizar modificaciones al parque base o a la tasa de retiro, estas se deben realizar en la base de datos externa que lee el modelo para obtener todos los inputs, disponible en el anexo digital del modelo “TransRM-Data-Vehiculos.xlsm”.

9.8.1.5 Cálculo de las Emisiones Proyectadas

Para obtener las emisiones futuras, el modelo aplica la Ecuación 6 presentada en la Sección 4.4.1, utilizando los siguientes inputs:

- Parque vehicular proyectado (ver Sección 9.8.1.4).
- Nivel de actividad: Distancia recorrida promedio de cada vehículo.
- Factor de emisión: Cantidad de contaminantes emitidos por cada tipo de vehículo por unidad de actividad.
- Factor de emisión anual: Ajuste anualizado de los factores de emisión.

El modelo permite cambiar los factores de emisión utilizados, modificándolos directamente en la base de datos que lee el modelo, disponible en el anexo digital del modelo “TransRM-Data-Vehiculos.xlsm”.

9.8.1.6 Análisis propuesta escenarios ASM

El modelo cuenta con un módulo que contiene la estimación de la reducción de emisiones generada por los escenarios propuestos respecto a los límites de emisión ASM (artículo 9), y el cálculo de los costos asociados, tal como se muestra en la Figura 9-10. Para ello, se definen los siguientes escenarios:

- Límites PDA: Corresponde a los límites de emisión actuales del PPDA.
- Límites EPA: Corresponde a los límites de emisión de la EPA.

La estimación de la reducción de emisiones se realiza a partir del input “Reducción escenarios ASM”, que contiene los porcentajes promedio de reducción de emisiones por contaminante, aplicados a las emisiones proyectadas en la línea base.

Por otro lado, los costos se estiman utilizando como input el costo por reparación de cada vehículo, el cual puede ser directamente modificado en el modelo (nodo “Costos arreglos ASM”), y las tasa de rechazo ASM que, en caso de ser modificadas, debe hacerse en el archivo externo “TransRM-Data-Vehiculos.xlsm”.

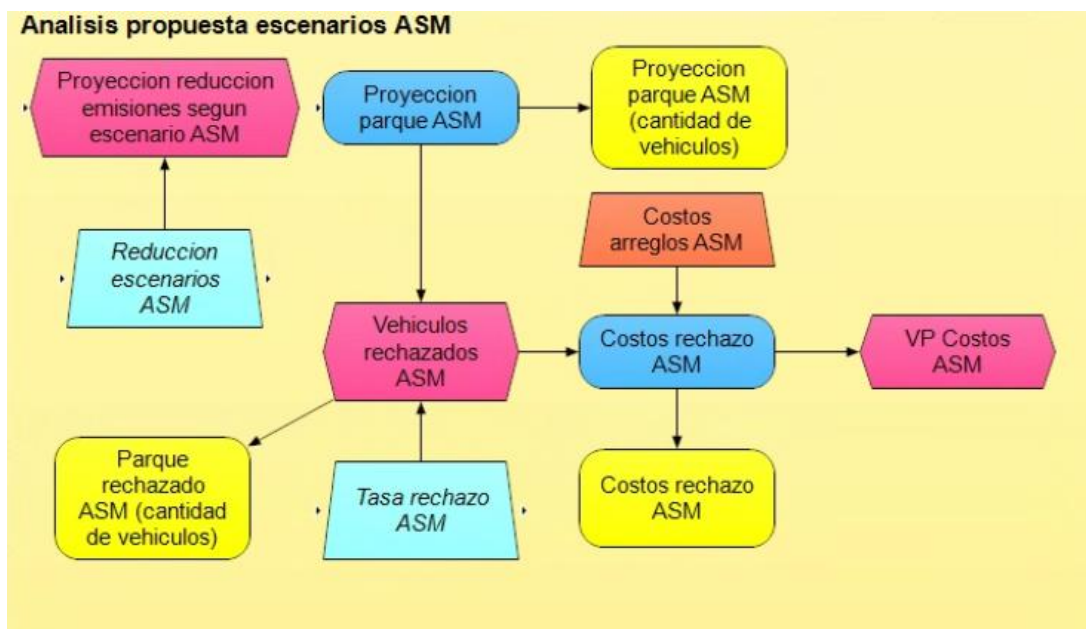


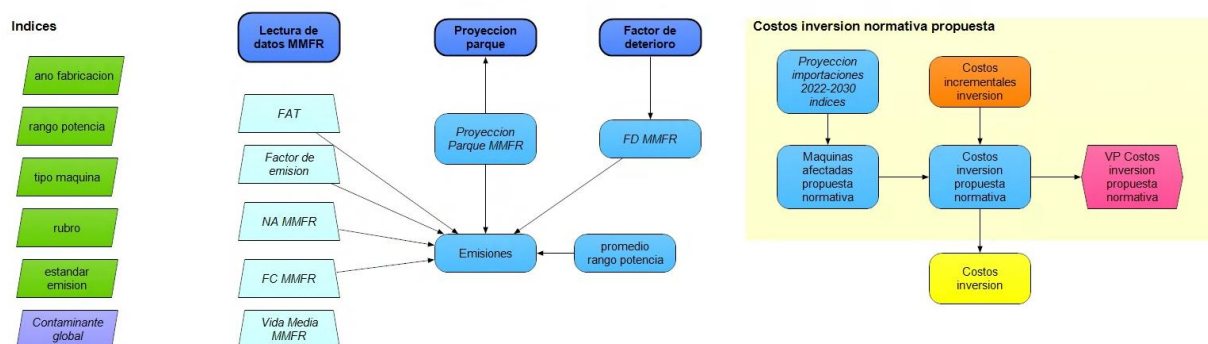
Figura 9-10 Módulo de análisis de escenarios propuestos ASM

Fuente: Elaboración propia

9.8.2 MMFR

Como se puede apreciar en la Figura 9-11, su estructura se basa en tres componentes principales: cálculo de emisiones, proyección del parque de maquinaria y estimación de costos de inversión. A través de este modelo, los usuarios pueden modificar parámetros clave para evaluar los efectos de adoptar diferentes regulaciones de emisiones.

Modelo de parque y emision de MMFR

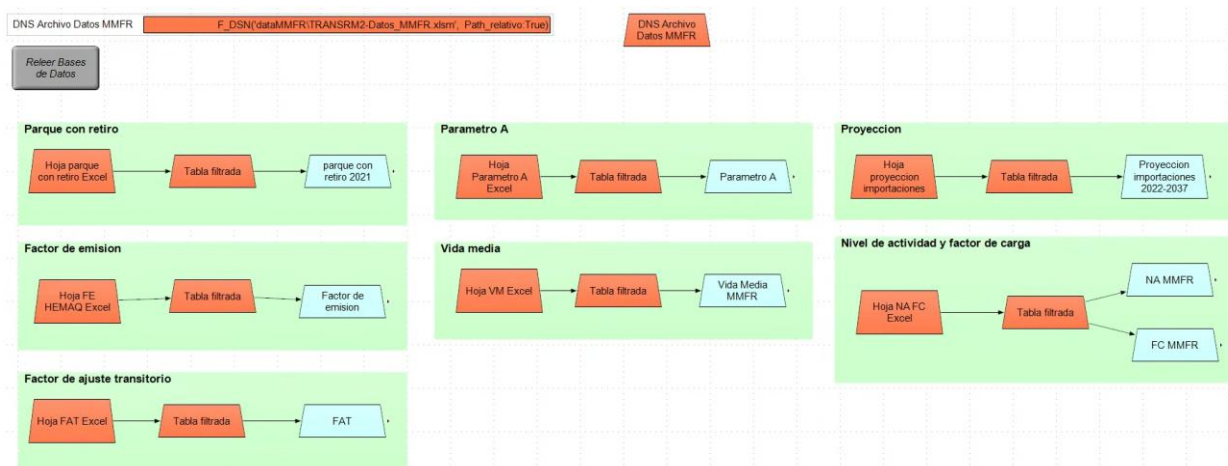

Figura 9-11 Modelo de parque y emisión de MMFR

Fuente: Elaboración propia en software Analytica

9.8.2.1 Lectura de Datos

El nodo "Lectura de datos MMFR", detallado en la Figura 9-12, centraliza los insumos requeridos para el modelo, vinculándolos desde un archivo maestro de Excel. Este módulo contiene información fundamental como factores de emisión, tasas de actividad y vida útil de la maquinaria.

Los usuarios pueden actualizar los datos de entrada modificando el archivo Excel vinculado, permitiendo así evaluar escenarios con nuevas condiciones de mercado o tecnologías emergentes.


Figura 9-12 Módulo de lectura de datos de MMFR

Fuente: Elaboración propia en software Analytica

9.8.2.2 Factor de Deterioro

El nodo "Factor de deterioro" permite modelar la degradación en el rendimiento de la maquinaria con el tiempo. Este nodo calcula el factor edad, que se basa en variables como el parámetro A, los factores de carga y nivel de actividad (NA y FC MMFR), y la vida media de la maquinaria, como se muestra en la Figura 9-13. La edad calculada de la maquinaria se obtiene mediante la relación entre el año de fabricación y el tiempo de análisis, permitiendo ajustar el impacto del deterioro en las emisiones proyectadas.

Este factor influye directamente en los cálculos de emisiones y es clave para estimar con mayor precisión la efectividad de medidas de mitigación.

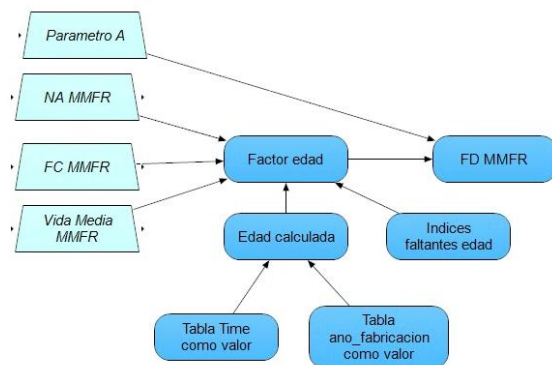


Figura 9-13 Módulo de cálculo de factor de deterioro (FD) de MMFR

Fuente: Elaboración propia en software Analytica

9.8.2.3 Proyección del Parque de Maquinaria y Definición de Estándares Normativos

La proyección del parque de maquinaria se gestiona a través del nodo "Proyección Parque MMFR", detallado en la Figura 9-14. Este nodo incorpora variables como tasas de retiro de maquinaria, estimaciones de importaciones futuras y la asignación de estándares de emisión según el año.

Una funcionalidad clave es la posibilidad de definir diferentes escenarios normativos, estableciendo la proporción de maquinaria que cumple con Tier 4f y Stage V para cada año proyectado. Esto permite simular el impacto de regulaciones futuras en la composición del parque vehicular. Los usuarios pueden modificar los escenarios normativos utilizando el nodo "Definición de estándar según año", el cual permite ajustar la proporción de maquinaria Tier 4f y Stage V en el tiempo, explorando distintos ritmos de transición, como se muestra en la Figura 9-15.

Existen dos escenarios prediseñados:

- Caso base: Mantiene una adopción constante del 80% de Tier 4f y 20% de Stage V.
- Propuesta: Introduce un cambio gradual hasta alcanzar un 100% de Stage V en 2030.

Los usuarios pueden personalizar estos valores para analizar impactos alternativos.

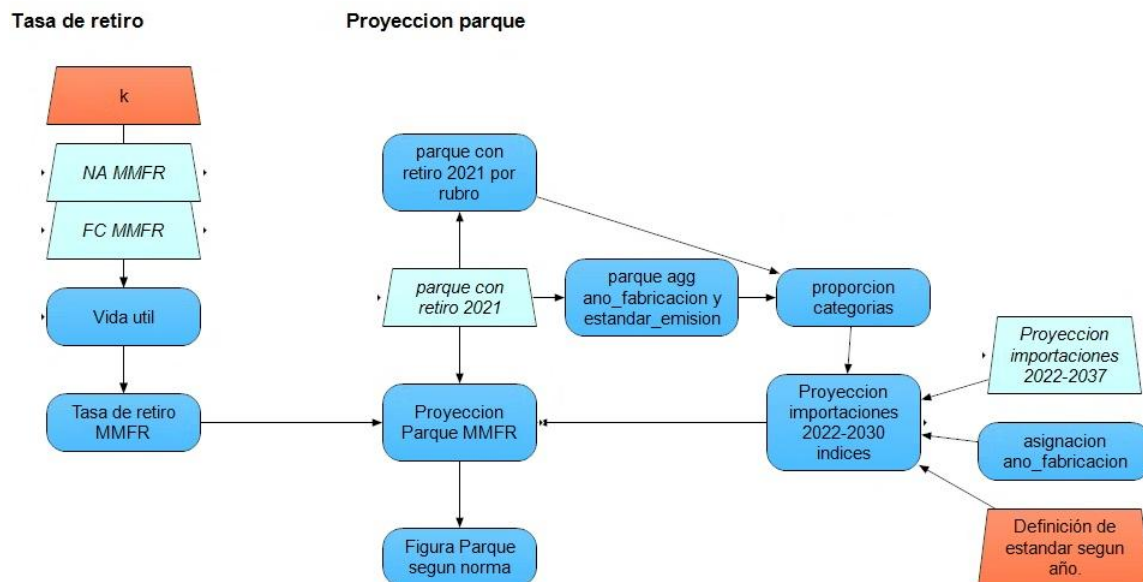
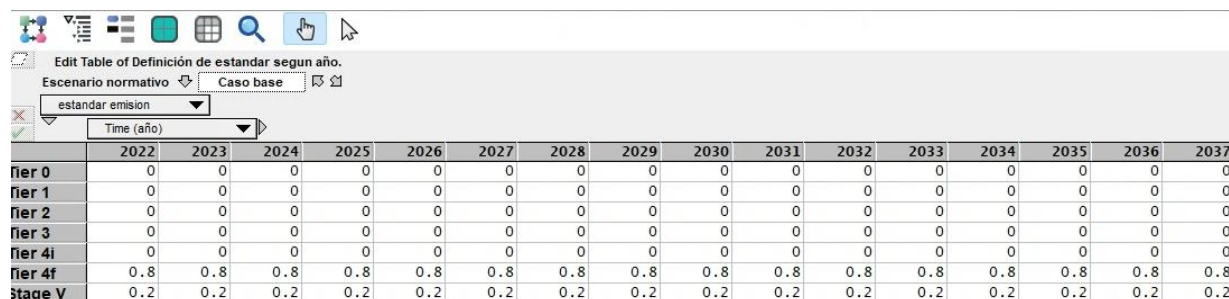


Figura 9-14 Módulo de proyección del parque de MMFR

Fuente: Elaboración propia en software Analytica



	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Tier 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tier 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tier 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tier 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tier 4i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tier 4f	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Stage V	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Figura 9-15 Nodo de escenarios normativos futuros para MMFR

Fuente: Elaboración propia en software Analytica

9.8.2.4 Cálculo de Emisiones

El modelo estima las emisiones proyectadas de MMFR combinando factores de emisión, nivel de actividad y tasas de retiro de la maquinaria. Se parte de la lectura de datos base, donde se integran los factores de emisión por tipo de maquinaria y rango de potencia. Luego, mediante la proyección del parque y la asignación de estándares normativos, se calculan las emisiones anuales para distintos contaminantes.

El deterioro de la maquinaria con el tiempo también es considerado en el cálculo de emisiones. A través del Factor de Deterioro, se ajustan los factores de emisión según la edad de la maquinaria, permitiendo así una estimación más realista de las emisiones futuras.

9.8.2.5 Cálculo de Costos

El modelo permite estimar los costos de inversión asociados a la implementación de la propuesta de normativa de este estudio. A partir de la proyección de importaciones y la identificación de maquinaria afectada por la normativa propuesta, se calculan los costos incrementales de inversión. Estos costos son luego ajustados a valor presente para evaluar el impacto financiero de la transición normativa. El nodo “Costos incrementales de inversión” puede actualizarse en caso de encontrarse nuevas fuentes de información.