

deUNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



Análisis costo-beneficio por la aplicación de una
norma de medición de número de partículas de
vehículos
diésel en Chile

Andrés Rodríguez Quinteros

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MECÁNICO

Profesor Guía: Mauricio Osses

Profesor Co-referente: Estela Blanco

Julio 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis costo-beneficio por la aplicación de una norma de medición de número partículas de vehículos diésel en Chile

Nombre del candidato(a): Andrés Rodríguez Quinteros

Carrera / Grado: Ingeniero Civil mecánico

Campus: San Joaquín Departamento: Ingeniería Civil mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Mauricio Osses**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

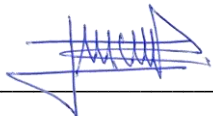
El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 10 / 11 / 20 25 Firma: 

Estudiante o Candidato

Fecha: 30/10/2025

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia, y en especial a mis padres, por enseñarme que todo proceso en la vida requiere paciencia, pero que esta debe ir acompañada de dedicación y sacrificio para alcanzar aquello que verdaderamente se desea. Gracias por su apoyo en este camino.

A Tamara, por impulsarme constantemente a ir más allá, por motivarme a buscar el éxito cada día y a no conformarme. A mi primo, por transmitirme el valor del estudio y la perseverancia en este ámbito. A mi profesor, por su comprensión y apoyo durante todo este proceso, especialmente en los momentos en que compaginar la vida laboral con la académica hizo más difícil el avance.

A cada persona que conocí en mi estadía en la universidad, gracias. De cada uno me llevo aprendizajes valiosos que sigo descubriendo con el tiempo, al reflexionar sobre los años vividos en San Joaquín. Espero llevar conmigo todos esos conocimientos y experiencias, y también atesorar con madurez los errores que, sin duda, me forjaron como persona y como el profesional que hoy estoy comenzando a ser.

Resumen

Este trabajo analiza la viabilidad económica y técnica de implementar una norma para la medición del número de partículas en vehículos diésel en Chile. El objetivo principal es realizar un análisis costo-beneficio considerando la experiencia internacional, la reducción de material particulado ($MP_{2,5}$) y sus impactos en la mejora en salud pública. El estudio incluye una evaluación de costos asociados a la adquisición y mantenimiento de equipos de medición, y beneficios derivados de la reducción de efectos asociados a morbilidad y mortalidad. A través de simulaciones y modelos matemáticos, se proyecta la efectividad de esta norma, destacando que su implementación puede mejorar significativamente la calidad del aire, reduciendo costos en salud y pérdida laboral en un horizonte de análisis de 10 años. Los resultados respaldan la adopción de este enfoque como una medida clave para garantizar sostenibilidad y bienestar social, estableciendo la diferencia entre los beneficios relacionados a la adopción de la medida versus el escenario sin norma aplicada.

Abstract

This work analyzes the economic and technical feasibility of implementing a regulation for particle number measurement in diesel vehicles in Chile. The main objective is to conduct a cost-benefit analysis, considering international experiences, the reduction of particulate matter ($MP_{2.5}$), and its impacts on public health improvement. The study includes an evaluation of costs associated with the acquisition and maintenance of measurement equipment, as well as the benefits derived from reducing morbidity and mortality effects. Through simulations and mathematical models, the effectiveness of this regulation is projected, highlighting that its implementation can significantly improve air quality, reducing healthcare costs and labor losses over a 10-year analysis horizon. The results support the adoption of this approach as a key measure to ensure sustainability and social well-being, establishing the difference between the benefits related to the adoption of the measure and the scenario without the regulation in place.

Índice General

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
Índice General	5
Glosario	7
Índice de figuras	8
Índice de tablas	10
Introducción.....	12
Objetivos.....	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
Estructura de la memoria	15
Capítulo 1: Estado del arte.....	17
1.1 Material particulado y sus efectos en salud.....	17
1.2 Procedimientos internacionales de fiscalización	28
1.3 Instrumentos de medición de material particulado y DPF.....	43
1.4 Análisis General de Impacto Económico y Social	50
Capítulo 2: Estimación de beneficios.....	54
2.1 Metodología cálculo de beneficios económicos.....	54
2.2 Estimación de efectos	62
2.3 Valorización de los efectos en salud.....	66
Capítulo 3: Estimación de costos	68
3.1 Metodología de cálculo de costos asociados	68
3.2 Resultados de costos asociados	69
Capítulo 4: Análisis costo – beneficio.....	75
4.1 Metodología.....	75

4.2 Resultados análisis costo - beneficio.....	76
Conclusiones.....	78
Anexos.....	80
Anexo 1	80
Anexo 2	83
Referencias.....	87

Glosario

A		Ministerio del Medio Ambiente.	12
AGIES	Análisis General de Impacto Económico y Social.	MTT	12
		Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.	12
C		P	
COV	Compuesto orgánico volátil.	PIB	20
	13	Producto Interno Bruto.	20
D		PPDA	19
DPF	Filtro de partículas diésel.	Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental.	19
	11	B	
M		β	65
MMA		Coefficiente de riesgo unitario.	65

Índice de figuras

FIGURA 1: DIMENSIONES DEL MATERIAL PARTICULADO.....	17
FIGURA 2: PRINCIPALES FUENTES DE GENERACIÓN DE CARBONO NEGRO.....	19
FIGURA 3: OSCURECIMIENTO DE LOS GLACIARES A CAUSA DEL BLACK CARBON	19
FIGURA 4: RELACIÓN DE CRECIMIENTO POBLACIONAL VERSUS GENERACIÓN DE CARBONO NEGRO	20
FIGURA 5: FRACCIÓN DE COMPONENTES ELEMENTALES $MP_{2.5}$	22
FIGURA 6: EFECTOS EN LA SALUD HUMANA DE LAS PARTÍCULAS GENERADAS POR LA COMBUSTIÓN	25
FIGURA 7: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULAS GENERADAS POR UN MOTOR DIESEL.....	26
FIGURA 8: OPACÍMETRO MARCA CAPELEC	29
FIGURA 9: NÚMERO DE PARTÍCULAS VERSUS OPACIDAD.....	30
FIGURA 10: COMPARACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN	35
FIGURA 11: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO, CON LÍMITE 250.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN EL TIPO DE VEHÍCULO	37
FIGURA 12: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO, CON LÍMITE 1.000.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN EL TIPO DE VEHÍCULO	37
FIGURA 13: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO EN VEHÍCULOS LIVIANOS, CON LÍMITE 250.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN EL AÑO DEL VEHÍCULO.....	38
FIGURA 14: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO EN VEHÍCULOS LIVIANOS, CON LÍMITE 1.000.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN EL AÑO DEL VEHÍCULO	38
FIGURA 15: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO EN VEHÍCULOS LIVIANOS, CON LÍMITE 250.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN KILOMETRAJE DEL VEHÍCULO	39
FIGURA 16: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO EN VEHÍCULOS LIVIANOS, CON LÍMITE 1.000.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN KILOMETRAJE DEL VEHÍCULO	40
FIGURA 17: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO EN VEHÍCULOS PESADOS, CON LÍMITE 250.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN EL AÑO DEL VEHÍCULO.....	41
FIGURA 18: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO EN VEHÍCULOS PESADOS, CON LÍMITE 1.000.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN EL AÑO DEL VEHÍCULO	41
FIGURA 19: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO EN VEHÍCULOS PESADOS, CON LÍMITE 250.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN EL KILOMETRAJE DEL VEHÍCULO	42
FIGURA 20: TASA DE APROBACIÓN Y RECHAZO EN VEHÍCULOS PESADOS, CON LÍMITE 1.000.000 [PARTÍCULAS/CM ³], SEGÚN EL KILOMETRAJE DEL VEHÍCULO.....	42
FIGURA 21: DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE INSTRUMENTO CPC	44
FIGURA 22: DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE INSTRUMENTO CPC	45
FIGURA 23: FUNCIONAMIENTO DE UN DPF	48
FIGURA 24: UBICACIÓN DEL DPF EN EL SISTEMA DE ESCAPE DE UN VEHÍCULO /DPF DAÑADO O SATURADO.....	49

FIGURA 25: FUNCIÓN DE DAÑO.....	53
FIGURA 26: DISTRIBUCIÓN DE COSTOS DE REPARACIÓN Y EQUIPAMIENTO POR AÑO.....	73
FIGURA 27: ESQUEMA DE LA REALIZACIÓN DE UN ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO	75

Índice de tablas

TABLA 1: NORMAS VIGENTES EN EUROPA	31
TABLA 2: CLASES DE VEHÍCULOS SOBRE LOS QUE SE APLICAN LAS NORMAS	31
TABLA 3: VALORES LÍMITES DE CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS.....	33
TABLA 4: TASA DE RECHAZO PARA DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS	43
TABLA 5: EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS EN PROCEDIMIENTOS EN CHILE	46
TABLA 6: COMPARACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	47
TABLA 7: EMISIONES EVITADAS EN CHILE EN [(TON/AÑO)].	54
TABLA 8: FACTOR EMISIÓN CONCENTRACIÓN PROMEDIO	56
TABLA 9: CAMBIOS EN CONCENTRACIÓN DE MP _{2,5} [(MG/M ³)].	57
TABLA 10: COEFICIENTE DE RIESGO UNITARIO [(MG/M ³) ⁻¹].	59
TABLA 11: POBLACIÓN DE CHILE POR REGIÓN	60
TABLA 12: PORCENTAJES POR AFILIACIÓN FONASA/ISAPRE	61
TABLA 13: RELACIÓN DE CASOS MORBILIDAD/MORTALIDAD EVITADOS BAJO LA APLICACIÓN DE LA NORMA.....	62
TABLA 14: CASOS EVITADOS DE EMERGENCIAS CARDIOVASCULARES TOTALES	63
TABLA 15: CASOS EVITADOS DE EMERGENCIAS RESPIRATORIAS TOTALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	63
TABLA 16: CASOS EVITADOS DE ADMISIONES HOSPITALARIAS CARDIOVASCULARES	64
TABLA 17: CASOS EVITADOS DE ADMISIONES HOSPITALARIAS CARDIOVASCULARES POR INFARTOS MIOCARDIOS.	64
TABLA 18: CASOS EVITADOS DE ADMISIONES HOSPITALARIAS RESPIRATORIAS	64
TABLA 19: MUERTES EVITADAS POR LA APLICACIÓN DE LA NORMA.....	65
TABLA 20: CASOS EVITADOS POR LA APLICACIÓN DE LA NORMA	65
TABLA 21: BENEFICIOS ECONÓMICOS OBTENIDOS POR LA APLICACIÓN DE LA NORMA	67
TABLA 22: PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.....	68
TABLA 23: COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMA	69
TABLA 24: COSTO DE FILTROS PARA VEHÍCULOS LIVIANOS Y MÓDULOS FILTRANTES PARA VEHÍCULOS PESADOS.	70
TABLA 25: PROYECCIÓN DE VEHÍCULOS PESADOS Y VEHÍCULOS LIVIANOS RECHAZADOS POR AÑO	71
TABLA 26: PROYECCIÓN DE COSTOS DE REPARACIÓN PARA VEHÍCULOS PESADOS Y LIVIANOS POR AÑO.....	72
TABLA 27: PROYECCIÓN DE COSTO TOTAL DE LA MEDIDA	72
TABLA 28: RESULTADOS GENERALES Y ESPECÍFICOS DEL ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO	76
TABLA 29: CASOS EVITADOS DE ADMISIONES HOSPITALARIAS POR ASMA	80
TABLA 30: CASOS EVITADOS DE ADMISIONES HOSPITALARIAS POR NEUMONÍA	81
TABLA 31: DÍAS DE ACTIVIDAD RESTRINGIDA RECUPERADOS.....	81
TABLA 32: DÍAS DE ACTIVIDAD RESTRINGIDA MENOR RECUPERADOS	82
TABLA 33: DÍAS DE PÉRDIDA LABORAL RECUPERADOS	82
TABLA 34: VALORES UNITARIOS FONASA	83

TABLA 35: VALORES UNITARIOS ISAPRE	84
TABLA 36: TASA DE INCIDENCIA, MORTALIDAD, REGIÓN METROPOLITANA.....	86
TABLA 37: TASA DE INCIDENCIA, HOSPITALIZACIONES CARDIOVASCULARES, REGIÓN METROPOLITANA	86
TABLA 38: TASA DE INCIDENCIA, DÍAS DE PÉRDIDA LABORAL, REGIÓN METROPOLITANA.....	86

Introducción

La contaminación atmosférica representa el mayor riesgo medioambiental para la salud humana. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), este tipo de contaminación causa más de 4 millones de muertes cada año, principalmente en los países en desarrollo. Esta contaminación se vincula principalmente a enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón, siendo las partículas finas (MP_{2,5}) una de las que presenta mayor daño por su capacidad de penetrar profundamente en el organismo. Las principales fuentes de emisión incluyen la quema de combustibles fósiles en transporte, industria y hogares que utilizan combustibles contaminantes.

La exposición a la contaminación del aire afecta de manera desproporcionada a poblaciones vulnerables como niños, ancianos y comunidades en situación de pobreza. Por ello, organismos internacionales hacen un llamado urgente a implementar políticas que reduzcan las emisiones contaminantes, promuevan energías limpias y mejoren la calidad del aire. Estas acciones no solo protegen la salud pública, sino que también contribuyen a la equidad social y a la conservación del medio ambiente.

El impacto del material particulado ha provocado que, desde la década de 1980, la Organización Mundial de la Salud (OMS) destaque su potencial cancerígeno [10], como también su capacidad para penetrar profundamente en los tejidos, específicamente del aparato respiratorio. Esto ha impulsado el desarrollo de tecnologías de mitigación o adaptación en diferentes sectores de la industria, en el caso de la industria automotriz, se han generado mejoras en los sistemas de combustión, que comprenden desde el motor hasta los sistemas de escape, tales como la implementación de filtros de partículas Diesel y convertidores catalíticos cuyo funcionamiento ha mostrado ser muy efectivo en la remoción de partículas finas y ultrafinas de los gases de escape.

A partir de 1990, diversas autoridades, incluidas las de Europa y Estados Unidos, comenzaron a exigir el uso de un filtro de partículas diesel (DPF) para cumplir con normas de reducción de emisiones cada vez más estrictas, como las normas Euro y EPA, que son un conjunto de regulaciones de la Unión Europea que establecen límites máximos para las emisiones contaminantes de los vehículos nuevos que se venden en sus estados miembros, como los óxidos de nitrógeno y las partículas, las que han sido fundamentales en la reducción de las emisiones de material particulado en vehículos diésel. Dentro del escenario actual, en el año 2022 algunos países comenzaron con la aplicación de normas de medición de número de partículas, con el fin realizar una transición desde una medición de opacidad, cuyos resultados

presentan falta de precisión, debido a que este procedimiento no mide cantidad, sino que basa su análisis en las propiedades ópticas de los gases de escape, cuantificando la emisión visible humo negro. Lo anterior genera un problema, puesto que guiarse por un patrón de visual solamente resulta bastante impreciso de cuantificar si lo que se busca es reducir las emisiones de partículas y/o gases nocivos de un vehículo. Dentro de este contexto, Bélgica comenzó con esta iniciativa, le siguen Alemania, Suiza y los Países Bajos, mostrando un avance fundamental, al establecer con claridad una tasa de rechazo, para el caso de que las emisiones superen los límites que estipularon, categorizados entre 100.000 y 250.000 partículas por centímetro cúbico según el país.

Dentro del contexto nacional, el Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina (CALAC+) iniciativa diseñada para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático en ciudades clave de América Latina (financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) e implementado por Swisscontact, cuya función como ONG es ayudar a mitigar la pobreza en países en vías de desarrollo), tiene como objetivo reducir la contaminación del aire y abordar los desafíos del cambio climático en cuatro ciudades seleccionadas: Lima, Santiago, Ciudad de México y Bogotá . La iniciativa de CALAC+ busca cumplir con la reducción de gases de efecto invernadero en distintas ciudades de América latina, por lo cual el Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, solicitan apoyo técnico para la generación de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES), con el fin de obtener antecedentes e insumos técnicos para la aplicación de una norma de medición de partículas en todo el territorio nacional. El fin es realizar un reemplazo a los métodos usados en el país hasta esta fecha en las plantas de revisión técnica del país. Bajo este escenario y teniendo en cuenta que Chile se encuentra en la transición a la aplicación de la norma de emisiones Euro VI, cuya reducción en [mg/km] de partículas contaminantes es considerable, principalmente en los óxidos de nitrógeno y en los compuestos orgánicos volátiles (COVs), implicaría que junto con la aplicación de la medición de partículas a lo largo del territorio podrían garantizar una mejora significativa en los indicadores actuales de calidad de aire, produciendo un impacto tanto en la salud y bienestar de su población como también en beneficios relacionados a la menor pérdida de productividad del sector laboral.

Objetivos

Objetivo general

El objetivo general se basa en la realización de un análisis costo-beneficio de la aplicación de una

norma de medición de número partículas de vehículos diésel en Chile.

Objetivos específicos

1. Revisar el contexto internacional de la aplicación de la norma de medición de número de partículas y sus impactos en salud.
2. Estimar los beneficios económicos en la salud de la población nacional a partir del análisis de la función de daño en un horizonte de 10 años.
3. Calcular los costos incrementales asociados a la implementación de la norma en el período 2026-2036.
4. Realizar el análisis costo-beneficio de la aplicación de la norma en todo el territorio nacional.

Estructura de la memoria

El presente trabajo comprende cuatro capítulos desarrollados y organizados para explicar los aspectos más relevantes sobre el análisis costo-beneficio de la aplicación de una norma de medición de número de partículas. Para ello se aborda un análisis del material particulado y sus efectos, además de exponer las metodologías utilizadas para evaluar sus implicancias en la salud y los costos asociados. A continuación, se describen, de manera global, los capítulos desarrollados en esta memoria.

El primer capítulo aborda los efectos del material particulado en la salud humana, detallando su impacto principalmente en el sistema respiratorio y cardiovascular, con especial énfasis en los grupos vulnerables de la población. También se presentan los procedimientos internacionales utilizados para el conteo y medición del número de partículas, destacando los estándares y metodologías. Finalmente se detalla el proceso en la elaboración de un AGIES, a modo de contextualizar los capítulos siguientes.

En el segundo capítulo, se analizan los beneficios económicos en salud derivados de la reducción del material particulado en el aire. Se enfatiza en la metodología utilizada para el cálculo, abarcando la estimación de emisiones y concentración ambiental de $MP_{2,5}$, lo que junto con la información entregada por el Ministerio del Medio Ambiente (coeficientes de riesgo unitario y tasas de incidencia) permiten obtener el número de casos evitados, cuya finalidad corresponde a su valorización para ser comparados con los costos de implementación de la norma de medición.

El tercer capítulo está orientado a la evaluación de los costos asociados a la aplicación de la norma de medición de número de partículas, en donde está involucrada la obtención de los equipos de medición, la implementación de estos en las diferentes plantas de revisión técnicas a lo largo del país y también el costo de los filtros de partículas que deben obtener los vehículos cuyo filtro este defectuoso y exceda el máximo de emisión permitido. Además, comprende el análisis de las distintas tasas de rechazo para diferentes tipos de vehículos analizados en distintas plantas de revisión técnica en el país.

En el cuarto capítulo se presenta un análisis costo-beneficio relacionado con la implementación de medidas destinadas a la reducción del material particulado 2,5 en Chile. Este análisis incluye la evaluación de las tasas de rechazo, los beneficios económicos estimados, y los costos finales ajustados a valor presente. Finalmente, se calcula la relación beneficio-costos, cuyo valor debe

superar la unidad para demostrar la viabilidad económica del proyecto, lo que asegura su respaldo y justificación para su aplicación práctica en el territorio nacional.

Capítulo 1: Estado del arte

1.1 Material particulado y sus efectos en salud

Los motores diésel son ampliamente empleados en el transporte y la generación de energía, siendo una opción predominante para vehículos de gran tamaño. Entre sus principales ventajas destacan su alta eficiencia, su robustez y la durabilidad. Sin embargo, al igual que cualquier motor de combustión interna no está ajeno a las emisiones de los gases de escape y a los efectos relacionados tanto en el ambiente como en la salud de los seres vivos.

La población general se expone a las emisiones de motores diésel principalmente a través del tráfico. Sin embargo, los trabajadores pueden estar expuestos de manera adicional por diversas fuentes tanto fijas como móviles, tales como:

- Vehículos de carretera (incluyendo automóviles, autobuses, camiones y furgonetas).
- Maquinaria de construcción y agrícolas (como carretillas elevadoras, tractores, cosechadoras y excavadoras).
- Embarcaciones, tanto marítimas como de ríos y lagos.
- Locomotoras.
- Equipos estacionarios (como compresores, bombas, generadores eléctricos, grúas y otros implementos utilizados en la industria y la agricultura).

Dentro de las emisiones provocadas por un motor diésel se encuentra el material particulado, específicamente el $MP_{2,5}$, contaminante atmosférico compuesto por partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros, tal como se observa en la Figura 1.

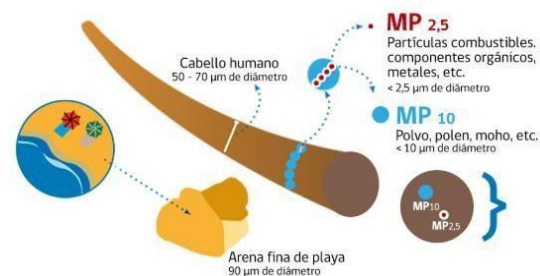


Figura 1: Dimensiones del material particulado.

Estas partículas poseen características físicas y químicas diversas que dependen de su origen y formación, clasificándose en primarias (emitidas directamente a la atmósfera, como en procesos de combustión) y secundarias (formadas por reacciones químicas en la atmósfera, como la oxidación de gases precursores). Su estudio y análisis presenta suma relevancia por sus efectos nocivos en salud y además porque es la base central de este trabajo. El MP se clasifica según su composición en base a tres categorías, en cada una de ellas se detalla además sus daños en la salud y medioambiente:

Fracción Sólida (SOL)

La fracción sólida del material particulado está compuesta principalmente por sustancias inorgánicas y carbono elemental que no se disuelven en compuestos orgánicos o acuosos. Estas partículas tienen las siguientes características y componentes principales:

Carbono elemental:

También conocido como carbono negro u hollín, es un subproducto de la combustión incompleta de materiales como combustibles fósiles y biomasa. Es químicamente estable, insoluble y una de las principales fracciones sólidas del material particulado. Dentro de su generación el mercado automotriz cuenta con cerca de un 10% de la responsabilidad, abarcando un porcentaje menor frente a la quema de leña residencial, su principal fuente. En las comunas de Temuco y Padre las casas realizaron un AGIES acerca de la aplicación de un Plan de prevención y descontaminación ambiental (PPDA), que involucró a grandes rasgos la mejora de la infraestructura térmica domiciliaria, recambio de calefactores, prohibición de venta de leña en viviendas nuevas y recambio de buses [2]. En este análisis se evidenció que la prohibición/disminución de venta de leña es la acción que provocaría en un eventual escenario la mayor disminución de emisiones de MP_{2,5} y en consecuencia los casos de hospitalizaciones o emergencias respiratorias en salud.

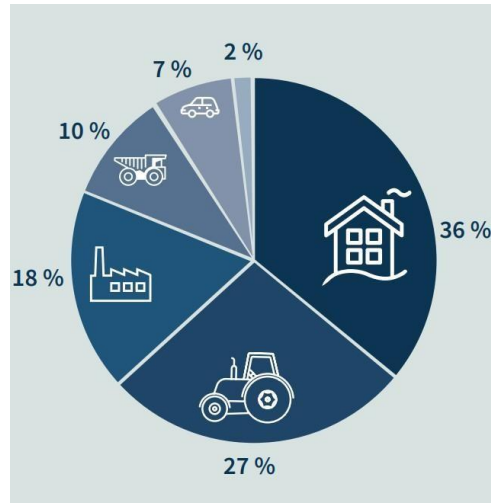


Figura 2: Principales fuentes de generación de Carbono Negro.

Fuente: "El aire que respiramos", 2020.

Además de los graves daños que produce en la salud, también contribuye al oscurecimiento de las superficies, incrementando la absorción de radiación solar desde la atmósfera hacia la superficie. Esto provoca cambios climáticos locales, como el derretimiento del glaciar Olivares en la cordillera de los Andes, debido a la pérdida del albedo (capacidad de las superficies para reflejar la radiación solar), causada principalmente por la actividad minera en la zona.



Figura 3: Oscurecimiento de los glaciares a causa del black carbon.

Fuente: Fundación glaciares chileno, 2021.

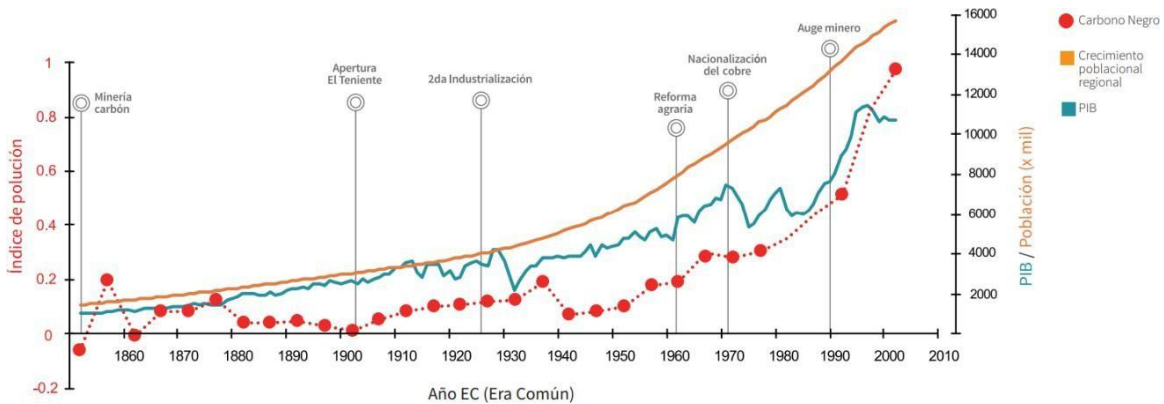


Figura 4: Relación de crecimiento poblacional versus generación de Carbono Negro.

Fuente: “El aire que respiramos”, 2020.

En la **Figura 4** se puede analizar que el aumento del Carbono Negro generado aumenta al mismo ritmo del PIB, lo que genera una problemática que se ha extendido por décadas, la que consiste en tratar de converger el progreso económico de un país con los avances en materia medioambiental.

Lo anterior es una de las metas de la Agenda 2030 de desarrollo sostenible, la cual tiene como uno de sus objetivos disminuir o controlar las zonas saturadas por material particulado y también incentivar la economía circular, centrándose en la gestión de residuos, lo que conlleva en términos generales a una menor contaminación por parte de las industrias productivas.

Cenizas (CaO, Zn, Mg, Fe, Al, Cu, Cr):

Son Residuos sólidos que quedan después de la combustión de materiales que contienen minerales. Están compuestas por óxidos metálicos y otros elementos inorgánicos, como calcio (CaO), zinc (Zn), magnesio (Mg), hierro (Fe), aluminio (Al), cobre (Cu) y cromo (Cr). Estas partículas son responsables de efectos abrasivos y corrosión tanto sobre materiales como de superficies expuestas.

Fracción Orgánica Soluble (SOF)

La Fracción Orgánica Soluble (SOF) incluye compuestos químicos orgánicos que son solubles en solventes orgánicos y que están presentes en el material particulado. Estas partículas tienen

una composición compleja y provienen principalmente de emisiones de vehículos, procesos industriales y fuentes naturales como incendios forestales.

PAH (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos):

Son compuestos orgánicos formados por múltiples anillos de benceno. Se generan durante la combustión incompleta de materiales orgánicos, como madera, petróleo y carbón. Muchos PAH tienen propiedades cancerígenas y pueden ser transportados en partículas finas a través de largas distancias en la atmósfera.

Dioxinas:

Son compuestos altamente tóxicos que se producen como subproductos de procesos industriales, como la quema de residuos y la fabricación de pesticidas o herbicidas. Se acumulan en el medio ambiente y en los tejidos grasos de los organismos vivos, representando un grave riesgo para la salud humana y la biodiversidad.

Partículas Sulfatadas (SO₄)

Las partículas sulfatadas están compuestas principalmente por sulfatos y ácido sulfúrico, que se forman a partir de procesos químicos en la atmósfera, lo que las categoriza como una fuente secundaria:

Ácido sulfúrico (H₂SO₄):

Se produce por la oxidación de dióxido de azufre (SO₂) en la atmósfera, generalmente mediante reacciones con agua y oxígeno en presencia de catalizadores, como partículas metálicas. Estas partículas son higroscópicas, lo que significa que atraen agua, contribuyendo a la formación de aerosoles y nieblas ácidas.

Cuando el ácido sulfúrico se deposita en la superficie terrestre, puede acidificar el agua y el suelo, dañando ecosistemas y estructuras; además, las partículas finas sulfatadas pueden penetrar profundamente en los pulmones, causando problemas respiratorios y cardiovasculares, mientras que los sulfatos presentes en la atmósfera reflejan la radiación solar, generando un

efecto de enfriamiento que puede contrarrestar parcialmente el calentamiento global causado por otros contaminantes.

A continuación, en la **Figura 5** se visualiza un resumen de los componentes del $MP_{2.5}$.

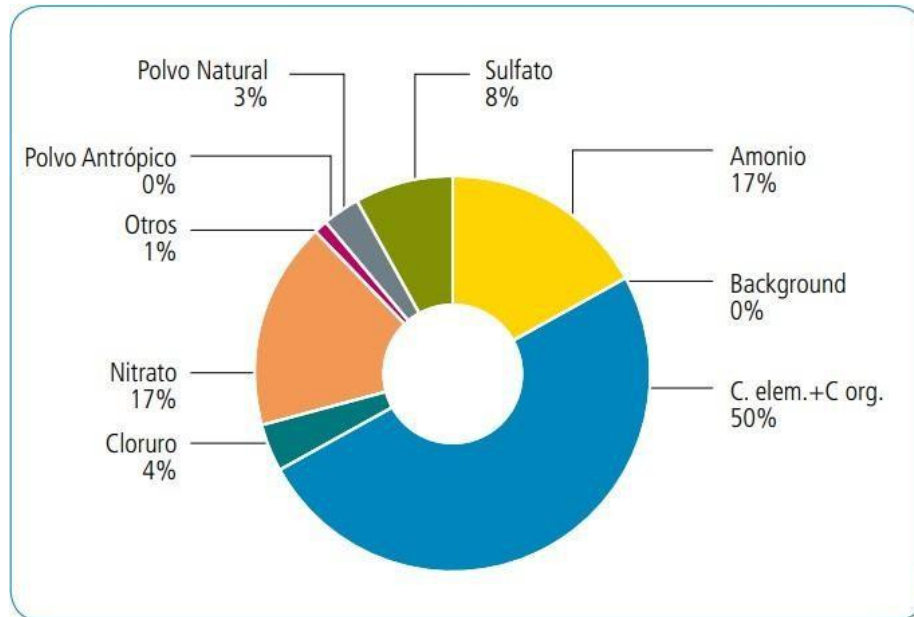


Figura 5: Fracción de componentes elementales $MP_{2.5}$.

Fuente: Martínez, CONAMA, 2007.

Ahora bien, la relevancia en términos másicos del material particulado en el total de las emisiones de escape de los vehículos diésel posee poca relevancia, no obstante, debido a sus serios impactos en la salud humana han cobrado una sustancial importancia en el estudio de este tema, debido a su predominancia en número. Este tipo de partículas se clasifica en primera instancia según su tamaño, como se observa a continuación.

Partículas MP_{10} (Material Particulado Inhalable)

Descripción: Las MP_{10} incluyen partículas con un diámetro de hasta 10 micrómetros. Aunque no pueden penetrar los tejidos de los alvéolos como las $MP_{2.5}$, son lo suficientemente pequeñas para llegar a las vías respiratorias superiores, afectando principalmente la tráquea y los bronquios.

Estas partículas están compuestas de polvo, polen y otros compuestos tanto inorgánicos como orgánicos.

Impacto en la Salud y mortalidad: La exposición a MP_{10} se ha asociado con el desarrollo y exacerbación de enfermedades respiratorias, como la bronquitis crónica y el asma, especialmente en poblaciones sensibles como niños y personas mayores, los cuales abarcan los grupos etarios fundamentales en los cuales se centra el estudio. Aunque el riesgo cardiovascular es menor que con las $MP_{2,5}$, la exposición crónica aún puede agravar condiciones respiratorias y reducir la función pulmonar.

Partículas $MP_{2,5}$ (Material Particulado Fino)

Descripción: Las $MP_{2,5}$ son partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 2,5 micrómetros. Debido a su pequeño tamaño, pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio, alcanzando los alvéolos pulmonares. Están compuestas por una mezcla de compuestos orgánicos, metales pesados y sulfatos. Este tipo de partículas posee gran relevancia en este estudio, dado que más adelante se estudia su impacto en el cambio de efectos en salud, tanto en morbilidad como mortalidad.

Impacto en la Salud y mortalidad: La exposición a $MP_{2,5}$ se ha asociado con un aumento en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Estudios han demostrado que incrementos en la concentración de $MP_{2,5}$ están relacionados con un mayor riesgo de hospitalización por enfermedades como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y el asma. Además, se ha observado una correlación entre la exposición a $MP_{2,5}$ y el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas, como el Alzheimer y el Parkinson [12].

Partículas Ultrafinas (UFP)

Descripción: Las partículas ultrafinas tienen diámetros menores a 100 nanómetros (0,1 micrómetros). Estas partículas son generadas en gran parte por la combustión incompleta de combustibles fósiles y se caracterizan por su elevada área superficial, que facilita la absorción de compuestos tóxicos en su superficie. Debido a su pequeño tamaño, pueden ingresar directamente al torrente sanguíneo a través de los alvéolos.

Impacto en la Salud y mortalidad: Las UFP son especialmente peligrosas debido a su capacidad para alcanzar el sistema nervioso central, ya que pueden cruzar la barrera hematoencefálica.

Estudios han asociado la exposición a UFP a inflamación pulmonar y exacerbar enfermedades como la EPOC. A nivel celular, las UFP inducen estrés oxidativo y metilación en el ADN [11], lo que puede contribuir a enfermedades crónicas y cáncer.

Nanopartículas:

Descripción: Las nanopartículas tienen diámetros generalmente inferiores a 50 nm y están formadas principalmente por compuestos orgánicos volátiles (COVs), hidrocarburos no quemados, y productos de la combustión incompleta.

Impacto en la Salud: Al inhalarse, las nanopartículas pueden llegar hasta los alvéolos pulmonares, causando inflamación y exacerbando enfermedades respiratorias como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Debido a su tamaño son capaces de atravesar la barrera hematoencefálica tal como ocurre con las UFP. Otra de las conclusiones que se puede realizar tiene relación con los aspectos más críticos que hace especialmente peligrosas a las partículas ultrafinas (UFPs) es su extrema área superficial por unidad de masa. A medida que el tamaño de las partículas disminuye, su relación superficie/volumen aumenta exponencialmente. Esto significa que, aunque su masa total sea baja en comparación con partículas más grandes, su superficie total es mucho mayor, lo que les permite adsorber y transportar una gran cantidad de compuestos tóxicos. Entre estos compuestos se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), metales pesados como el plomo y el níquel, y radicales libres altamente reactivos. Estas sustancias, al estar unidas a la superficie de las UFPs, pueden ingresar al organismo con facilidad, facilitando su transporte hacia los tejidos más sensibles del cuerpo. De este modo, las UFPs no solo representan un riesgo físico por su tamaño, sino también un riesgo químico elevado debido a la carga tóxica que pueden portar.

Por otro lado, las partículas ultrafinas presentan una baja tasa de eliminación biológica una vez que ingresan al sistema respiratorio. A diferencia de las partículas más grandes, que suelen ser retenidas en las vías respiratorias superiores y eliminadas mediante mecanismos como la mucosa, las UFPs pueden evadir estos sistemas defensivos debido a su tamaño nanométrico. Al depositarse profundamente en los alvéolos pulmonares, su eliminación depende principalmente de los macrófagos alveolares, células del sistema inmunológico encargadas de fagocitar cuerpos extraños [13].

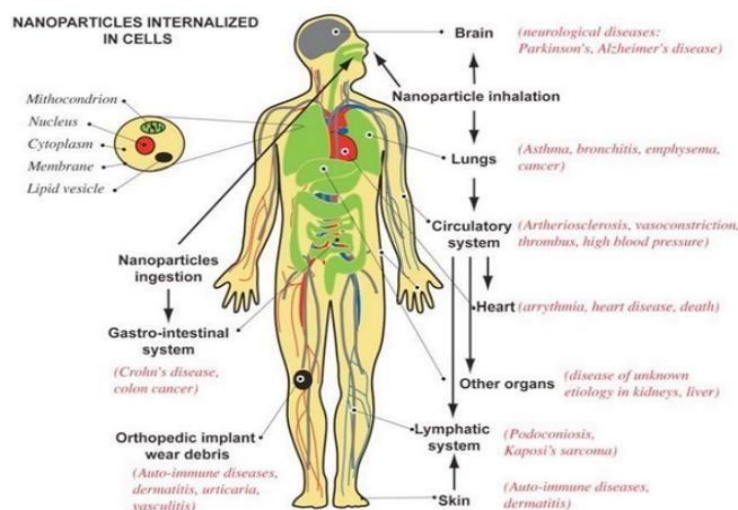


Figura 6: Efectos en la salud humana de las partículas generadas por la combustión.

Fuente: Karagkiozaki, 2016.

La imagen anterior ejemplifica de forma clara que los impactos en salud no involucran sólo efectos en el sistema cardiovascular y respiratorio, sino que abarcan todos los sistemas que componen el cuerpo humano. En Canadá se realizó un estudio [4] en animales que ejemplifica otro tipo de daño en la salud. Evaluó los efectos del material particulado (MP₁₀) administrado oralmente, mostrando como su impacto trasciende los efectos respiratorios. Ratones fueron expuestos a MP₁₀ urbano por 7 a 14 días, lo que alteró la expresión de genes relacionados con la inmunidad, aumentó la secreción de citocinas proinflamatorias en el intestino delgado, incrementó la permeabilidad intestinal y generó hiporrespuesta en las células esplénicas (esplenocitos). En exposiciones prolongadas (35 días), se observó un incremento en la inflamación del colon, cambios en las concentraciones de ácidos grasos de cadena corta esenciales para la salud intestinal y alteraciones en la microbiota. Los ratones deficientes en IL-10, un gen inmunosupresor, evidenciaron un daño histológico más severo y una inflamación exacerbada. Este trabajo resalta el daño global que el material particulado provoca no sólo afectando los órganos respiratorios, sino que tiene implicancias sistémicas, especialmente sobre la salud intestinal y metabólica, al favorecer estados inflamatorios y alteraciones en la barrera intestinal. Estos resultados refuerzan la necesidad de reducir la exposición al MP como medida para prevenir tanto enfermedades respiratorias como trastornos sistémicos, ampliando el espectro de los beneficios asociados al control de este contaminante.

A continuación, en la **Figura 7** se muestra un gráfico realizado a partir de un estudio del Dr. David Kittelson que relaciona la distribución de diámetro, deposición alveolar y concentración del material particulado presente en el aire. Este análisis contribuyó en gran medida al panorama científico en el estudio de los efectos y repercusión que tiene este tipo de contaminantes en los seres humanos.

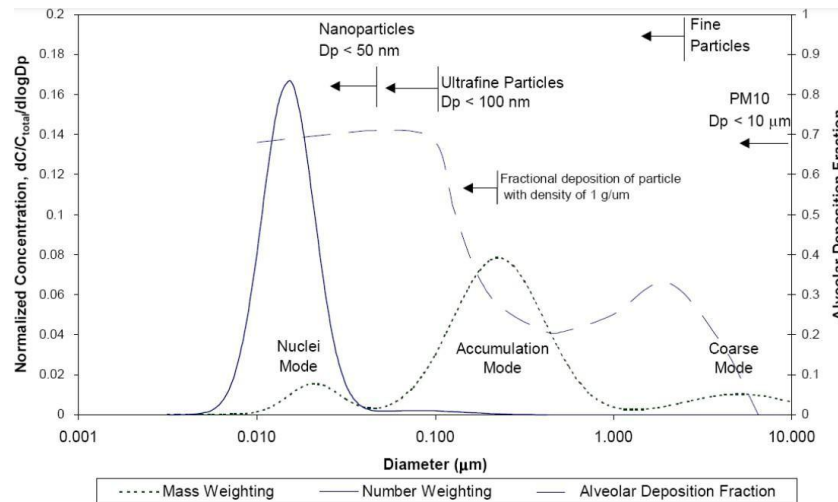


Figura 7: Distribución de tamaños de partículas generadas por un motor Diesel.

Fuente: Kittelson, 1998.

Este gráfico muestra la relación entre el tamaño de las partículas suspendidas en el aire y su comportamiento en términos de concentración normalizada, peso numérico, y fracción de deposición alveolar. A continuación, se detalla cada componente, haciendo la distinción entre los tres ejes y curvas presentadas:

Ejes del gráfico

Eje horizontal (diámetro en micrómetros, μm): Representa el tamaño de las partículas en una escala logarítmica, desde nanopartículas (menos de $0.01\ \mu\text{m}$) hasta partículas gruesas (mayores de $10\ \mu\text{m}$).

Eje vertical izquierdo (concentración normalizada): Indica la proporción de partículas según su tamaño, medida en función de peso o número.

Eje vertical derecho (fracción de deposición alveolar): Muestra que fracción de las partículas logra depositarse en la región alveolar de los pulmones, según su tamaño. Este parámetro es crucial para comprender el daño a la salud en los seres vivos provocados por las partículas.

Curvas del gráfico

Mass Weighting (Curva punteada): Representa la concentración de partículas ponderada por su masa. Las partículas más grandes (modo grueso) contribuyen significativamente a la masa total debido a su mayor peso.

Number Weighting (Curva continua): Indica la distribución de partículas según su número. Las nanopartículas son más numerosas, a pesar de que su contribución a la masa total sea pequeña.

Alveolar Deposition Fraction (Curva discontinua con puntos): Representa la fracción de partículas de cada tamaño que se depositan en los alvéolos pulmonares. Las partículas ultrafinas (entre 0.01 y 0.1 μm) tienen la mayor probabilidad de depositarse en esta región debido a su tamaño, que facilita su penetración en las vías respiratorias profundas.

Sumado a ello, este diagrama muestra los modos o generación por las que se producen los distintos tipos de material particulado según su tamaño.

Con respecto a los modos presentes en el gráfico, se distinguen tres:

Modo de Nucleación: El modo de nucleación incluye partículas ultrafinas con un diámetro generalmente menor a 50 nanómetros (nm). Estas partículas se forman inmediatamente después de la combustión, en los primeros momentos en los que los gases de escape se enfrían y expanden. El proceso de nucleación ocurre cuando los gases volátiles (como hidrocarburos no quemados y ácido sulfúrico) se condensan en pequeñas gotas o se mezclan sobre partículas ya existentes, formando partículas nuevas a partir de esta condensación y solidificación de vapores. Las partículas en el modo de nucleación están compuestas principalmente de compuestos volátiles y líquidos, como ácido sulfúrico, hidrocarburos y otros compuestos orgánicos volátiles. Tienen una masa muy baja en comparación con partículas más grandes, pero representan la mayor parte en términos de número de partículas.

Modo de Acumulación: El modo de acumulación incluye partículas con diámetros que oscilan entre 50 y 500 nanómetros. Estas partículas surgen de procesos de coagulación y condensación secundaria, en los cuales las partículas del modo de nucleación se agrupan o se condensan con otras partículas más grandes. Este proceso ocurre a medida que los gases de escape se enfrían progresivamente, lo que permite que las partículas de nucleación más pequeñas se adhieran a partículas preexistentes, creando así partículas más grandes en el rango de acumulación. Estos procesos de coagulación y condensación provocan que las partículas características de este modo permanezcan suspendidas en el ambiente por más tiempo.

Modo grueso: Las partículas en el modo grueso tienen diámetros superiores a 1 micrómetro (1000 nanómetros). Estas partículas no se generan directamente en el proceso de combustión, sino que son el resultado de procesos de re-suspensión, como el desprendimiento de material depositado en las paredes del sistema de escape o en la cámara de combustión. También pueden formarse por la fragmentación de partículas más grandes debido a la vibración del motor y a la turbulencia en los gases de escape.

Las partículas en el modo grueso están compuestas por material no quemado, como fragmentos de metal y cenizas, además de polvo y otras impurezas. Debido a su gran tamaño, suelen asentarse rápidamente en el suelo o en las superficies cercanas, lo que limita su presencia en el aire por períodos prolongados.

Se puede concluir a partir del análisis anterior que el mayor número de partículas tiene relación con partículas ultrafinas y nanopartículas, las que tienen mayor capacidad de penetración en los alvéolos y en el sistema nervioso debido a sus efectos neurotóxicos, característicos de las partículas que se encuentran entre el modo de nucleación y acumulación, mientras que las partículas presentes en el modo grueso afectan las vías respiratorias superiores.

1.2 Procedimientos internacionales de fiscalización

Habiendo detallado los impactos en salud generados por el material particulado, se procede a la explicación de los procedimientos utilizados a nivel internacional y equipos utilizados para el conteo de número de partículas dado que este parámetro es de suma relevancia en los efectos en salud revisados con anterioridad. La relevancia que cobra este método va relacionada principalmente a la incapacidad que posee la medición de opacidad y masa para poder medir partículas no quemadas en el motor que poseen un diámetro aerodinámico menor a $0,1[\mu\text{m}]$, esto ocurre porque la luz atraviesa el medio sin desviarse significativamente en el opacímetro, lo que genera poca o ninguna reducción en la intensidad detectada. Los detectores ópticos que poseen los equipos tienen un umbral mínimo de sensibilidad. Si la cantidad de luz dispersada o absorbida por partículas muy pequeñas es demasiado baja, queda por debajo del límite de detección del equipo. También algunas partículas ultrafinas pueden evaporarse justo antes del momento que ocurra la medición lo que dificulta aún más su medición.



Figura 8: Opacímetro marca Capelec.

Es por ello que se plantea realizar el cambio a una medición por conteo de número de partículas, cuya regulación en algunos países de Europa ya está estipulada hace un par de años. En 2012 Suiza implementó por primera vez una norma de este estilo para maquinaria fuera de ruta, asimismo durante el 2022, en Flandes (Bélgica) se introdujo la primera normativa relacionada con el conteo de partículas, seguida de Bruselas y Valonia. Posteriormente, en 2023, otros países como Países Bajos, Alemania y Suiza establecieron regulaciones específicas propias, cada una con requisitos particulares para la calibración de los equipos de medición.

En Chile, las primeras pruebas a gran escala se realizaron en 2016 en el sistema de transporte público Transantiago (actual RED Metropolitana de Movilidad), empleando el dispositivo de medición TSI NPET. Estas pruebas evidenciaron una distribución bimodal en el conteo de partículas, destacando las limitaciones de las mediciones de opacidad, las que se evidencian en la **Figura 9**, en donde según la norma que se aplica actualmente en los países europeos, los valores dentro del rectángulo rojo deberían ser rechazados en las plantas de revisión técnica por exceder el máximo de 250.000 [partículas/ cm³].

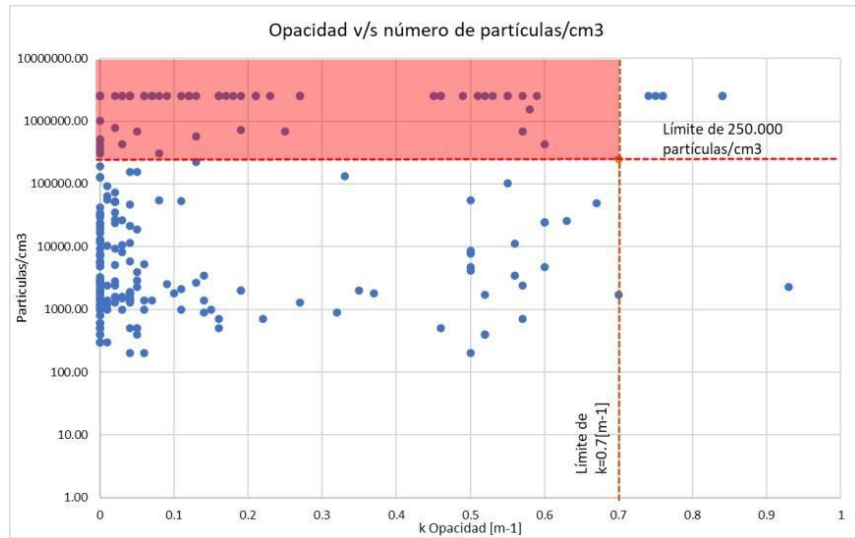


Figura 9: Número de partículas versus opacidad.

Fuente: CALAC+, 2021.

Más adelante, en 2020, la empresa Purexhaust volvió a validar esta tecnología utilizando el mismo instrumento para analizar 372 autobuses con estándares Euro VI, V y III, con filtros de partículas diésel (DPF) como sin DPF, siguiendo un protocolo recomendado por la autoridad suiza FOEN. Los resultados permitieron diferenciar con claridad entre filtros funcionales y aquellos con deterioros. Durante ese periodo, CALAC+ formó un grupo de trabajo en América Latina para evaluar las experiencias europeas y analizar su aplicabilidad en países de la región, incluyendo Chile.

En 2021, bajo el contrato de CALAC+ para los Ministerios de Medio Ambiente (MMA) y Transporte (MTT) de Chile, Purexhaust llevó a cabo 1536 mediciones en 989 vehículos ligeros con estándares Euro 5 y Euro 6 en una Planta de Revisión Técnica en Santiago [5]. Estas pruebas, realizadas con dos modelos distintos de dispositivos de conteo, evidenciaron un alto porcentaje de filtros dañados o retirados, al tiempo que demostraron la viabilidad de la tecnología como reemplazo de la medición de opacidad, sin embargo, debido a la alta tasa de rechazo presente en los vehículos analizados, se sugiere un mantenimiento de mayor frecuencia en los equipos y además optar por equipos más costosos y sofisticados que puedan soportar la gran cantidad de vehículos medidos que se encuentren fuera de norma.

A solicitud de los Ministerios de Medio Ambiente y de Transporte de Chile, CALAC+ contrató una consultoría para desarrollar un análisis costo beneficios con alcance nacional. Este estudio tiene como objetivo implementar una norma que

controle el número de partículas en todos los vehículos equipados con sistemas DPF, tanto de fábrica como adaptados, abarcando vehículos livianos, medianos y pesados.

Ahora con el fin de complementar el estudio a realizar se muestran las normas que rigen la cantidad máxima permitida en número de partículas para aceptar/rechazar un vehículo al momento de utilizar los equipos contadores de partículas, los que serán detallados más adelante.

A continuación, en la **Tabla 1** se presentan las normas utilizadas actualmente en 4 países de Europa para la medición de número de partículas de vehículos Diesel.

Tabla 1: Normas vigentes en Europa.

PAÍS/REGIÓN	VIGENCIA	NORMA
Suiza	01/01/2023	SR 941.242 Verordnung des EJPD (15/04/2021)
Bélgica (Flandes, Bruselas, Valonia)	24/03/2022	(Flandes) Gobierno flamenco/numac Enmienda 2022030822/pub.24/03/2022
Países Bajos	01/01/2023	NMI PNC Part 1 & 2 draft 2019 & 2024/02/21
Alemania	01/07/2023	PTB-A 12.16 (mayo 2021) ⁴
EU (recomendación)	01/01/2023	Recomendación de la Comisión de 20/3/2023

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Tabla 2: Clases de vehículos sobre los que se aplican las normas.

PAÍS/REGIÓN	CLASES DE VEHÍCULOS
Suiza	B de Euro 5b y A 1-2 de las clases de vehículos Euro VI; maquinaria con DPF de Stage V.
Bélgica (Flandes, Bruselas, Valonia)	B & A1 (Flandes y Bruselas >Euro5a); (Valonia >E5b).

Países Bajos	Clase B para Euro (4) + 5 + 6; Clase A 1-2 para VI. Exención para dar de baja el DPF en RDW para privados hasta 2016 y LDV hasta 2012 sujetos al impuesto sobre el MP.
Alemania	Clase b & A 1-2 Euro 6 / VI. Se estudia una posible ampliación a B Euro 5b.
EU (recomendación)	Clase B y A1-2 con LDV a partir del 1 de enero de 2013 (Euro 5 b o más reciente) y HDV a partir del 1 de enero de 2014 (Euro VI o más reciente). Incluye híbridos con motor térmico encendido.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Para propósito de este informe se utilizan las categorías de vehículos definidas en Chile, correspondientes a:

Clase A1:

- Vehículos de transporte de personas de más de nueve asientos.
- Vehículos motorizados de carga.
- Vehículos de transporte.
- Vehículos de transporte escolar.

Clase A2:

- Vehículos medianos y pesados de pasajeros con capacidad máxima de 9 asientos.
- Vehículos medianos y pesados de carga.
- Taxis básicos, colectivos, ejecutivos y de turismo.
- Autoescuela y Transporte Escolar.

Clase B:

- Vehículos livianos y medianos de pasajeros con un máximo de 9 asientos.
- Vehículos livianos y medianos de carga con capacidad hasta 1.750 [kg].

La clase de vehículos para los cuales serán aplicadas estas normas son principalmente vehículos clase A y B que estén homologados bajo Euro V B o Euro VI, con sutiles diferencias entre un país y otro. En cuanto a los límites aceptados de concentración de número de partículas para los países anteriormente mencionados, se detallan en **Tabla 3** el protocolo que posee cada país.

Tabla 3: Valores límites de concentración de partículas.

PAÍS/REGIÓN	VALOR LÍMITE	CANTIDAD DE PLANTAS	MEDICIONES A LA FECHA	TASA RECHAZO
Suiza	250.000 [cm ⁻³] para las clases B y A @2.000 rMP. Para NRMM alto ralenti sin carga	75	6.300 (Thurgau)	10 - 15%
Bélgica (Flandes1, Bruselas, Valonia)	1,000,000 [cm ⁻³] Consulta ≥250,000 ≤ 1,000,000 [cm ⁻³]	77	1.995.251	9,32% (13,2% @250.000)
Países Bajos	1,000,000 [cm ⁻³]	7.900	970.000	6,5%
Alemania	250,000 [cm ⁻³]	33.903	1.911.451	4,82%
EU (recomendación)	250,000 [cm ⁻³] preferible, pero hasta 1,000,000 [cm ⁻³]			

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

En Chile, la implementación de normas para el control del material particulado resulta esencial para garantizar una gestión ambiental efectiva, y debe fundamentarse en las mejores prácticas internacionales que aseguren precisión y confiabilidad en las mediciones. Esto implica la adopción de estándares reconocidos globalmente, como la ISO 27.891, que establece métodos específicos para medir la concentración de partículas en el aire como la medición de número de

partículas en un rango de tamaño de entre (5 – 1000) [nm] y define los requisitos para tanto el muestreo como para el mantenimiento de equipos, garantizando la uniformidad en los procedimientos de calibración. Este estándar es particularmente relevante para asegurar que las mediciones realizadas en el país sean consistentes y comparables con las realizadas en otras regiones del mundo.

Adicionalmente, la implementación de la UNECE Regulation 49, desarrollada por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, proporciona un marco para el control de emisiones en vehículos diésel. Este reglamento, ampliamente adoptado en Europa, incluye requisitos específicos para el conteo de partículas y permite alinear los estándares de emisiones de Chile con los utilizados internacionalmente. Tal alineación no solo facilita la comparación de resultados entre países, sino que también promueve el cumplimiento normativo de los vehículos importados.

Asimismo, el Reglamento EU 2017/1151 complementa estas normativas al abordar la homologación de vehículos de motor con relación a las emisiones de vehículos livianos y comerciales. Este reglamento incluye, en su Anexo XXI, procedimientos detallados para la calibración de equipos de ensayo, incluyendo contadores de partículas. Dado que este reglamento se basa en el Reglamento N°154 de las Naciones Unidas, su adopción en Chile permitiría estandarizar las pruebas realizadas en el contexto nacional con metodologías ya reconocidas internacionalmente.

En resumen, adoptar estas normativas internacionales no solo contribuirá a garantizar la calidad y precisión de las mediciones de material particulado, sino que también permitirá a Chile posicionarse a la par de las mejores prácticas globales, promoviendo la transparencia en la gestión de emisiones y facilitando el cumplimiento de regulaciones en un contexto internacional.

A nivel nacional, el Instituto Nacional de Normalización (INN) y el Ministerio de Medio Ambiente podrían liderar el desarrollo de regulaciones específicas, con la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) encargada de la fiscalización. Además, la calibración de los equipos debe ser trazable a estándares internacionales, como los proporcionados por el NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología) o EURAMET, y se debe implementar una verificación periódica para garantizar la precisión de las mediciones, teniendo en cuenta la alta tasa de rechazo presente actualmente observada desde la **Figura 11**.

Para fortalecer la infraestructura, se recomienda la creación de laboratorios especializados en calibración con tecnología avanzada y personal capacitado. Hasta que Chile desarrolle capacidad interna, se podrían establecer acuerdos con institutos internacionales de metrología como el PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Instituto de metrología alemán) o el NPL (National Physical Laboratory, Instituto de metrología de Reino Unido). Asimismo, la evaluación de factores de corrección específicos para aerosoles permitirá mejorar la precisión de las mediciones.

Finalmente, la formación de profesionales en métodos y normativas internacionales será clave para la correcta implementación y supervisión de las regulaciones. Estas medidas permitirán a Chile mejorar el control de emisiones y garantizar un monitoreo efectivo del material particulado en alineación con estándares globales.

Procedimientos de pruebas

La mayoría de los procesos requieren de una fácil implementación con mediciones automáticas en ralentí, mientras que otras pruebas dependen de la aprobación o rechazo de un operador. Los procedimientos utilizados en los países en cuestión son los siguientes:

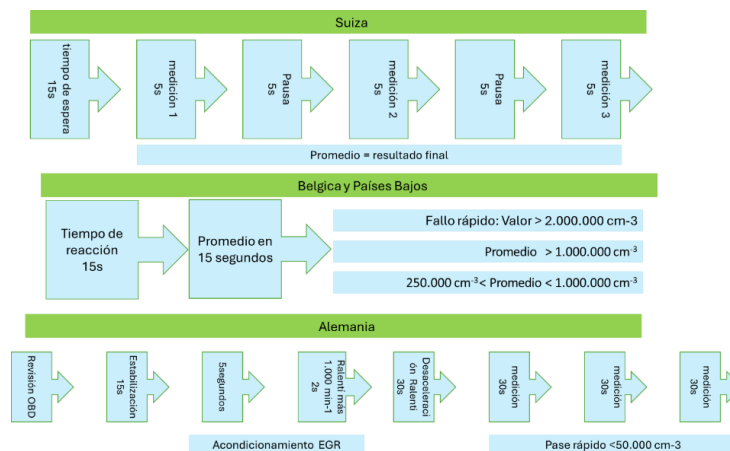


Figura 10: Comparación de los procedimientos de medición.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Con respecto al estudio actual durante el año 2024, se realizaron mediciones de prueba de número de partículas en comunas de la región Metropolitana (Quilicura, Cerrillos y La Reina), utilizando dos equipos, de marca Capelec y TEN, con el propósito de estimar la tasa de rechazo presente en una parte del parque automotriz chileno, analizando vehículos livianos y pesados.

Se realizaron 229 registros utilizando los equipos de medición Capelec 3070 y TEN AEM,

abarcando tanto vehículos livianos como pesados, incluidos los buses RED. La recopilación de datos se llevó a cabo mayoritariamente en tres plantas de revisión técnica ubicadas en la Región Metropolitana, dos de categoría A y una de categoría B.

Al realizar las mediciones, se registraron:

- Fecha.
- PRT o Patio.
- Equipo Contador de Partículas utilizado.
- Tipo de vehículo.
- Marca y modelo.
- Año del vehículo.
- Kilometraje del vehículo.
- Euro 5 o Euro 6.
- Medición de número de partículas sobre centímetro cubico.

Se facilitó el acceso a las siguientes PRTs:

- Planta de revisión técnica Clase A Quilicura, Dirección: Galvarino 9440, Quilicura, Región Metropolitana.
- Planta de revisión técnica Clase A Cerrillos, Dirección: General Velásquez 7319, Cerrillos, Región Metropolitana.
- Planta de revisión técnica La Reina Clase B, Dirección: Alcalde Fernando Castillo Velasco 8712, La Reina, Región Metropolitana.

De acuerdo con los datos recopilados se obtienen los siguientes gráficos, los que detallan las tasas de rechazo según el tipo de vehículos registrados, siendo estos livianos o pesados, con límite de rechazo en 250.000 y 1.000.000 de [partículas/cm³].

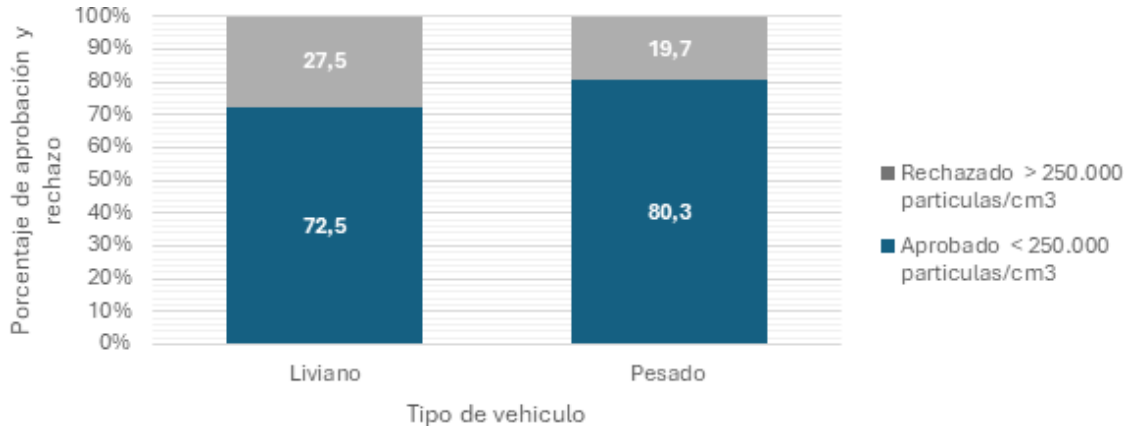


Figura 11: Tasa de aprobación y rechazo, con límite 250.000 [partículas/cm³], según el tipo de vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

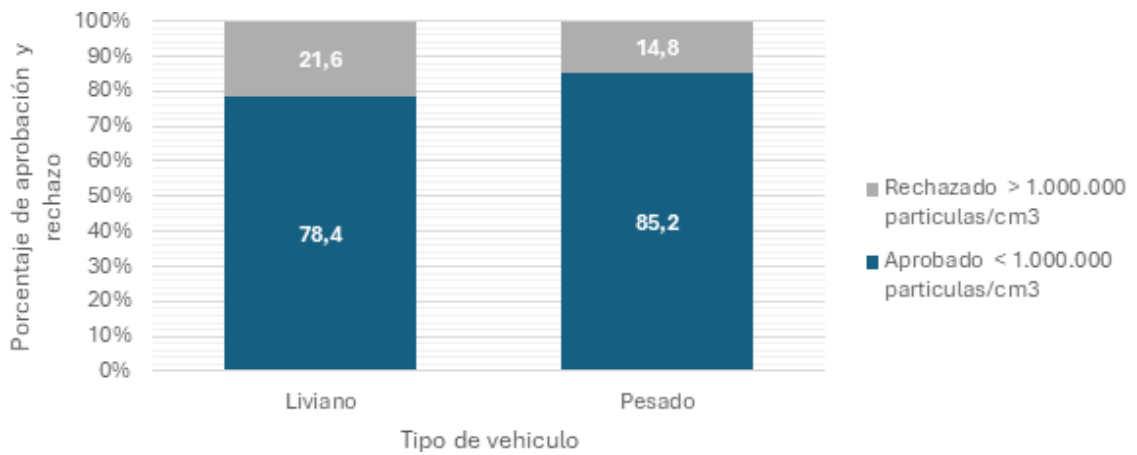


Figura 12: Tasa de aprobación y rechazo, con límite 1.000.000 [partículas/cm³], según el tipo de vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Según los datos recopilados, se registra una tasa de rechazo del 27,5% para vehículos livianos y del 19,7% para vehículos pesados, considerando un límite de aprobación de 250.000 partículas por centímetro cúbico. En contraste, al establecer un límite de 1.000.000 de partículas por centímetro cúbico, la tasa de rechazo disminuye al 21,6% para vehículos livianos y al 14,8%

para vehículos pesados.

Los gráficos presentados a continuación ilustran la tasa de rechazo de los vehículos livianos, clasificada en función de su año de fabricación y su kilometraje. En ambos casos, se evalúan los límites de aprobación establecidos en 250.000 y 1.000.000 partículas por centímetro cúbico.

Vehículos livianos

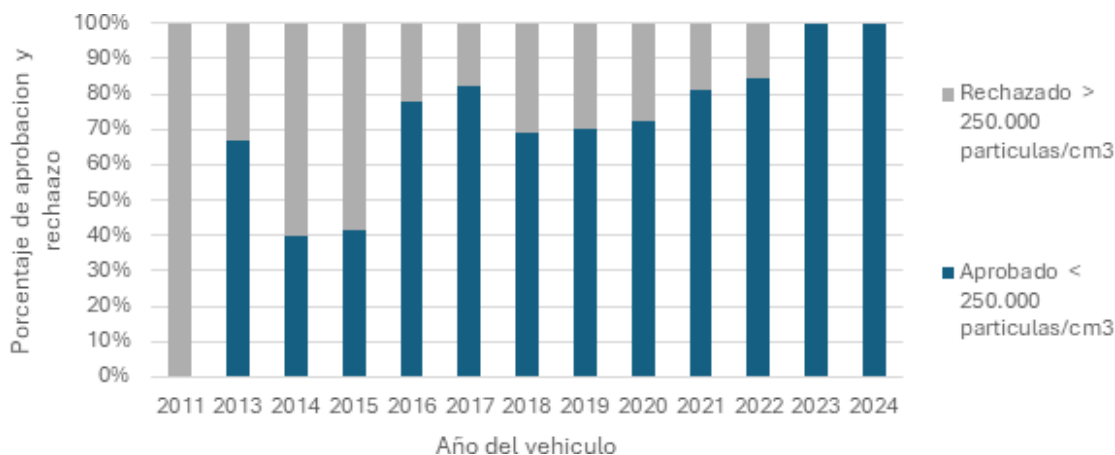


Figura 13: Tasa de aprobación y rechazo en vehículos livianos, con límite 250.000 [partículas/cm³], según el año del vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

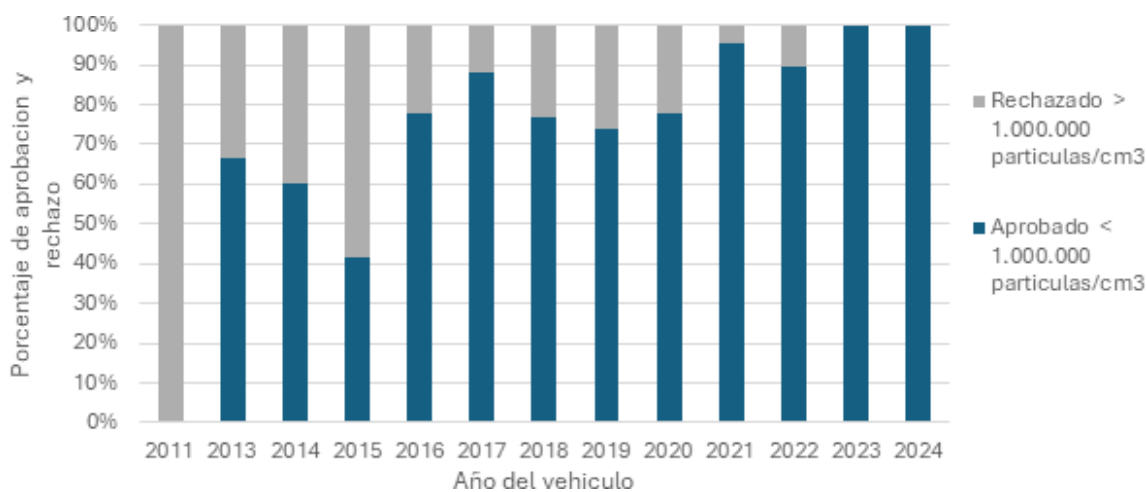


Figura 14: Tasa de aprobación y rechazo en vehículos livianos, con límite 1.000.000 [partículas/cm³], según el año del vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

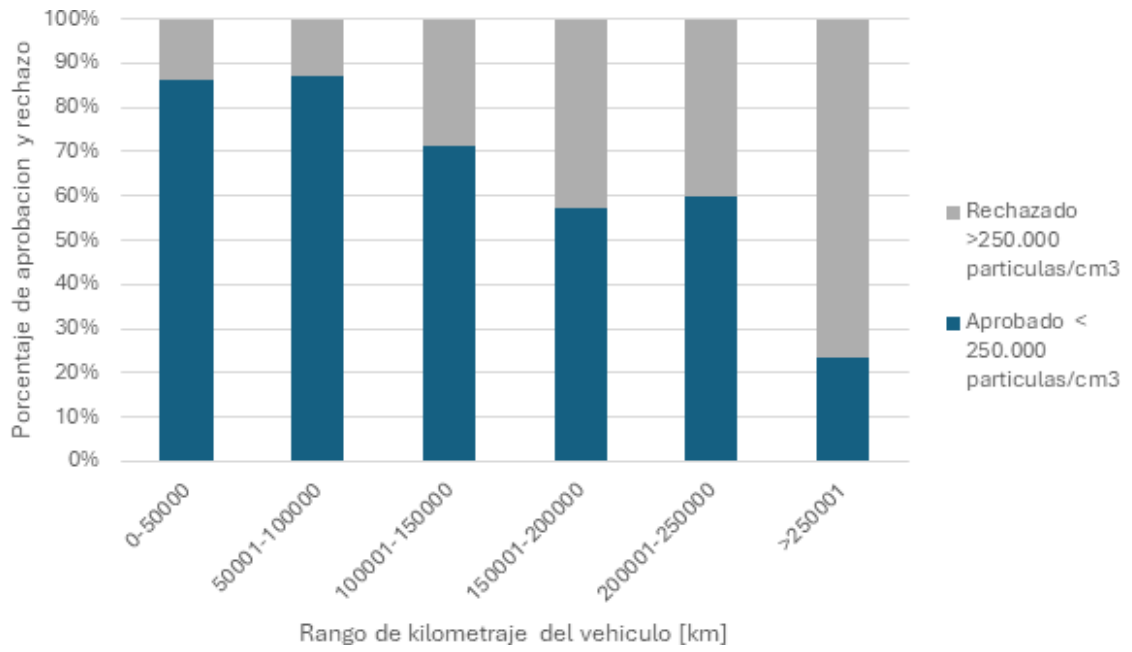


Figura 15: Tasa de aprobación y rechazo en vehículos livianos, con límite 250.000 [partículas/cm³], según kilometraje del vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

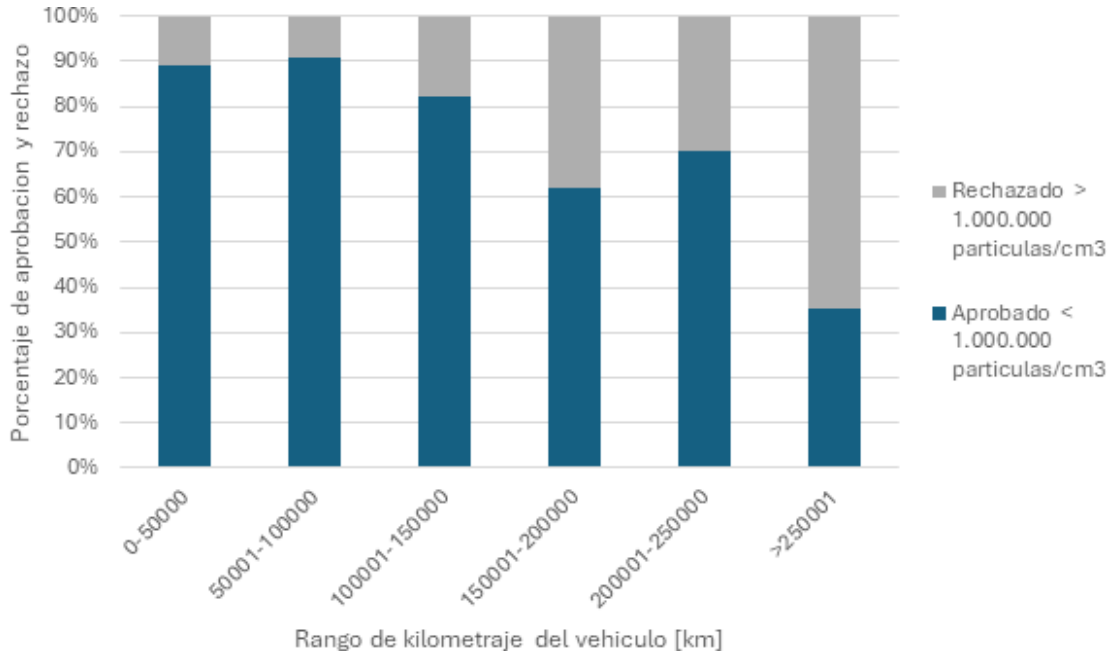


Figura 16: Tasa de aprobación y rechazo en vehículos livianos, con límite 1.000.000 [partículas/cm³], según kilometraje del vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

En la **Figura 13** y **Figura 14** se evidencia que la tasa de rechazo es menor en vehículos más nuevos según su año. Por otro lado, en las **Figura 15** y **Figura 16** se observa que la tasa de rechazo es proporcional al kilometraje de los vehículos.

Vehículos pesados

En los gráficos a continuación se muestra la tasa de aprobación y rechazo de vehículos pesados correspondiente a camiones y buses RED según su año, y según su kilometraje, utilizando los mismos valores límite.

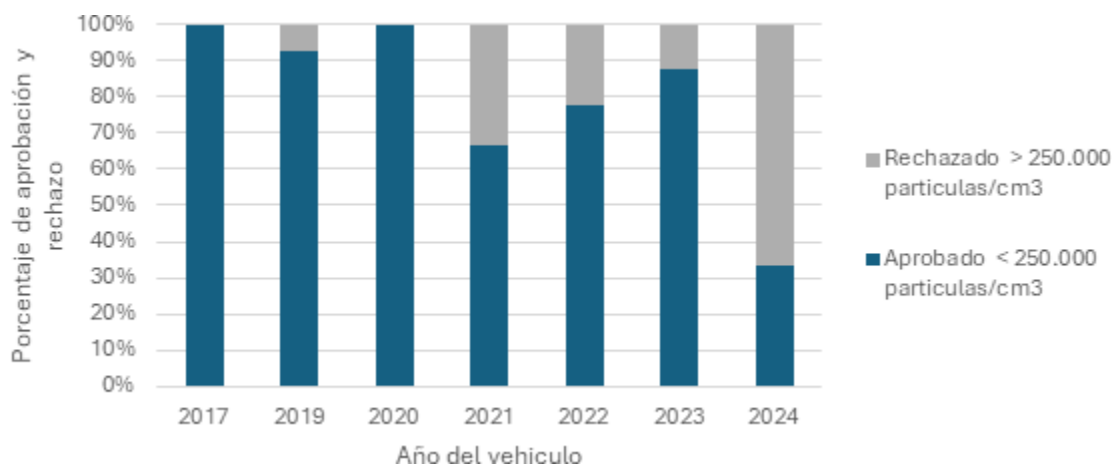


Figura 17: Tasa de aprobación y rechazo en vehículos pesados, con límite 250.000 [partículas/cm³], según el año del vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

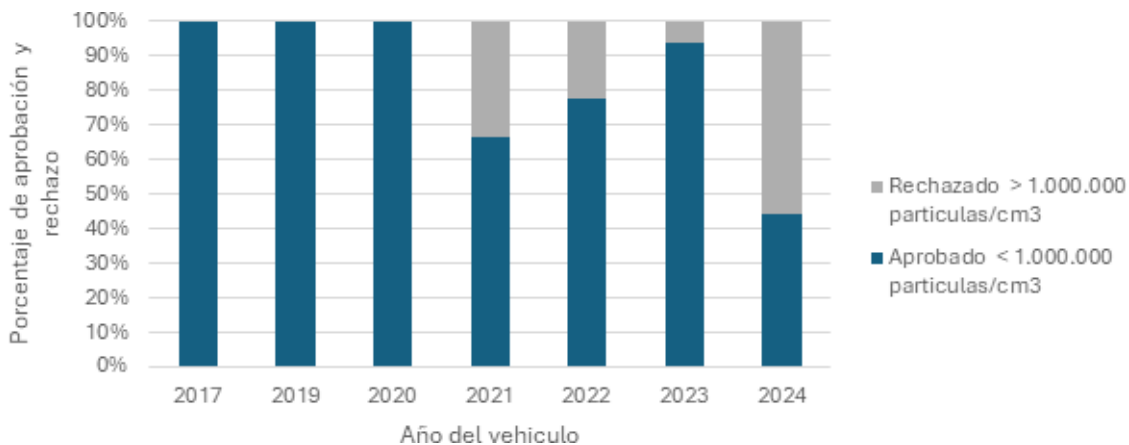


Figura 18: Tasa de aprobación y rechazo en vehículos pesados, con límite 1.000.000 [partículas/cm³], según el año del vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

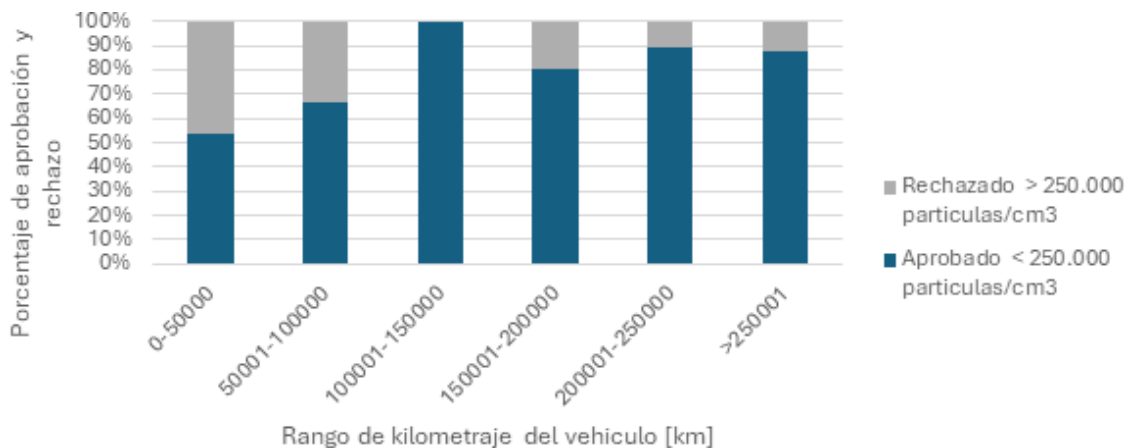


Figura 19: Tasa de aprobación y rechazo en vehículos pesados, con límite 250.000 [partículas/cm³], según el kilometraje del vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

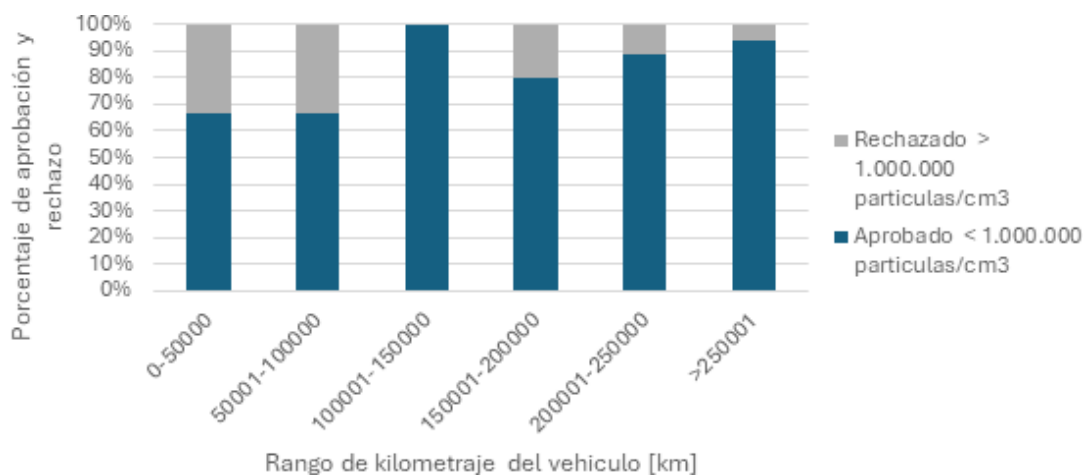


Figura 20: Tasa de aprobación y rechazo en vehículos pesados, con límite 1.000.000 [partículas/cm³], según el kilometraje del vehículo.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Se observa en las **Figura 17** y **Figura 18** que la tasa de rechazo es inversamente proporcional al año del vehículo. En cuanto al kilometraje ocurre proporcionalidad directa para la misma variable analizada.

En base a los análisis realizados, se proponen las siguientes tasas de rechazo por tipo de vehículo y su variación en el tiempo en un horizonte de 10 años:

Tabla 4: Tasa de rechazo para diferentes tipos de vehículos.

Tipo de Vehículo	Tasa de Rechazo									
	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
BUS RED	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
BUS INT PROV	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
BUS RIG	0,3	0,12	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
BUS ART	0,3	0,12	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
CAM LIV	0,3	0,12	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
CAM MED	0,3	0,12	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
CAM PES	0,3	0,12	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
MOT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VLC	0,28	0,2	0,1	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
VLP	0,28	0,2	0,1	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

1.3 Instrumentos de medición de material particulado y DPF

En países como Suiza, Alemania, Bélgica y los Países Bajos, se ha implementado un procedimiento actualizado para la inspección técnica periódica (ITP) de vehículos diésel equipados con filtros de partículas (DPF), con el fin de mejorar la detección de emisiones de partículas y asegurar el correcto funcionamiento de estos sistemas. Este método se basa en la medición del número de partículas (PN) emitidas por el escape, tanto en condiciones de ralentí bajo como alto, permitiendo identificar fallos o manipulaciones en el DPF que los métodos tradicionales de opacidad no logran detectar. Para realizar estas mediciones, se emplean contadores portátiles de partículas (PN-PTI) que utilizan tecnologías como cargadores por difusión (DC) y contadores de partículas por condensación (CPC). Estos equipos son capaces de

detectar partículas ultrafinas, especialmente aquellas menores a 100 nanómetros, que son representativas de las emisiones reales de los motores diésel modernos (humos invisibles).

Con respecto a la calibración de estos instrumentos, esta exige el uso de partículas de hollín con un diámetro geométrico menor o igual a 200 nm, que sean térmicamente estables a 350 °C y con un contenido de carbono negro superior al 80%, simulando fielmente las emisiones típicas de los motores diésel. Para la verificación anual de los equipos, es posible utilizar partículas de cloruro de sodio (NaCl) o partículas carbonosas generadas mediante descarga de chispa, lo que garantiza la precisión y fiabilidad de las mediciones durante el uso continuado.

CPC

El funcionamiento general de los aparatos con tecnología CPC (Condensation Particle Counter) consiste en tomar una muestra de aire mediante una sonda, que puede incluir un sistema de dilución para manejar altas concentraciones de partículas. Antes de analizar la muestra, se eliminan las partículas grandes y el agua mediante un pre-acondicionador, que suele incluir un ciclón y una trampa de agua. El flujo de muestra puede ser secado y limpiado con secadores y filtros HEPA para asegurar la precisión de la medición. En aplicaciones donde es necesario contar solo partículas sólidas, un removedor de partículas volátiles (catalytic stripper) calienta la muestra para eliminar los compuestos volátiles. Finalmente, el contador de partículas CPC utiliza un fluido de condensación, como alcohol isopropílico o butanol, que se condensa sobre las partículas presentes en la muestra, haciendo que crezcan de tamaño hasta ser detectables ópticamente. Así, el sistema puede contar con precisión tanto concentraciones bajas como altas de partículas ultrafinas en diferentes condiciones ambientales, aunque no proporciona información sobre el tamaño de las partículas, solo su número total.

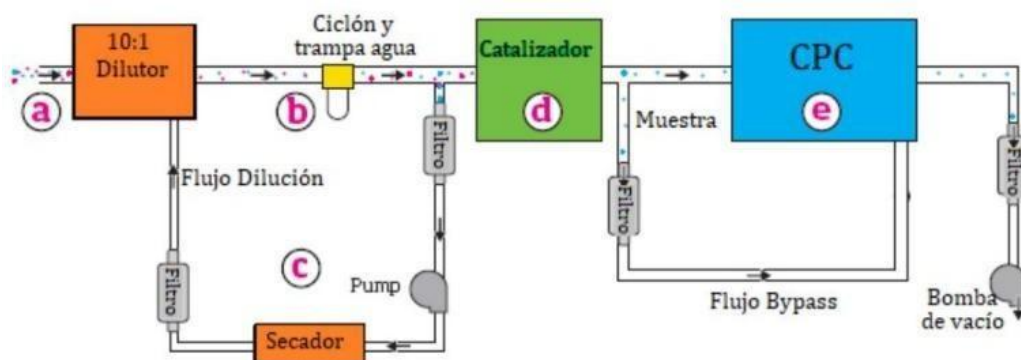


Figura 21: Diagrama de funcionamiento de instrumento CPC.

Fuente: Manual Instrucciones TSI 3795-HC

DC

Los instrumentos basados en carga por difusión constan de una cámara de ionización, donde un electrodo de tungsteno y una alta tensión continua (de 3 a 6 [kV]) generan una descarga de efecto corona, controlada por un microcontrolador. Esta descarga ioniza las moléculas de aire alrededor del electrodo, produciendo millones de iones si la corriente es suficientemente intensa. Las partículas de emisión diésel que pasan por esta etapa adquieren carga de los iones positivos del aire, y la cantidad de carga que acumulan depende del tamaño de las partículas. La corriente medida por el electrómetro es proporcional al diámetro de movilidad de las partículas, que se relaciona con la concentración de partículas.

En la segunda etapa, conocida como la trampa de ionización, los iones positivos en exceso son capturados por un campo eléctrico controlado por un microcontrolador.

La tercera etapa es la filtración, donde un filtro electrométrico aislado captura y neutraliza las partículas cargadas positivamente mediante electrones. Esta corriente de electrones, medida en femtoamperios por el electrómetro, proporciona una indicación estimada de la concentración actual de partículas en el gas que sale de la cámara.

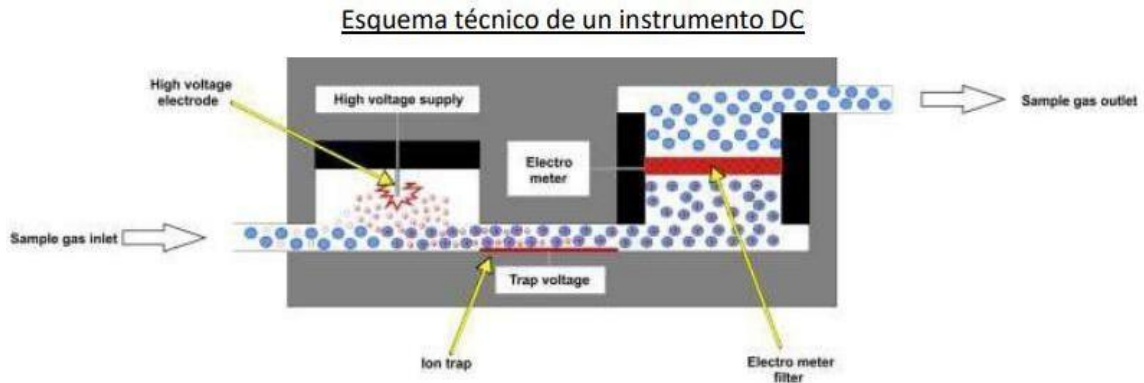




Figura 22: Diagrama de funcionamiento de instrumento CPC.

Fuente: TEN AEM Ionisation particle number counter, p.6.

Estos dispositivos no cuentan las partículas directamente, sino que se basan su funcionamiento en una métrica entre la longitud y la superficie de las partículas, que luego se convierte en un valor estimado de número de partículas, utilizando algunas suposiciones sobre la distribución del tamaño de las partículas.

Tabla 5: Equipos de medición utilizados en procedimientos en Chile.

Foto equipo utilizado en Chile	Descripción técnica
	<p>El equipo diseñado por TEN es un dispositivo de carga difusiva por condensación (CPC), el cual utiliza el principio de ionización para el conteo de partículas en las emisiones de vehículos.</p> <p>Posee un rango de medición de 5.000 a 5.000.000 de partículas por centímetro cúbico y una precisión del 25% del valor medido o 25.000 [partículas/cm³].</p>
	<p>El contador de partículas de la marca CAPELEC es un equipo de carga difusiva por condensación (CPC).</p> <p>Tiene un rango de medición de 5.000 a 5.000.000 partículas por centímetro cúbico y precisión del 25% del valor o 25.000 [partículas/cm³].</p>

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Factores que pueden afectar las mediciones

Las mediciones con instrumentos PN-PTI pueden verse afectadas por varios factores relacionados con las características de las partículas:

Morfología: Las formas fractales de las partículas varían según su origen. Las partículas carbonosas, como las del quemador CAST, son ideales para calibración, mientras que aerosoles de NaCl o descargas eléctricas presentan morfologías distintas, afectando especialmente a sensores basados en carga eléctrica.

Tamaño: La eficiencia de los instrumentos depende del tamaño de las partículas. Dispositivos como el CAP3070 son menos eficientes con partículas menores en tamaño a 70 [nm], mientras que el HEPaC y el DiTEST destacan con partículas más grandes.

Distribución de tamaños: Los aerosoles monodispersos ofrecen mayor precisión en límites de tamaño, pero pueden exceder las normativas con partículas grandes. Los polidispersos son más estables, aunque menos exactos en tamaños específicos.

Carga eléctrica: Las partículas cargadas previamente distorsionan las mediciones en dispositivos basados en detección de carga.

Composición química: Los instrumentos sensibles a la composición, como los basados en CPC, pueden mostrar variaciones significativas dependiendo del tipo de partículas, como NaCl o hollín de combustión.

Este análisis subraya la necesidad de comprender las características físicas y químicas de las partículas para garantizar la precisión y confiabilidad de los instrumentos PN-PTI.

La

Tabla 6 muestra una lista de los instrumentos homologados, indicando el país de homologación, la tecnología utilizada y el intervalo del conteo de partículas medidas.

Tabla 6: Comparación de los instrumentos de medición.

Fecha 28/11/2023		Aprobación			Fabricante	Type	DC/CPC	Año #certificado	SISTEMA MUESTRA	FOB Europa	Rango edición [#/cm ³]	Dilución
Número	Marca	NL	CH	D								
1	TSI				TSI	3795 (NPET-l)	CPC	2015	Dilution		5.000 to 5.000.000	10
2	TSI				TSI	3795 (NPET-h)	CPC	2016	Dilution		50.000 to 50.000.000	100
3	TEN				TEN	AEM	DC	2020 (T8966)	LMC	€ 6,400	5.000 to 5.000.000	1
4	VLТ				TEN	E9700	DC	2020 (T8967)	LMC		5.000 to 5.000.000	1
5	Saarloos				TEN	DPC	DC	2021 (T8976)	LMC		5.000 to 5.000.000	1
6	Capelec				Capelec	CAP3070	DC	2021 (T8986)	LMC	€ 9,877	5.000 to 5.000.000	1
7	AVL-DITest				AVL-DITest	Counter	DC	2021 (T8985)	LMC		1.000 to 10.000.000	1
8	Continental				Capelec	DX 280 DC	DC	2022 (T8987)	LMC		5.000 to 5.000.001	1
9	Saxon Junkalor				Saxon Junkalor	Nanolyt M	DC	2022 (T8989)	Non LMC	€ 6,355	5.000 to 5.000.000	1
10	TEXA				TEXA	NP 01	DC	2022 (T8998)	Dilution	€ 7,490	5.000 to 5.000.000	?
11	Mahle				Mahle	PMU 400	CPC	2022 (T9001)	LMC	€ 7,765	5.000 to 50.000.000	200
12	Brainbee				Mahle	PMU-400	CPC	2022 (T9002)	LMC		5.000 to 50.000.000	200
13	MAHA				AVL-DITest	MET	DC	2021 (T8985)	LMC	€ 8,500	1.000 to 10.000.000	1
14	Bosch				Bosch	BEA 090	CPC	tbd	LMC		?	?
15	Assemblad				Assemblad	PRT 121	DC	2023 (T????)	Non LMC		5.000 to 5.000.000	1
16	Hella Gutmann				?	HG4-PCK	DC	tbd	LMC		5.000 to 5.000.000	1
17	WOW				TEN	WPA	DC	tbd	?			
18	Bartec Auto ID				Bartec Auto ID	nEC	DC	tbd	LMC	€ 6,900	5.000 to 15.000.000	1

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

DPF

El Filtro de Partículas Diésel (DPF) es un componente esencial en los vehículos diésel, diseñado para capturar y eliminar una fracción del material particulado que se genera durante la combustión. Este dispositivo juega un papel clave en la reducción de emisiones contaminantes,

especialmente para cumplir con normativas como los estándares Euro 5 y Euro 6. Su estructura está hecha principalmente de materiales cerámicos de alta resistencia, como la cordierita o el carburo de silicio, que pueden soportar temperaturas elevadas. También, algunos DPF también cuentan con un revestimiento catalítico que ayuda a oxidar las partículas atrapadas, mejorando su efectividad. Además, su diseño interno en forma de panal permite que los gases de escape fluyan mientras atrapa el material particulado, reduciendo significativamente la cantidad de partículas emitidas al aire, tal como se ve en la **Figura 23**: Funcionamiento de un DPF.

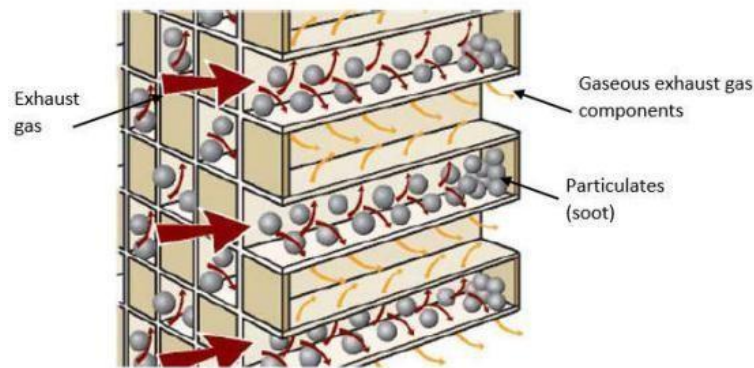


Figura 23: Funcionamiento de un DPF.

Fuente: P Pajdowski , B Puchalka, 2019

A medida que el vehículo se utiliza, el filtro acumula material particulado. Esta acumulación genera una saturación que afecta el desempeño del motor, ya que aumenta la presión en el sistema de escape. Si no se maneja adecuadamente, la saturación puede dañar el filtro, disminuir la eficiencia del motor y aumentar el consumo de combustible. Para evitar esto, los DPF están diseñados para regenerarse, lo que consiste en un proceso que elimina el hollín o material orgánico acumulado mediante su combustión controlada. La regeneración puede ocurrir de forma pasiva, cuando el vehículo se conduce a altas velocidades o cargas y las temperaturas del escape alcanzan niveles suficientes para quemar el hollín ($\geq 500[^\circ\text{C}]$) [9]. Si estas condiciones no se cumplen, el sistema activa un proceso de regeneración controlado por el motor, inyectando combustible adicional al escape por orden de la unidad de control del motor para elevar la temperatura y limpiar el filtro. En casos más severos, donde la saturación es crítica, se requiere una regeneración forzada en un taller especializado, donde equipos específicos elevan la temperatura del filtro para quemar los residuos.

Aunque este proceso elimina la mayor parte del hollín, también se acumulan cenizas provenientes de los lubricantes y aditivos del combustible (materia inorgánica). Estas cenizas no se queman y, con el tiempo, deben retirarse manualmente mediante limpieza especializada o, en algunos casos, reemplazando el filtro. Por ello, el mantenimiento regular del DPF es fundamental para asegurar su funcionamiento óptimo. Esto incluye el uso de combustibles de calidad, revisiones periódicas y, en casos necesarios, limpiezas profundas.

El DPF es una tecnología clave para reducir el impacto ambiental de los motores diésel. Sin embargo, su efectividad depende no solo de su diseño, sino también del cuidado y atención que se le brinde durante su vida útil. Este filtro no solo contribuye a un aire más limpio, sino que también mejora el desempeño y la sostenibilidad de los vehículos diésel cuando se gestiona de forma adecuada.

Recientes avances en los Filtros de Partículas Diésel (DPF) se enfocan en mejorar su eficiencia y durabilidad. Investigaciones han desarrollado catalizadores de oxidación más efectivos que facilitan la conversión de partículas contaminantes en compuestos menos nocivos, optimizando la regeneración del DPF y reduciendo las emisiones. Además, se han implementado sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR) que, en combinación con los DPF, disminuyen significativamente las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas sólidas, cumpliendo con normativas ambientales más estrictas.

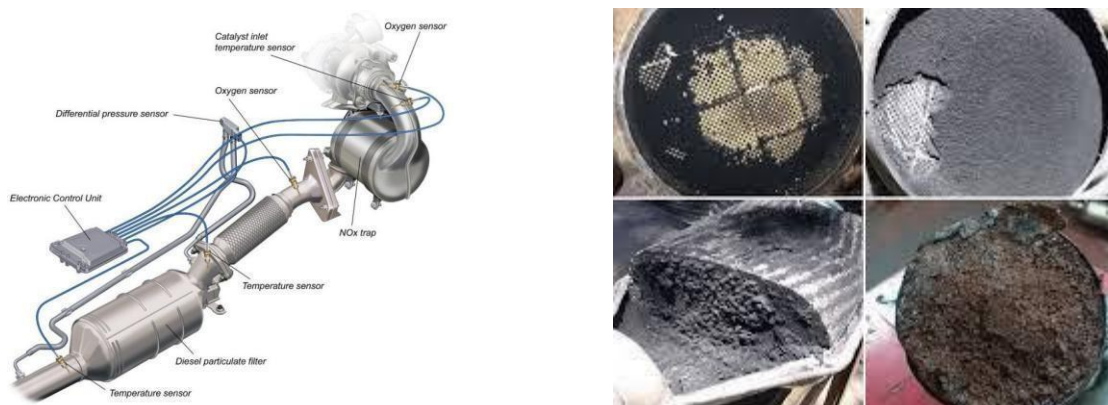


Figura 24: Ubicación del DPF en el sistema de escape de un vehículo / DPF dañado o saturado.

1.4 Análisis General de Impacto Económico y Social

Luego de categorizar el material particulado y habiendo detallado los instrumentos implicados en la medición, se debe presentar al Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) cuya importancia es clave para evaluar políticas ambientales, particularmente aquellas relacionadas con la gestión de la calidad del aire y como afecta esto a la salud de los seres vivos. Este estudio tiene como base el Análisis Costo-Beneficio (ACB), un enfoque que permite identificar, cuantificar y valorar los costos y beneficios asociados a una normativa o instrumento regulatorio. Su propósito principal es garantizar decisiones informadas, al considerar tanto los impactos positivos como negativos de las regulaciones ambientales.

El Ministerio del Medio Ambiente (MMA), a través de su Departamento de Economía Ambiental, ha desarrollado una guía metodológica para estandarizar la elaboración de los AGIES en Chile [3]. Este documento tiene como objetivo brindar lineamientos claros para la evaluación de normas de calidad del aire, como las que regulan la cantidad de material particulado fino ($MP_{2,5}$) en el ambiente, un contaminante altamente perjudicial para la salud, que además corresponde a uno de los ejes centrales de este estudio. De esta forma, este busca ser un recurso útil para profesionales, académicos y consultores que trabajan en la implementación de estas normativas.

El AGIES no solo apoya la toma de decisiones en el ámbito ambiental, sino que también fomenta el diseño de instrumentos de mercado, como impuestos o subsidios, que incentiven el cambio de comportamiento de los agentes emisores de manera socialmente aceptable. Este enfoque permite balancear la intervención regulatoria con mecanismos económicos que promuevan la eficiencia en el uso de los recursos naturales.

El análisis reconoce que los recursos naturales, como el aire limpio, poseen un valor económico intrínseco, asociado a beneficios agrícolas y efectos positivos en la salud humana de manera general. Por lo tanto, evaluar los costos y beneficios de las regulaciones no solo ayuda a justificar las intervenciones del gobierno, sino que también permite priorizar aquellas políticas que generan el mayor bienestar social. Esto incluye no solo el ámbito de la calidad del aire, sino también otros temas ambientales, como el manejo de residuos o la conservación de recursos hídricos.

Análisis Costo-Beneficio (ACB) para Valorar Beneficios en Salud

El ACB permite comparar, en términos monetarios, los costos de implementar medidas de reducción de emisiones con los beneficios en salud obtenidos. El procedimiento se desarrolla en

etapas:

Cuantificación de efectos en términos de salud:

Utilizando funciones dosis-respuesta derivadas de estudios epidemiológicos, se estima cuántos casos de enfermedad o fallecimientos se evitan con una reducción determinada en las concentraciones de $MP_{2.5}$. Esta cuantificación sirve para determinar la magnitud del beneficio en salud.

Consideraciones Finales

Aunque la asignación de valores monetarios a mejoras en la salud presenta desafíos como la incertidumbre en los parámetros asociados a salud (debido a que factores como el coeficiente de riesgo unitario son estimaciones a partir de modelos matemáticos), la disponibilidad de datos locales y las controversias éticas, esta aproximación permite a los responsables de la toma de decisiones diseñar normativas ambientales más eficientes y socialmente rentables. Al centrar el análisis en la salud, el marco económico del AGIES ayuda a generar un equilibrio entre los costos de abatimiento y las ganancias en bienestar, evidenciando que mejorar la calidad del aire no solo salva vidas, sino que también produce beneficios económicos sustantivos.

Construcción de Escenarios

Para manejar la incertidumbre inherente a las estimaciones, se propone construir **escenarios de emisión** que representen diferentes niveles de efectividad y cumplimiento. Estos escenarios incluyen:

Escenario con proyecto: Supone un alto nivel de adopción de las medidas, en este caso relacionado a la aplicación de una norma de medición de número de partículas.

Escenario sin proyecto: Representa un nivel nulo de implementación, es decir sin control numérico de las partículas emitidas por los vehículos diésel.

A continuación, se presenta la función de daño, mecanismo fundamental que abarca el paso a paso para obtener el beneficio social al aplicar la norma.



Figura 25: Función de daño.

Fuente: "Guía metodológica para la elaboración de un AGIES", MMA, 2013)

Capítulo 2: Estimación de beneficios

2.1 Metodología cálculo de beneficios económicos

El impacto social de una norma está directamente relacionado con el cambio que se genere en la concentración de los contaminantes debido a una reducción de emisiones. Para poder obtener el cambio en las concentraciones atmosférica bajo la aplicación de una norma de emisiones para $MP_{2,5}$, se requiere de las estimaciones de emisiones para ambos escenarios, tanto para la línea base sin proyecto, como para el escenario con proyecto. A partir de este diferencial se identifica las emisiones evitadas (ton/año) a causa de la implementación de la norma. Para ello el cálculo de las emisiones de $MP_{2,5}$ en vehículos diésel comienza con el uso de factores de emisión, que representan la cantidad promedio de partículas emitidas por unidad de actividad, como gramos por kilómetro recorrido. Estos factores varían según el estándar de emisiones del vehículo (Euro III, IV, V, VI), la calidad del combustible utilizado y la presencia de sistemas de postratamiento, como filtros de partículas diésel (DPF). Cuando las mediciones directas no son posibles, se recurre a modelos matemáticos y simulaciones que integran datos clave, como el tipo de vehículo, los patrones de conducción y las condiciones de tráfico, permitiendo estimaciones más amplias para una flota vehicular. Finalmente, para calcular las emisiones totales de $MP_{2,5}$ en una región, se utiliza una fórmula que combina factores de emisión específicos, la actividad vehicular (kilómetros recorridos) y el número total de vehículos, proporcionando una estimación detallada del impacto ambiental de una flota vehicular. Estos valores se desglosan por región y año en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Emisiones evitadas en Chile en [(ton/año)].

Región	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
De Arica y Parinacota	3,9	9,2	12,1	14,2	15,6	16,9	18,2	19,3	20,4	21,4	22,3
De Tarapacá	9,5	22,2	29,8	35,5	39,6	43,5	47,1	50,5	53,6	56,5	59,1
De Antofagasta	5,8	13,6	18,3	22,0	24,6	27,1	29,5	31,7	33,8	35,7	37,5
De Atacama	9,2	21,5	27,6	31,7	34,4	36,9	39,3	41,5	43,7	45,7	47,5
De Coquimbo	18,2	42,8	54,0	61,0	65,3	69,3	73,2	76,8	80,2	83,4	86,3
De Valparaíso	10,8	25,4	32,4	37,0	39,9	42,6	45,2	47,7	50,0	52,1	54,1

Metropolitana de Santiago	13,8	32,4	41,5	47,5	51,5	55,1	58,7	62,0	65,2	68,1	70,8
Del Libertador B. O'Higgins	15,6	36,6	47,6	55,0	60,0	64,8	69,3	73,5	77,5	81,1	84,5
Del Maule	9,4	22,2	28,6	33,0	35,9	38,6	41,2	43,7	45,9	48,0	50,0
De Ñuble	12,2	28,7	37,2	43,0	46,9	50,7	54,2	57,5	60,6	63,5	66,1
Del Biobío	1,6	3,9	5,0	5,8	6,4	6,9	7,3	7,8	8,2	8,6	9,0
De La Araucanía	2,0	4,6	6,1	7,2	8,0	8,7	9,4	10,0	10,6	11,2	11,7
De Los Ríos	34,7	80,8	101,0	113,0	120,3	127,3	134,0	140,4	146,4	152,2	157,8
De Los Lagos	4,6	10,7	13,8	15,9	17,3	18,6	19,8	20,9	21,9	22,8	23,7
De Aisén del Gral. C. Ibáñez del Campo	1,5	3,5	4,6	5,4	5,9	6,4	6,9	7,3	7,7	8,1	8,4
De Magallanes y de la Antártica Chilena	4,3	10,2	13,2	15,3	16,7	18,0	19,2	20,4	21,5	22,5	23,5
Total país	157,2	368,1	473,0	542,5	588,3	631,4	672,5	711,1	747,2	780,9	812,1

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente ecuación muestra lo mencionado en el párrafo anterior.

$$E = \sum (FE_i * A_i * N_i)$$

Ecuación 1: Emisiones totales de MP_{2,5}.

E: Emisiones totales de MP_{2,5} (en gramos o toneladas).

FE_i : Factor de emisión para el tipo de vehículo *i* (g/km).

A_i: Actividad del vehículo *i* (kilómetros recorridos por año).

N_i: Número de vehículos del tipo *i*.

Ahora, para calcular el cambio de concentraciones se utiliza la **Ecuación 2** que relaciona las emisiones del contaminante y la concentración que genera haciendo uso de los factores de emisión-concentración (FEC). Estos factores reflejan la sensibilidad de las concentraciones ambientales frente a cambios en las emisiones.

$$\Delta C_{MP}^t = \frac{\Delta E_{MP}^t}{FEC}$$

Ecuación 2: Cambio en la concentración de material particulado.

Donde,

ΔC_{MP}^t : Cambio en la concentración de MP en el año t [$\mu g/m^3$].

ΔE_{MP}^t : Cambio en la emisión del contaminante MP en el año t [$ton/año$].

FEC : Factor emisión concentración para el contaminante MP en el año t [$(ton/año)/([\mu g/m^3])$].

Los FEC utilizados en la presente evaluación fueron entregados por el Ministerio del Medio Ambiente según los últimos registros con desglose por comuna y región. Considerando que la resolución del diferencial de emisiones para la presente evaluación es a nivel de región, se calculó una media por región en la **Tabla 8** utilizando todos los FECs para las comunas disponible dentro de una misma región.

Tabla 8: Factor emisión concentración promedio.

Región	FEC promedio
Arica y Parinacota	917
Tarapacá	501,5
Antofagasta	501,5
Atacama	201
Coquimbo	208,5
Valparaíso	72
Metropolitana de Santiago	205
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	186
Maule	191,5
Ñuble	258
Biobío	345
Araucanía	93
Los Ríos	201
Los Lagos	452
Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	119,5
Magallanes y de la Antártica Chilena	112

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2024.

Aplicando la **Ecuación 2**, el resultado en el cambio de concentración por región y año resulta según lo ilustrado en la **Tabla 9**.

Tabla 9: Cambios en concentración de MP_{2,5} [($\mu\text{g}/\text{m}^3$)].

Región	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
De Arica y Parinacota	0,004	0,010	0,013	0,015	0,017	0,018	0,020	0,021	0,022	0,023	0,024
De Tarapacá	0,019	0,044	0,059	0,071	0,079	0,087	0,094	0,101	0,107	0,113	0,118
De Antofagasta	0,012	0,027	0,037	0,044	0,049	0,054	0,059	0,063	0,067	0,071	0,075
De Atacama	0,046	0,107	0,138	0,158	0,171	0,183	0,195	0,207	0,217	0,227	0,236
De Coquimbo	0,087	0,205	0,259	0,292	0,313	0,332	0,351	0,368	0,384	0,400	0,414
De Valparaíso	0,150	0,353	0,451	0,514	0,554	0,592	0,628	0,662	0,694	0,724	0,751
Metropolitana de Santiago	0,067	0,158	0,203	0,232	0,251	0,269	0,286	0,303	0,318	0,332	0,345
Del Libertador B. O'Higgins	0,084	0,197	0,256	0,296	0,323	0,348	0,373	0,395	0,417	0,436	0,454
Del Maule	0,049	0,116	0,150	0,172	0,187	0,202	0,215	0,228	0,240	0,251	0,261
De Ñuble	0,047	0,111	0,144	0,167	0,182	0,196	0,210	0,223	0,235	0,246	0,256
Del Biobío	0,005	0,011	0,015	0,017	0,018	0,020	0,021	0,023	0,024	0,025	0,026
De La Araucanía	0,021	0,049	0,066	0,078	0,086	0,094	0,101	0,108	0,114	0,120	0,126
De Los Ríos	0,173	0,402	0,502	0,562	0,599	0,633	0,667	0,699	0,728	0,757	0,785
De Los Lagos	0,010	0,024	0,031	0,035	0,038	0,041	0,044	0,046	0,048	0,051	0,052
De Aisén del Gral. C. Ibáñez del Campo	0,013	0,030	0,039	0,045	0,050	0,054	0,058	0,061	0,064	0,068	0,070
De Magallanes y de la Antártica Chilena	0,039	0,091	0,118	0,136	0,149	0,161	0,172	0,182	0,192	0,201	0,209

Fuente: Elaboración propia.

Una vez identificado el cambio de concentración del contaminante, se estima un impacto en la salud de la población estudiada. Para estimar cómo estos cambios de concentración afectan la cantidad de efectos de salud en las personas se utiliza una aproximación que asume una constante en el número de efectos anuales según los cambios en la concentración, dada por la **Ecuación 3**.

$$\Delta E_{ij}^k = [\exp(\beta_{ij}^k \cdot \Delta C^k) - 1] Pop_{ij}^k IR_{ij} \cong \beta_{ij}^k \cdot \Delta C^k \cdot Pop_{ij}^k \cdot IR_{ij}$$

Ecuación 3: Cambio en el número de efectos.

Donde,

ΔE_{ij}^k : Cambio en el número de efectos i debido al cambio en la concentración atmosférica del contaminante k en la población j.

β_{ij}^k : Coeficiente de riesgo unitario del efecto i en la subpoblación j producto del contaminante k.

ΔC^k : Cambio de concentración del contaminante k.

Pop_{ij}^k : Número de personas en grupo etario j de la población, expuesta al contaminante k.

IR_{ij} : Tasa de incidencia del efecto i en el segmento j de la población.

Se debe distinguir entre efectos ligados a exposición crónica y aguda al analizar las funciones concentración-respuesta derivadas de los estudios. Por lo general, los parámetros para efectos agudos se expresan con base diaria, mientras que en los efectos crónicos la unidad temporal es el año. Esta diferencia debe considerarse en el cálculo del cambio en la incidencia de efectos en la salud, dado que el procedimiento varía ligeramente. Para el caso de estudio actual corresponden a efectos de exposición crónica.

Coeficiente de riesgo

Los coeficientes de riesgo unitario para los efectos en salud y rangos etarios considerados fueron entregados por el Ministerio del Medio Ambiente, mediante comunicación directa para la realización del presente estudio, los cuales se desglosan en la

Tabla 10. Cabe destacar que los coeficientes relacionados a pérdidas de actividad laboral fueron obtenidos de un estudio para el MMA realizado por la Universidad Adolfo Ibáñez, por lo que los casos evitados serán desglosados en el **Anexo 1**.

Tabla 10: Coeficiente de riesgo unitario en microgramos sobre metro cúbico $[(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}]$.

Efecto detalle	Nomenclatura	β						
		0-1	1-4	5-29	30-44	45-64	65-74	+75
Mortalidad prematura (todas las causas)	Mort-all	0,00000	0,00000	0,00256	0,00769	0,00769	0,00769	0,00769
Admisiones Hospitalarias Cardiovasculares	HA_CVD-all	0,00000	0,00000	0,00162	0,00487	0,00487	0,00000	0,00000
Admisiones Hospitalarias Cardiovasculares	HA_CVD-IM	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00110	0,00110
Admisiones Hospitalarias - Respiratorias	HA_RSP	0,00160	0,00160	0,00160	0,00160	0,00160	0,00160	0,00160
Visitas a Salas Emergencias Cardiovasculares	ER_CVD-all	0,00061	0,00061	0,00061	0,00061	0,00061	0,00061	0,00061
Visitas a Salas Emergencias - Respiratorias	ER_RSP-all	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370
Admisiones hospitalarias por Asma	HA_AST	0,33000	0,33000	0,33000	0,33000	0,33000	0,00000	0,00000
Admisiones hospitalarias por neumonía	HA_PNE	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,40000	0,40000
Días de actividad restringida	RAD	0,00000	0,00000	0,24000	0,48000	0,48000	0,00000	0,00000
Días de actividad restringida menor	MRAD	0,00000	0,00000	0,37000	0,74000	0,74000	0,00000	0,00000
Días de pérdida laboral	WLD	0,00000	0,00000	0,23000	0,46000	0,46000	0,00000	0,00000

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2024.

Cambio de concentración

El cambio de concentración relacionado estimados por año y región están presentados en la

Tabla 9.

Población

Para calcular el número de personas en cada región para el rango de años entre 2026 y 2036 se consideró como fuente de información las estimaciones publicadas por el Instituto Nacional de Estadísticas. Aunque la presente evaluación estima efectos hasta el año 2036, sólo existe información disponible hasta el año 2035. Entonces se asumió la misma población para 2035 y el 2036. Estas estimaciones se agruparon en el rango etario escogido para el estudio, que se desglosa en personas de 0 a 1 año, 1 a 4 años, 5 a 29 años, 30 a 44 años, 45 a 64 años, 65 a 74 años y 75 años o más Este nivel de detalle permite identificar el impacto que la norma tendría en los diferentes grupos etarios, al mismo tiempo de reducir los supuestos o promedios que se aplican cuando se consideran rangos etarios muy amplios. La **Tabla 11** muestra la proyección de la población total para cada región entre 2026 y 2036.

Tabla 11: Población de Chile por región.

Región	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
De Arica y Parinacota	257.022	258.372	259.656	260.893	262.005	262.996	263.932	264.812	265.642	266.407	266.407
De Tarapacá	407.545	411.598	415.535	419.361	423.046	426.621	430.063	433.367	436.517	439.559	439.559
De Antofagasta	714.086	717.344	720.383	723.245	725.784	727.978	729.907	731.590	733.051	734.275	734.275
De Atacama	312.832	313.205	313.485	313.694	313.768	313.663	313.421	313.065	312,590	312.018	312.018
De Coquimbo	864.048	871.943	879.494	886.675	893.601	900.292	906.621	912.488	917.942	923.070	923.070
De Valparaíso	1.960.800	1.969.718	1.977.978	1.985.461	1.992.030	1.997.746	2.002.622	2.006.673	2.010.043	2.012.734	2.012.734
Metropolitana de Santiago	8.266.778	8.302.164	8.334.323	8.364.147	8.389.647	8.409.957	8.426.790	8.440.491	8.451.493	8.459.614	8.459.614
Del Libertador B. O'Higgins	1.000.492	1.005.377	1.009.796	1.013.773	1.017.210	1.020.190	1.022.699	1.024.762	1.026.422	1.027.747	1.027.747
Del Maule	1.143.577	1.149.420	1.154.822	1.159.745	1.164.139	1.167.683	1.170.773	1.173.396	1.175.536	1.177.290	1.177.290
De Ñuble	501.435	502.145	502,583	502.812	502.794	502,588	502.180	501.543	500.684	499.613	499.613
Del BíoBío	1.631.229	1.631.777	1.631.663	1.631.226	1.629.985	1.627.882	1.624.927	1.621.210	1.616.812	1.611.934	1.611.934
De La Araucanía	995.625	997.013	998.173	999.092	999.493	999.211	998.522	997.438	996.082	994.299	994.299
De Los Ríos	398.814	399.458	399.978	400.381	400.559	400.534	400.327	399.995	399.542	398.951	398.951
De Los Lagos	888.249	890.894	893.271	895.390	897.113	898.318	899.090	899.559	899.654	899.411	899.411
De Aisén del Gral. C. Ibáñez del Campo	105.692	105.704	105.684	105.624	105.518	105.331	105.096	104.831	104.528	104.186	104.186
De Magallanes y de La Antártica Chilena	179.001	179.656	180.271	180.841	181.296	181.613	181.857	182.017	182.108	182.129	182.129

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas de Chile, 2024.

*Se considera la misma población para 2035 y 2036 debido a la falta de información sobre la proyección de la población en el año 2036.

Tasa de incidencia

Según las bases de datos del Ministerio del Medio Ambiente, los valores de tasa de incidencia se desglosan por tipo de previsión de salud, es decir, por Isapre o Fonasa. Por la diferencia entre los valores de tasas de incidencia según previsión de salud, caso que aplicaba igualmente a los valores unitarios se identificó el porcentaje de la población correspondiente a cada tipo de previsión de salud según rango etario y región. Esta información se calculó según las bases de datos publicadas por la Superintendencia de Salud para el caso de las Isapre, mientras que en el sitio de Fonasa estaba la información respectiva de esta previsión, la cual identifica la cantidad de personas afiliadas a alguna previsión. Los factores para identificar la población en Isapre y Fonasa se desglosan de forma que representa el total de la población en esa región para ese rango etario. La **Tabla 12** muestra los porcentajes por rango etario y región de personas con Fonasa o Isapre.

Tabla 12: Porcentajes por afiliación FONASA/ISAPRE.

Región	0-1	0-1	1-4	1-4	5-29	5-29	30-44	30-44	45-64	45-64	65-74	65-74	75+	75+
	Fonasa	Isapre	Fonasa	Isapre	Fonasa	Isapre	Fonasa	Isapre	Fonasa	Isapre	Fonasa	Isapre	Fonasa	Isapre
De Arica y Parinacota	0,97	0,03	0,98	0,02	0,95	0,05	0,91	0,09	0,91	0,09	0,95	0,05	0,92	0,08
De Tarapacá	0,95	0,05	0,96	0,04	0,92	0,08	0,89	0,11	0,87	0,13	0,93	0,07	0,91	0,09
De Antofagasta	0,88	0,12	0,91	0,09	0,83	0,17	0,80	0,20	0,78	0,22	0,84	0,16	0,76	0,24
De Atacama	0,93	0,07	0,95	0,05	0,90	0,10	0,86	0,14	0,88	0,12	0,94	0,06	0,95	0,05
De Coquimbo	0,94	0,06	0,95	0,05	0,92	0,08	0,90	0,10	0,91	0,09	0,95	0,05	0,94	0,06
De Valparaíso	0,90	0,10	0,93	0,07	0,91	0,09	0,87	0,13	0,89	0,11	0,92	0,08	0,86	0,14
Metropolitana de Santiago	0,80	0,20	0,85	0,15	0,82	0,18	0,77	0,23	0,79	0,21	0,85	0,15	0,69	0,31
Del Libertador B. O'Higgins	0,90	0,10	0,93	0,07	0,90	0,10	0,88	0,12	0,90	0,10	0,91	0,09	0,80	0,20
Del Maule	0,94	0,06	0,96	0,04	0,95	0,05	0,91	0,09	0,93	0,07	0,96	0,04	0,94	0,06
De Ñuble	0,95	0,05	0,96	0,04	0,95	0,05	0,92	0,08	0,94	0,06	0,97	0,03	0,96	0,04
Del BíoBío	0,91	0,09	0,94	0,06	0,92	0,08	0,87	0,13	0,90	0,10	0,94	0,06	0,90	0,10
De La Araucanía	0,94	0,06	0,96	0,04	0,95	0,05	0,91	0,09	0,93	0,07	0,96	0,04	0,93	0,07
De Los Ríos	0,93	0,07	0,95	0,05	0,94	0,06	0,90	0,10	0,92	0,08	0,95	0,05	0,91	0,09
De Los Lagos	0,90	0,10	0,93	0,07	0,91	0,09	0,87	0,13	0,90	0,10	0,94	0,06	0,92	0,08
De Aisén del Gral. C. Ibáñez del Campo	0,96	0,04	0,97	0,03	0,94	0,06	0,93	0,07	0,92	0,08	0,96	0,04	0,96	0,04
De Magallanes y de La Antártica Chilena	0,91	0,09	0,94	0,06	0,90	0,10	0,86	0,14	0,84	0,16	0,89	0,11	0,84	0,16

Fuente: Superintendencia de Salud, 2024.

Además de ajustar los valores de tasa de incidencia por tipo de previsión, fueron ordenados considerando la población de los rangos etarios escogidos para cada una de las regiones del país para cada año entre 2026 y 2036. Ahora con respecto a las tasas de incidencia entregadas

(Anexo 2), están mostrados en unidades de casos nuevos de personas que padecen del efecto en salud sobre 100.000 habitantes, por lo que se realizó el ajuste necesario de acuerdo a la población proyectada para cada año y cada región, el cual consiste en multiplicar la tasa de incidencia entregada por el Ministerio del Medio Ambiente, por la población de un año en específico de cierta región y rango etario, de modo que con este resultado al dividirlo por 100.000 (Cantidad de habitantes evaluados en la tasa de incidencia original), se obtengan las tasas de incidencia necesarias para el cálculo de los efectos en salud.

2.2 Estimación de efectos

Aplicando la **Ecuación 3** se calcula la razón entre casos de morbilidad/mortalidad, la que representa la relevancia de cada efecto por sobre la mortalidad en la cantidad de individuos afectados y además se presentan los casos evitados por enfermedad y año, quedan distribuidos como se ilustra en la **Tabla 13**.

Tabla 13: Relación de casos morbilidad/mortalidad evitados bajo la aplicación de la norma.

Efectos en salud	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
ER_CVD-all	38%	38%	37%	36%	36%	35%	35%	35%	34%	33%	33%
ER_RSP-all	2978%	2855%	2780%	2680%	2610%	2541%	2475%	2423%	2369%	2323%	2321%
HA_CVD-all	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	37%	36%	36%	36%
HA_CVD-IM	13%	11%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	11%
HA_RSP	38%	36%	35%	34%	34%	33%	32%	32%	31%	31%	31%
MORT-all	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta el desglose de los efectos evitados por rango etario. Es necesario destacar que en algunos casos sobre todo en los relacionados a los efectos cardiovasculares (emergencias cardiovasculares) presentan resultados con un orden de magnitud menor con respecto al resto de efectos analizados, es por esta razón que el valor se expresa como valor cero (corresponden a valores decimales) en la tabla, sin embargo, al observar el total para algunos rangos etarios (específicamente 0-1 y 1-4) poseen una cantidad que se debe considerar de casos evitados, por lo que también deben entrar en el análisis. No obstante, para los casos evitados de hospitalizaciones cardiovasculares si hay valores nulos, cuya razón se debe a falta de información proporcionada por parte del Ministerio del Medio Ambiente sobre los coeficientes de riesgo unitario para este tipo de efecto en particular.

La sigla de cada efecto identificada se detalla según la siguiente descripción:

- ER_CVD-all: Visitas a salas de emergencia cardiovascular.
- ER_CVD-all: Visitas a salas de emergencia respiratoria.
- HA_CVD-all: Admisión hospitalaria cardiovascular total.
- HA_CVD-IM: Admisión hospitalaria cardiovascular infarto miocardio.
- HA_RSP: Admisión hospitalaria respiratoria.
- MORT-all: Mortalidad prematura.

Tabla 14: Casos evitados de emergencias cardiovasculares totales.

ER_CVD_all	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
5-29	3	6	8	9	9	10	11	11	12	12	13	104
30-44	3	6	8	9	10	11	11	12	12	12	13	107
45-64	3	7	9	10	11	12	13	14	15	16	16	124
65-74	5	13	17	20	22	24	26	28	30	32	33	250
75+	2	4	6	7	8	9	9	10	11	12	12	90
Total general	15	37	48	55	61	66	71	76	80	84	87	679

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Casos evitados de emergencias respiratorias totales. Fuente: Elaboración propia.

ER_RS P-all	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
0-1	86	201	255	289	309	330	348	364	379	392	408	3.361
1-4	231	540	687	779	836	887	935	979	1.020	1.057	1.098	9.048
5-29	387	900	1.143	1.298	1.397	1.489	1.576	1.660	1.737	1.809	1.880	15.275
30-44	185	436	559	638	689	734	773	806	830	849	882	7.382
45-64	195	463	599	691	754	815	876	938	1.001	1.063	1.105	8.501
65-74	81	196	258	302	335	367	398	427	455	480	499	3.797
75+	26	63	86	103	117	130	143	156	168	181	188	1.359
Total general	1.191	2.798	3.586	4.101	4.437	4.751	5.049	5.330	5.590	5.831	6.059	48.722

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Casos evitados de admisiones hospitalarias cardiovasculares.

HA_CVD-all	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-29	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	14
30-44	3	8	10	11	12	13	14	14	15	15	16	130
45-64	14	32	42	48	53	57	61	66	70	75	77	595
65-74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total general	17	41	53	61	66	71	76	81	86	91	95	739

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Casos evitados de admisiones hospitalarias cardiovasculares por infartos miocárdios.

HA_CVD-IM	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30-44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45-64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65-74	3	7	9	10	11	12	13	14	15	16	16	126
75+	2	5	6	8	9	10	11	12	12	13	14	101
Total general	5	11	15	18	20	22	24	26	28	29	30	227

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Casos evitados de admisiones hospitalarias respiratorias.

HA_RSP	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
--------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

0-1	2	5	6	7	7	8	8	8	9	9	9	78
1-4	2	5	7	7	8	8	9	9	10	10	10	86
5-29	3	6	8	9	10	11	11	12	12	13	13	108
30-44	1	3	3	4	4	4	5	5	5	5	5	44
45-64	2	5	6	7	8	8	9	10	10	11	11	87
65-74	2	5	7	8	9	10	11	11	12	13	13	101
75+	2	6	8	10	11	12	13	14	16	17	17	125
Total general	15	35	45	52	57	61	66	70	74	77	80	631

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Muertes evitadas por la aplicación de la norma.

MORT-all	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-29	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
30-44	2	4	5	5	6	6	7	7	7	7	8	64
45-64	9	22	28	33	36	39	42	45	48	51	53	405
65-74	12	30	40	47	52	56	61	66	70	74	76	583
75+	17	41	56	67	76	85	93	102	110	118	123	889
Total general	40	98	129	153	170	187	204	220	236	251	261	1.948

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20: Casos evitados por la aplicación de la norma.

Efecto en salud	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
ER_CVD-all	15	37	48	55	61	66	71	76	80	84	87	679
ER_RSP-all	1.191	2.798	3.586	4.101	4.437	4.751	5.049	5.330	5.590	5.831	6.059	48.722
HA_CVD-all	17	41	53	61	66	71	76	81	86	91	95	739
HA_CVD-IM	5	11	15	18	20	22	24	26	28	29	30	227

HA_RSP	15	35	45	52	57	61	66	70	74	77	80	631
MORT-all	40	98	129	153	170	187	204	220	236	251	261	1948
Total general	1.283	3.019	3.875	4.439	4.810	5.158	5.489	5.803	6.093	6.363	6.612	52.946

Fuente: Elaboración propia

2.3 Valorización de los efectos en salud

Para estimar el impacto económico asociado a la reducción de casos anuales de enfermedades atribuibles a la disminución de las concentraciones de ~~material particulado fino~~ (MP_{2,5}), se utilizan valores unitarios que permiten monetizar los beneficios sociales derivados de la mejora en la salud pública. Estos valores representan el ahorro económico por evitar un caso específico de enfermedad, considerando tanto el grupo etario como la región correspondiente.

Cabe destacar que estos valores unitarios, expresados en [UF/caso], no suelen estar disponibles de manera pública y abierta. Por esta razón, se solicitó al Ministerio del Medio Ambiente el acceso a la información más actualizada relacionada con los valores unitarios correspondientes a las enfermedades incluidas en los cálculos, los cuales se basan en los coeficientes de riesgo unitario (β) y las tasas de incidencia respectivas.

Dado que existe una amplia variedad de valores unitarios clasificados por tipo de enfermedad, grupo etario y región, en el **Anexo 2** se presentan algunos ejemplos representativos de estos valores.

Por otra parte, para proyectar los beneficios socioeconómicos en el tiempo, se considera la evolución esperada de la población afectada, de acuerdo con las proyecciones demográficas elaboradas por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE). En la **Tabla 21** se presentan los beneficios proyectados, expresados en UF, desagregados por región y año.

Tabla 21: Beneficios económicos obtenidos por la aplicación de la norma.

Región	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
De Arica y Parinacota	282	678	922	1.115	1.262	1.398	1.529	1.654	1.775	1.894	1.976
De Tarapacá	2.548	6.201	8.668	10.750	12.439	14.089	15.683	17.201	18.610	19.970	20.894
De Antofagasta	3.443	8.385	11.787	14.666	16.997	19.225	21.400	23.510	25.567	27.611	29.006
De Atacama	7.940	19.378	25.774	30.634	34.332	37.865	41.298	44.609	47.776	50.788	52.823
De Coquimbo	43.040	104.692	136.819	159.978	177.449	194.488	211.756	227.670	243.549	258.971	267.802
De Valparaíso	213.126	518.198	682.789	801.779	888.405	973.275	1.055.758	1.137.793	1.215.513	1.289.966	1.338.662
Metropolitana de Santiago	340.164	826.606	1.094.038	1.293.244	1.443.647	1.584.279	1.725.219	1.863.670	1.999.062	2.130.021	2.214.384
Del Libertador B. O'Higgins	56.362	136.813	184.201	220.078	247.168	274.174	300.783	327.077	352.886	377.097	392.634
Del Maule	40.164	97.668	130.700	155.667	174.874	192.770	210.275	227.220	243.296	258.695	269.053
De Ñuble	18.033	43.585	58.070	68.904	77.033	85.134	93.332	101.401	109.211	116.628	121.445
Del Biobío	5.725	13.798	18.491	22.097	24.852	27.459	30.041	32.487	34.822	37.097	38.685
De La Araucanía	16.085	38.603	52.841	64.345	73.184	81.729	90.012	98.002	105.698	112.888	117.964
De Los Ríos	52.937	127.211	164.231	189.490	207.150	224.243	240.611	256.725	272.464	288.164	298.729
De Los Lagos	6.178	14.876	19.853	23.632	26.509	29.280	31.932	34.489	36.954	39.313	40.784
De Aisén del Gral. C. Ibáñez del Campo	708	1.706	2.317	2.796	3.164	3.511	3.843	4.169	4.483	4.781	4.980
De Magallanes y de la Antártica Chilena	2.052	4.981	\$6.714	8.049	9.058	10.022	10.965	11.877	12.749	13.544	14.102
Total general UF	808.787	1.963.379	2.598.216	3.067.224	3.417.523	3.752.940	4.084.438	4.409.553	4.724.414	5.027.429	5.223.923
Valor UF proyectado (CLP/UF)	\$39.859	\$41.306	\$42.752	\$44.199	\$45.646	\$47.092	\$48.539	\$49.986	\$51.432	\$52.879	\$54.326
Total general MMCLP	\$32.237	\$81.099	\$111.080	\$135.568	\$155.995	\$176.735	\$198.254	\$220.414	\$242.987	\$265.845	\$283.793

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3: Estimación de costos

3.1 Metodología de cálculo de costos asociados

La valoración de impactos en salud y medio ambiente es fundamental para justificar políticas ambientales efectivas. En el ámbito de la salud, la cuantificación monetaria incluye costos directos, como gastos médicos asociados a hospitalizaciones, tratamientos y medicamentos, así como costos indirectos, que abarcan pérdidas de productividad por enfermedades o muertes prematuras. En el caso de los impactos ambientales, aunque su valoración resulta más compleja debido a la falta de mercados claros, se utilizan enfoques como la estimación de pérdidas en biodiversidad a través de encuestas o costos de restauración, el cálculo de daños a cultivos mediante precios de mercado y la valoración de servicios ecosistémicos como regulación climática y almacenamiento de carbono. Sin embargo, este proceso enfrenta limitaciones relacionadas con la subjetividad, la falta de datos locales específicos y la incertidumbre derivada de cambios en precios o condiciones futuras.

En el caso de estudio, se estima el costo total de implementar contadores de partículas en las Plantas de Revisión Técnica (PRT) para reducir emisiones de material particulado fino, se consideran los costos de inversión inicial, mantenimiento, calibración y posibles reparaciones. Este sistema de control de emisiones representa una inversión significativa para las PRT, abarcando gastos operativos y técnicos.

El cálculo del número de equipos necesarios depende de la cantidad de estaciones PRT activas y los lineamientos técnicos de las concesiones, incluyendo criterios como el número de opacímetros por planta y las líneas operativas requeridas. El costo unitario de los contadores de partículas se basa en una cotización del modelo CAPELEC AEM Counter, mientras que los costos de mantenimiento y calibración se estiman con datos proporcionados por el Ministerio de Infraestructura y Aguas de los Países Bajos. La **Tabla 22** resume estos valores de forma detallada.

Tabla 22: Parámetros para el cálculo de costos de implementación.

Costos	Valor	Unidad
Valor unitario equipo NP	10.800	USD
Número de PRTs en Chile	143	[-]

Número de equipos NP	282	Equipos
Costo de mantenimiento y calibración para cada equipo	1.080	USD
Valor del dólar utilizado	911	USD/CLP

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Resultados de costos asociados

Según estos parámetros, se presenta el costo de inversión y costos de mantenimiento/calibración según año de proyección. En donde, sólo para el año 2026 se considera la inversión de los contadores de número de partículas.

Tabla 23: Costos de implementación de la norma.

Año de proyección	Inversión Equipos	Costo Mantenimiento/Calibración	Total
2026	2.774.541.600	277.454.160	3.051.995.760
2027	-	277.454.160	277.454.160
2028	-	277.454.160	277.454.160
2029	-	277.454.160	277.454.160
2030	-	277.454.160	277.454.160
2031	-	277.454.160	277.454.160
2032	-	277.454.160	277.454.160
2033	-	277.454.160	277.454.160
2034	-	277.454.160	277.454.160
2035	-	277.454.160	277.454.160
2036	-	277.454.160	277.454.160

Fuente: Elaboración propia.

El análisis también contempla los límites máximos de emisiones de material particulado establecidos por las normativas ($[250.000\#/cm^3]$ como máximo), lo que implica que, en caso de que un vehículo sea rechazado debido a la remoción, mal funcionamiento o falta de mantenimiento del DPF, será necesaria su reparación. Esto incluye el reemplazo del filtro de partículas diésel defectuoso o en mal estado.

El costo asociado a estas reparaciones se calcula en función de la cantidad de vehículos diésel rechazados, en donde esa estimación se obtuvo de los análisis en plantas de revisión técnicas realizados. Además, se consideran los precios unitarios de los filtros para vehículos livianos que cumplen con las normas EURO 5/V y EURO 6/VI, así como los módulos de filtrado para vehículos pesados que cumplen con el estándar EURO 6/VI. Los valores correspondientes a estos elementos se presentan de manera detallada en la tabla a continuación.

Tabla 24: Costo de filtros para vehículos livianos y módulos filtrantes para vehículos pesados.

Tipos de vehículos	Modulo Filtrante con IVA (CLP)	Filtro con IVA (CLP)
Vehículos Pesados	2.201.500	No aplica
Vehículos Livianos	No aplica	850.850

Fuente: Elaboración propia.

Al costo unitario de los filtros para vehículos livianos se aplica una reducción del 40%, justificada por dos factores principales. En primer lugar, se estima que el costo de la remoción de un filtro defectuoso asciende a aproximadamente \$300.000, considerando las operaciones necesarias, como abrir y cerrar el tubo de escape, retirar el material cerámico del filtro y reconfigurar el sistema de control del vehículo para evitar alertas de mal funcionamiento derivadas de la falta del dispositivo. Este proceso técnico implica costos asociados al tiempo y la experiencia requerida para llevarlo a cabo.

El segundo factor se basa en las proyecciones económicas, que indican que los precios de los filtros disminuirán con el tiempo debido a la expansión del mercado debido al estricto aumento de las normativas de control de emisiones vehiculares tanto en Chile como en mundo. Un mercado más activo, con un mayor volumen de demanda y oferta, permitirá aprovechar

economías de escala en el transporte e internación de los filtros. Además, la competencia entre fabricantes y proveedores contribuirá a una reducción gradual de los precios, beneficiando tanto a los usuarios finales como a las empresas de mantenimiento.

En cuanto a los vehículos rechazados, la flota se desglosa en dos categorías principales: vehículos pesados y vehículos livianos. La categoría de vehículos pesados incluye camiones y autobuses, mientras que los vehículos livianos se dividen en vehículos livianos particulares (VLP) y vehículos livianos comerciales (VLC). Este desglose es esencial para estimar adecuadamente los costos de reparación, ya que los filtros y módulos de filtrado para vehículos pesados, como los camiones y autobuses, suelen tener costos significativamente más altos debido a sus características técnicas y mayor capacidad de retención de partículas, en comparación con los filtros para vehículos livianos.

Tabla 25: Proyección de vehículos pesados y vehículos livianos rechazados por año.

Año proyección	Número de vehículos pesados	Número de vehículos livianos
2026	6.954	499.037
2027	3.585	349.628
2028	5.443	182.347
2029	6.368	132.730
2030	7.226	117.854
2031	8.808	121.953
2032	10.296	125.879
2033	11.699	129.727
2034	13.020	133.492
2035	14.246	137.052

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Tabla 26: Proyección de costos de reparación para vehículos pesados y livianos por año.

Año proyección	Costo de reparación \$ CLP	
	Vehículos Pesados	Vehículos Livianos
2025	\$-	\$-
2026	\$15.309.941.895	\$254.763.212.721
2027	\$7.892.273.340	\$178.488.686.107
2028	\$11.983.070.158	\$93.089.914.801
2029	\$14.019.751.078	\$67.759.802.395
2030	\$15.908.957.332	\$60.165.500.202
2031	\$19.390.257.680	\$62.258.293.924
2032	\$22.665.987.191	\$64.262.739.327
2033	\$25.755.970.865	\$66.227.131.817
2034	\$28.663.485.396	\$68.148.765.604
2035	\$31.362.835.827	\$69.966.430.427

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Tabla 27: Proyección de costo total de la medida.

Año proyección	Costo reparación	Costo equipamiento	Total
	CLP \$	CLP \$	CLP \$
2025	\$-	\$3.051.995.760	\$3.051.995.760
2026	\$270.073.154.616	\$277.454.160	\$270.350.608.776
2027	\$186.380.959.447	\$277.454.160	\$186.658.413.607
2028	\$105.072.984.959	\$277.454.160	\$105.350.439.119

2029	\$81.779.553.473	\$277.454.160	\$82.057.007.633
2030	\$76.074.457.534	\$277.454.160	\$76.351.911.694
2031	\$81.648.551.604	\$277.454.160	\$81.926.005.764
2032	\$86.928.726.519	\$277.454.160	\$87.206.180.679
2033	\$91.983.102.683	\$277.454.160	\$92.260.556.843
2034	\$96.812.251.000	\$277.454.160	\$97.089.705.160
2035	\$101.329.266.254	\$277.454.160	\$101.606.720.414
VAN			\$870.350.722.268

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

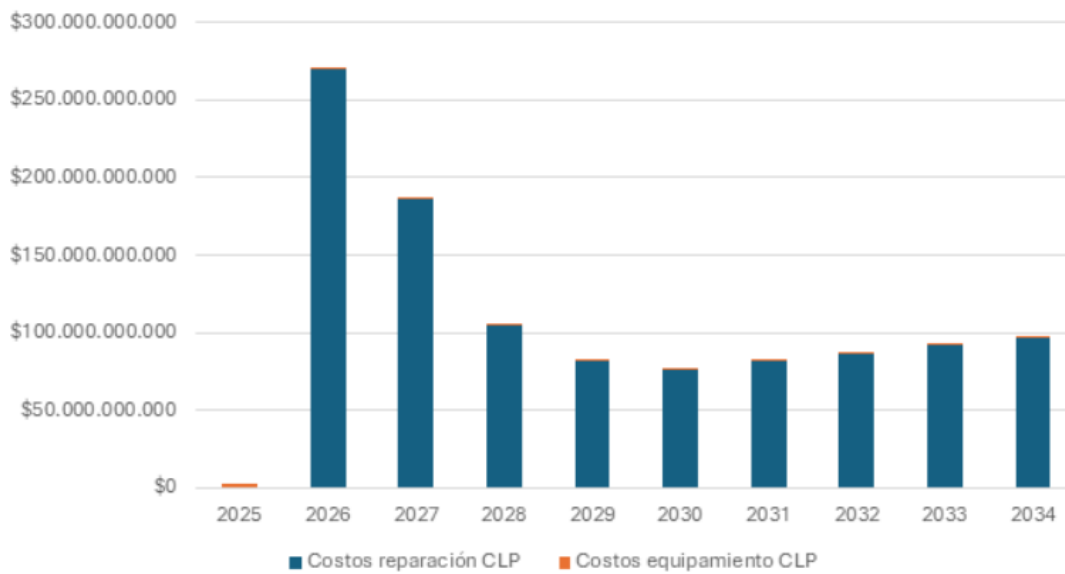


Figura 26: Distribución de costos de reparación y equipamiento por año.

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Después de estimar la cantidad de vehículos que serían rechazados, se proyectan los costos de reparación diferenciando entre vehículos livianos y pesados, información que se resume en la **Tabla 27**. Con estos datos, es posible calcular la proyección de los costos totales por año y el Valor Actual Neto (VAN) para el 2025, aplicando una tasa de descuento del **6%**. Según se observa en la **Figura 26**, la mayor parte de los costos proyectados corresponde a la reparación

de filtros en los vehículos que no cumplen con los estándares requeridos. También sería factible considerar la compra de equipos en años posteriores, con el fin de poseer stock de seguridad.

Capítulo 4: Análisis costo – beneficio

4.1 Metodología

A lo largo de este informe se estimó el cambio de concentraciones de $MP_{2,5}$ y junto a la evaluación pertinente de costos tanto fijos como variables, calculados principalmente a partir de la flota rechazada se logró obtener el análisis beneficio – costo, logrando la finalidad de este estudio. A modo de resumen, a continuación, se muestra un esquema de la metodología aplicada aproximada de lo realizado.

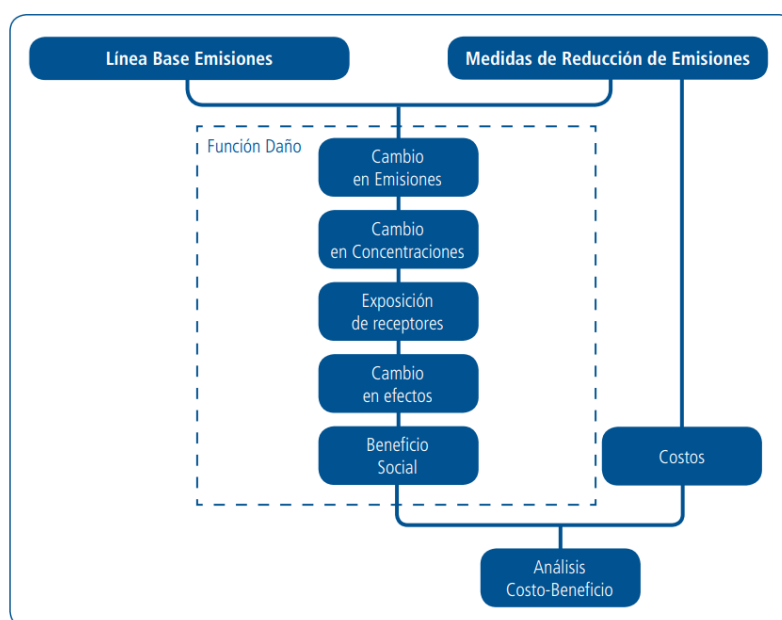


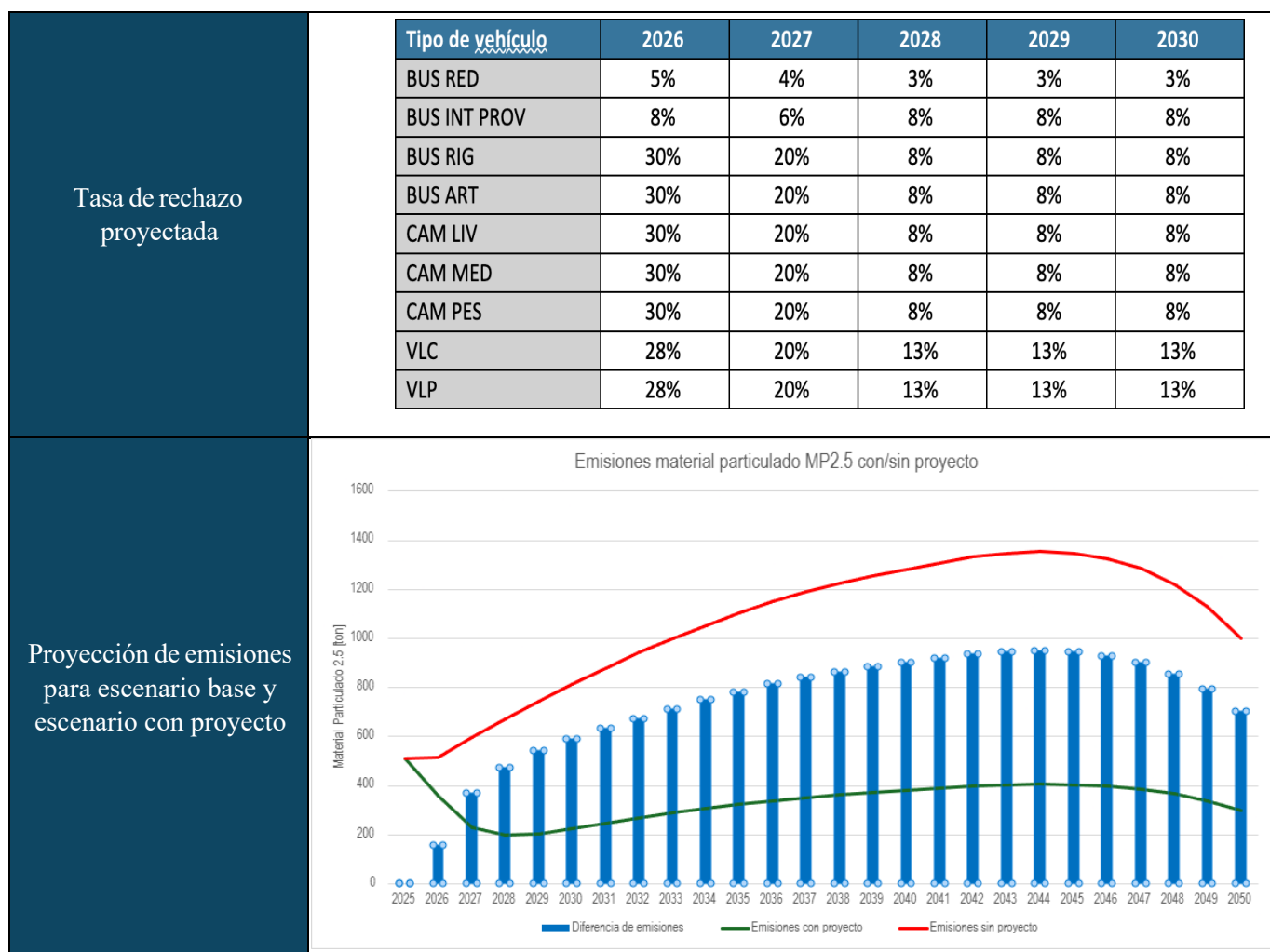
Figura 27: Esquema de la realización de un análisis costo-beneficio.

Fuente: Guía metodológica MMA, 2013.

4.2 Resultados análisis costo - beneficio

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en este análisis, que incluye la tasa proyectada de rechazo de vehículos diésel, proyección de emisiones, casos evitados e indicadores económicos relevantes en la toma de decisiones para la factibilidad técnica y económica de esta norma en el país.

Tabla 28: Resultados generales y específicos del análisis costo-beneficio.



Casos evitados de salud	ER_CVD-all	Visitas a salas de emergencia cardiovascular	679
	ER_RSP-all	Visitas a salas de emergencia respiratoria	48722
	HA_CVD-all	Admisión hospitalaria cardiovascular total	739
	HA_CVD-IM	Admisión hospitalaria cardiovascular infarto miocardio	227
	HA_RSP	Admisión hospitalaria respiratoria	631
	Mort-all	Mortalidad prematura	1948
Indicadores económicos	CLP	\$891.297	
	MM CLP	\$1.140.602	
		1,280	
	CLP	\$189.843	

Fuente: Fraser.R, Osses.M, 2024.

Los resultados del análisis costo-beneficio evidencian que la implementación de una normativa que restringe la circulación de vehículos diésel con altas emisiones de material particulado

(MP_{2,5}) tiene efectos positivos significativos. La proyección de la tasa de rechazo vehicular muestra una reducción progresiva en el porcentaje de vehículos contaminantes en circulación, particularmente en categorías como buses articulados, camiones medianos y pesados, y vehículos livianos particulares, además es importante notar que a partir del año 2040 existe una disminución en las emisiones de MP_{2,5} vehicular, esto debido a la mayor circulación de vehículos eléctricos proyectada para esa fecha [14]. La renovación o exclusión de flota contaminante reduce considerablemente las emisiones proyectadas de MP_{2,5}, como lo refleja la disminución en el escenario con proyecto frente al escenario base. Como resultado, se observa una baja sustancial en los casos evitados de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, incluyendo visitas a salas de emergencia, hospitalizaciones e incluso muertes prematuras. Esta mejora en la salud pública se traduce directamente en beneficios económicos, superando los costos de implementación de la normativa. Los indicadores económicos reflejan esta relación positiva con un beneficio/costo (B/C) de 1,280 y un valor actual neto (VAN) de \$189.843 millones CLP, lo que justifica técnica y económicamente la aplicación de medidas para el control de emisiones vehiculares en Chile.

Conclusiones

El presente trabajo, ha demostrado de manera contundente la viabilidad técnica y económica de esta medida regulatoria.

El estudio establece que la adopción de la norma de medición de PN como reemplazo del método de opacidad es una herramienta fundamental para una gestión ambiental efectiva, con impactos directos en la salud pública y el bienestar social, esto se respalda por los indicadores de Beneficio/Costo (B/C) de 1,280 y un Valor Actual Neto (VAN) de \$189.843 millones CLP. Este resultado valida la inversión como una medida socialmente rentable para el país.

Con respecto a los impactos en salud a reducción proyectada en las emisiones de MP_{2,5} se traduce en la prevención de un total de 52.946 casos evitados de morbilidad, incluyendo emergencias y admisiones hospitalarias, además de 1.948 muertes prematuras evitadas en un horizonte de análisis de 10 años.

Ahora bien, en relación a los costos asociados, aunque la mayor parte del costo total se concentra inicialmente en la reparación de los filtros defectuosos de la flota rechazada, se proyecta una disminución progresiva de la tasa de rechazo vehicular y, consecuentemente, de los costos de reparación, a medida que la flota se pone en cumplimiento.

Otro punto por considerar se relaciona con el uso a mayor escala de vehículos eléctricos y/o vehículos con combustibles menos contaminantes que el diésel (uso de celdas de combustible con Hidrógeno por ejemplo), en el primer caso, ya se visualizan avances en esta materia con la implementaciones recientes de una gran flota de buses eléctricos y es de esperar según las proyecciones que un 100% del transporte público sea eléctrico para el año 2040 y el 40% de los vehículos particulares lo sean para el año 2050 [6].

En definitiva, la implementación de la norma de medición de número de partículas representa una medida clave y justificada para garantizar la sostenibilidad ambiental y el bienestar social en Chile. Al enfocarse en la tecnología de medición de PN, el país se posiciona a la vanguardia regional, asegurando un aire más limpio y una mejor calidad de vida para sus habitantes.

Anexos

Anexo 1

En el presente anexo se analizan los casos evitados para efectos que estaban fuera del estudio del presente AGIES, estos fueron obtenidos a partir de información que le fue otorgada desde el Ministerio del Medio Ambiente a la Universidad Adolfo Ibáñez. Se considera necesaria su inclusión porque muestra el impacto tanto en enfermedades como el asma como también la relevancia que posee la aplicación de una norma de medición de número de partículas en la pérdida y/o restricción de la actividad laboral.

La sigla de cada efecto identificada se detalla según la siguiente descripción:

- HA_AST: admisión hospitalaria por asma.
- HA_PNE: admisión hospitalaria por neumonía.
- RAD: días de actividad restringida.
- MRAD: días de actividad restringida menor.
- WLD: días de pérdida laboral.

Tabla 29: Casos evitados de admisiones hospitalarias por asma.

HA_AST	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
0-1	2	5	6	7	7	8	8	8	9	9	9	78
1-4	8	18	23	26	28	30	31	33	34	36	37	304
5-29	38	88	112	127	137	146	155	163	171	178	185	1.502
30-44	24	58	74	85	92	98	104	109	112	115	119	991
45-64	26	62	80	92	101	109	118	126	134	142	148	1.139
65-74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Total general	98	230	295	338	366	392	416	439	460	480	499	4.013
---------------	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Casos evitados de admisiones hospitalarias por neumonía.

HA_PNE	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30-44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45-64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65-74	752	1.816	2.389	2.801	3.103	3.396	3.682	3.957	4.210	4.439	4.612	35.157
75+	242	600	808	971	1.099	1.222	1.343	1.463	1.581	1.698	1.764	12.790
Total general	994	2.415	3.197	3.773	4.202	4.618	5.025	5.419	5.791	6.137	6.376	47.948

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Días de actividad restringida recuperados.

RAD	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
5-29	312.599	727.481	924.927	1.050.927	1.131.456	1.206.355	1.278.057	1.346.194	1.409.481	1.468.153	1.525.610	12.381.240
30-44	926.863	2.184.698	2.801.756	3.201.151	3.453.458	3.677.673	3.875.238	4.038.240	4.160.680	4.253.632	4.420.290	36.993.680
45-64	968.463	2.297.621	2.973.842	3.434.681	3.753.651	4.061.227	4.369.050	4.680.049	4.996.231	5.311.410	5.519.431	42.365.657
Total general	2.207.925	5.209.801	6.700.526	7.686.760	8.338.565	8.945.256	9.522.344	10.064.483	10.566.392	11.033.195	11.465.331	91.740.577

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: Días de actividad restringida menor recuperados.

MRAD	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
5-29	1.163.694	2.708.155	3.443.178	3.912.231	4.212.010	4.490.833	4.757.754	5.011.404	5.246.998	5.465.413	5.679.306	46.090.975
30-44	1.725.192	4.066.429	5.214.972	5.958.377	6.428.001	6.845.338	7.213.069	7.516.469	7.744.369	7.917.383	8.227.587	68.857.186
45-64	1.802.622	4.276.615	5.535.281	6.393.051	6.986.758	7.559.255	8.132.213	8.711.083	9.299.600	9.886.249	10.273.444	78.856.171
Total general	4.691.508	11.051.199	14.193.431	16.263.659	17.626.768	18.895.427	20.103.035	21.238.956	22.290.967	23.269.045	24.180.336	193.804.332

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33: Días de pérdida laboral recuperados.

WLD	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Total
5-29	54.323	126.421	160.738	182.648	196.672	209.713	222.209	234.077	245.105	255.332	265.333	2.152.570
30-44	169.690	399.990	512.941	585.994	632.096	672.950	708.909	738.554	760.758	777.517	808.005	6.767.404
45-64	172.395	409.091	529.624	611.884	668.965	724.041	779.235	835.022	891.786	948.400	985.575	7.556.018
Total general	396.408	935.503	1.203.302	1.380.526	1.497.732	1.606.704	1.710.353	1.807.654	1.897.650	1.981.249	2.058.912	16.475.992

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 31**, **Tabla 32** y **Tabla 33** relacionadas a días de actividad restringida y pérdida laboral se aprecian una cantidad menor de rangos etarios en relación con el resto de los efectos analizados en este estudio, la razón de esto es porque los coeficientes de riesgo unitario asociados a estos primeros no tenían un valor en ciertos rangos etarios , tales como recién nacidos y niños.

Anexo 2

A continuación, se detallan algunos valores unitarios en la Región Metropolitana, abarcando sólo tres efectos relevantes en el estudio como mortalidad y emergencias cardiovasculares/respiratorias. Todos los efectos poseen una valorización monetaria, para el caso de los valores que poseen valores nulos, se debe netamente a la información que fue suministrada para la realización de este AGIES.

Tabla 34: Valores unitarios Fonasa.

Previsión	Rango etario	Región	Efecto	Valor promedio [UF/caso]
FONASA	0-1	Metropolitana de Santiago	Mort-all	19913,02
FONASA	0-1	Metropolitana de Santiago	ER_CVD-All	0,00
FONASA	0-1	Metropolitana de Santiago	ER_RSP-All	3,54
FONASA	1-4	Metropolitana de Santiago	Mort-all	19913,02
FONASA	1-4	Metropolitana de Santiago	ER_CVD-All	0,00
FONASA	1-4	Metropolitana de Santiago	ER_RSP-All	3,54
FONASA	5-29	Metropolitana de Santiago	Mort-all	19913,02
FONASA	5-29	Metropolitana de Santiago	ER_CVD-All	10,36
FONASA	5-29	Metropolitana de Santiago	ER_RSP-All	2,95
FONASA	30-44	Metropolitana de Santiago	Mort-all	19913,02

FONASA	30-44	Metropolitana de Santiago	ER_CVD- All	31,07
FONASA	30-44	Metropolitana de Santiago	ER_RSP- All	1,77
FONASA	45-64	Metropolitana de Santiago	Mort-all	19913,02
FONASA	45-64	Metropolitana de Santiago	ER_CVD- All	31,07
FONASA	45-64	Metropolitana de Santiago	ER_RSP- All	1,77
FONASA	65-74	Metropolitana de Santiago	Mort-all	19913,02
FONASA	65-74	Metropolitana de Santiago	ER_CVD- All	31,77
FONASA	65-74	Metropolitana de Santiago	ER_RSP- All	1,77
FONASA	75+	Metropolitana de Santiago	Mort-all	19913,02
FONASA	75+	Metropolitana de Santiago	ER_CVD- All	31,77
FONASA	75+	Metropolitana de Santiago	ER_RSP- All	1,77

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.

Tabla 35: Valores unitarios Isapre.

Previsión	Rango etario	Región	Efecto	valor promedio
ISAPRE	4	De La Araucanía	Mort-all	19913,02
ISAPRE	0-1	De La Araucanía	ER_CVD- All	0,00
ISAPRE	0-1	De La Araucanía	ER_RSP-All	9,40

ISAPRE	1-4	De La Araucanía	Mort-all	19913,02
ISAPRE	1-4	De La Araucanía	ER_CVD- All	0,00
ISAPRE	1-4	De La Araucanía	ER_RSP-All	9,40
ISAPRE	5-29	De La Araucanía	Mort-all	19913,02
ISAPRE	5-29	De La Araucanía	ER_CVD- All	20,31
ISAPRE	5-29	De La Araucanía	ER_RSP-All	7,84
ISAPRE	30-44	De La Araucanía	Mort-all	19913,02
ISAPRE	30-44	De La Araucanía	ER_CVD- All	60,94
ISAPRE	30-44	De La Araucanía	ER_RSP-All	4,70
ISAPRE	45-64	De La Araucanía	Mort-all	19913,02
ISAPRE	45-64	De La Araucanía	ER_CVD- All	60,94
ISAPRE	45-64	De La Araucanía	ER_RSP-All	4,70
ISAPRE	65-74	De La Araucanía	Mort-all	19913,02
ISAPRE	65-74	De La Araucanía	ER_CVD- All	59,99
ISAPRE	65-74	De La Araucanía	ER_RSP-All	4,70
ISAPRE	75+	De La Araucanía	Mort-all	19913,02
ISAPRE	75+	De La Araucanía	ER_CVD- All	59,99
ISAPRE	75+	De La Araucanía	ER_RSP-All	4,70

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.

A continuación, se presentan las tasas de incidencia para tres efectos distintos en la Región Metropolitana, la cual se utiliza debido a su gran cantidad de población existente.

Tabla 36: Tasa de Incidencia, Mortalidad, Región Metropolitana.

Edad	Región	Efecto	Tasas de incidencia [casos/100.000 hab]
0-1	Metropolitana de Santiago	Mort-all	608,42
1-4			16,5
5-29			16,3
30-44			66,78
45-64			387,88
65-74			1503,66
75+			6377,22

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.

Tabla 37: Tasa de Incidencia, Hospitalizaciones cardiovasculares, Región Metropolitana.

Edad	Región	Efecto	Tasa de incidencia [casos/100.000 hab]
0-1	Metropolitana de Santiago	HA_CVD-all	51,77
1-4			22,53
5-29			36,42
30-44			131,77
45-64			666,73
65-74			1858,99
75+			3261,48

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.

Tabla 38: Tasa de Incidencia, Días de pérdida laboral, Región Metropolitana.

Edad	Región	Efecto	Tasa de incidencia [casos/100.000 hab]
5-29	Metropolitana de Santiago	WLD	50177
30-44			100354
45-64			100354

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.

Referencias

- [1]. Abdul-Khalek, I. D. (1999). *The Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Size Distribution Measurements*.
- [2]. Ambiental, D. d. (2022). *ANÁLISIS GENERAL DEL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DEL PROYECTO DEFINITIVO DE LA REVISIÓN DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN*.
- [3]. Ambiente, M. d. (2013). *Guía metodológica para la elaboración de un AGIES para instrumentos de medición de calidad del aire*.
- [4]. Andrés Valderrama, P. O.-H.-C. (2022). *Particulate matter (PM10) induces in vitro activation of human neutrophils, and lung histopathological alterations in a mouse model*.
- [5]. CALAC+. (2021). *Medición de número de partículas en unidades de transporte livianas y medianas que cuentan con filtro de partículas diésel (DPF) en Plantas de Revisión Técnica (PRT)*.
- [6]. Energía, M. d. (2021). *Estrategia Nacional de Electromovilidad*.
- [7]. Huneus, N. U. (2020). *El aire que respiramos: pasado, presente y futuro*.
- [8]. ISO. (2015). *Aerosol particle number concentration — Calibration of condensation particle counters*.
- [9]. P Pajdowski, B. P. (2019). *The Process of Diesel Particulate Filter Regeneration under Real Driving Conditions* .
- [10]. Volosciuk, C. (2019). Cambio en las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en ambientes urbanos. *Organización mundial meteorológica*, 22-23.
- [11]. Yan Jiang, J. L. (2019). *PM2.5-induced extensive DNA methylation changes in the heart of zebrafish embryos and the protective effect of folic acid*.
- [12]. Yueqi Wang, C. L. (2021). *Exposure to PM2.5 aggravates Parkinson's disease via inhibition of autophagy and mitophagy pathway*.
- [13] Schraufnagel, D. E. (2020). *The health effects of ultrafine particles (UFP)*. *Experimental & Molecular medicine*, 52, 318-327.
- [14] Revista Electricidad (2021, 9 de junio). *Proyectan 1.000.000 de vehículos eléctricos livianos circulando a 2040 en Chile*. Revista Electricidad.