

**ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA LA REVISIÓN DE LA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD
AMBIENTAL PARA MATERIAL PARTICULADO FINO RESPIRABLE (MP_{2,5})**

Informe Final

Licitación ID: 608897-106-LP22

Centro Mario Molina Chile Spa

**Centro
Mario
Molina**

Investigación
& desarrollo

www.cmmolina.cl

cmmolina@cmmolina.cl

(+56) 2 247 9650

Antonio Bellet 292 int. 602
Providencia, Santiago

Índice de Contenidos

1	<i>Presentación.....</i>	10
2	<i>Resumen ejecutivo.....</i>	11
3	<i>Contexto.....</i>	21
4	<i>Resumen revisión bibliográfica de análisis efectos en salud.....</i>	22
5	<i>Análisis de la Calidad del Aire para MP_{2,5} a nivel nacional</i>	31
5.1	Universo de estaciones analizadas.....	31
5.2	Cumplimiento normativo	36
5.2.1	Zona norte: Regiones XV, I, II, III, IV, V.	36
5.2.2	Región Metropolitana	42
5.2.3	Concepción Metropolitan	48
5.2.4	Zona Sur	52
5.3	Análisis de Tendencias y perfiles de concentraciones	57
6	<i>Análisis de la pertinencia de incorporar las concentraciones background en la presente revisión normativa.</i>	67
7	<i>Estudio de metodologías de monitoreo aplicadas a nivel internacional (continuas, discontinuas, mixtas).....</i>	82
7.1	Técnicas de referencia /equivalentes.....	82
7.2	Revolución de la sensorización para el monitoreo de la calidad del aire y oportunidad para ingreso como metodologías de evaluación exploratorio (Screening)	85
7.3	Nuevos parámetros objetivo para considerar en el monitoreo de MP.....	88
8	<i>Efecto de los Planes</i>	67
8.1	Plan de Descontaminación de Concón-Quintero-Puchuncaví.....	68
8.2	Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana.....	69
8.3	Plan de Descontaminación de Concepción Metropolitan	71
8.4	Planes de la zona centro sur enfocados principalmente al control de las emisiones de leña	73
8.4.1	Implementación del Programa de Recambio de Calefactores	74
8.4.2	Implementación del Programa Acondicionamiento Térmico de Viviendas	74
9	<i>Inventario de Emisiones y Proyección</i>	124
9.1	Estructura del inventario de emisiones	131
9.2	Metodología de cálculo de emisiones y factores de emisión	132
9.3	Emisiones, año base 2021	135
9.3.1	Resultados de emisiones	135
9.4	Proyección inventario año base 2021	142
10	<i>Diagnóstico del cumplimiento normativo determinado en las zonas que encontrarían latencia y saturada. Estimación del número de episodios de emergencia ambiental para un año tipo.</i>	91

10.1	Zonas Saturadas/Latentes	95
10.2	Análisis Niveles de contingencia (Episodios).....	108
11	<i>Análisis de la convergencia entre la propuesta de norma y otros instrumentos regulatorios vigentes y proyectados, con Planes de Descontaminación Atmosférica, Normas de emisión y cualquier iniciativa que esté disminuyendo MP_{2,5} en las fuentes reguladas.</i>	124
12	<i>Análisis de Beneficios de escenario actual y de nuevos escenarios normativos.</i>	150
12.1	Glosario.....	150
12.2	Metodología.....	150
12.3	Valores utilizados.....	153
12.3.1	Coeficientes de riesgo	153
12.3.2	Concentraciones.....	154
12.3.3	Tasas de incidencia.....	159
12.3.4	Población expuesta	161
12.3.5	Valor unitario	163
12.4	Resultados.....	163
12.4.1	Beneficios anuales.....	163
12.4.2	Valor presente.....	165
12.4.3	Casos evitados.....	167
13	<i>Costos totales de los escenarios normativos propuestos.</i>	169
13.1	Metodología cálculo de costos	169
13.1.1	Selección de medidas de control	170
13.1.2	Reducción de emisiones y concentración de MP _{2,5}	171
13.1.3	Proyección de costos y concentraciones ambientales de MP _{2,5}	173
13.1.4	Curva de costos	175
13.1.5	Análisis de costos	177
13.2	Análisis de costos y beneficios.....	178
13.2.1	Análisis de escenarios	180
13.2.2	Análisis de incertidumbre.....	181
14	<i>Bibliografía</i>	183
15	<i>Acrónimos</i>	199

Índice de Tablas

Tabla 1: Emisiones totales por Grupo, año 2021 en t/año.....	14
Tabla 2: Emisiones Totales por Región, año 2021 en t/año	14
Tabla 3: Valores y escenarios de evaluación propuestos.	15
Tabla 4. Casos evitados a nivel nacional relativos a un nivel de concentración anual de 5 mg-m3 de MP _{2,5}	18
Tabla 5: material particulado y efectos en la salud propuestos para la revisión sistemática en el proceso de desarrollo de las guías de la Organización mundial de la salud. Tabla adaptada y traducida desde (J. Chen & Hoek, 2020a).....	28
Tabla 6: Número de estaciones según criterios de la Unión Europea.	34
Tabla 7: Análisis exploratorio de la ubicación de estaciones en función del nivel de población por cada provincia.....	35
Tabla 8: Promedio Anual válido Zona Norte (µg/m ³). En amarillo se identifican las estaciones en condición de Latencia.....	38
Tabla 9: Percentil 98 de la norma diaria Zona Norte (ug/m ³). En Color amarillo estaciones en condición de Latencia. En Rojo estaciones en condición de Saturación.	40
Tabla 10: Promedio Anual de MP _{2,5} en la Región Metropolitana (µg/m ³).....	46
Tabla 11: Percentil 98 de MP _{2,5} en la Región Metropolitana (µg/m ³).....	47
Tabla 12: Promedio Anual de MP _{2,5} en Concepción Metropolitano.	50
Tabla 13: Percentil 98 de MP _{2,5} en Concepción Metropolitano.....	51
Tabla 14: Promedio Anual de MP _{2,5} en la Zona Sur.	54
Tabla 15: Percentil 98 de MP _{2,5} en la Zona Sur.....	56
Tabla 16: Requerimientos de observaciones definidos por la UE (European Council, 2008).	83
Tabla 22: Planes de Descontaminación analizados.	67
Tabla 23: Informes de Estado de Avance en la Implementación de Planes de Descontaminación	68
Tabla 24: Promedio anual de concentración de MP _{2,5} (µg/m ³).....	69
Tabla 25: Resumen principales resultados estudio CDT (2012).....	70
Tabla 26: Regulación de la maquinaria fuera de ruta.....	71
Tabla 27: Evolución del promedio Anual y el percentil 98 de las estaciones del Concepción Metropolitano.	72
Tabla 23: Resumen de la principal fuente de información y nivel de actividad utilizado para la elaboración del inventario de emisiones.....	132
Tabla 24: Emisiones totales por Grupo, año 2021 en t/año.....	136
Tabla 25: Emisiones totales por Grupo y Zona, año 2021 en miles de t/año.	136
Tabla 26: Emisiones totales por Grupo y Sub-Grupo, año 2021 en t/año.	140
Tabla 27: Emisiones Totales por Región, año 2021 en t/año	140
Tabla 28: Zonas de interés.....	97
Tabla 29: Valores y escenarios de evaluación propuestos.	105
Tabla 30: Evaluación de escenarios. Se utilizó información de todas las estaciones disponibles, no solo las EMRP, con la finalidad de tener mayor representatividad espacial.	106

Tabla 31: Niveles de excedencia para MP _{2,5} en EEUU.....	110
Tabla 32: Niveles de excedencia para MP _{2,5} en Chile. *Cada Plan de Descontaminación en Chile puede tener medidas adicionales.....	111
Tabla 33: Zonas de interés.....	113
Tabla 34: Estimación del número de días episodios para cada zona de interés comparados con la situación actual y con la modificación de reducir el nivel de Emergencia a 150 ug/m ³ . Año 2021.....	117
Tabla 35: Propuesta de valores de episodios por MP _{2,5} (ug/m ³) considerando escenarios de evaluación.....	119
Tabla 36: Numero de episodios año 2021 para cada escenario considerando niveles de reducción indicados en la tabla anterior.....	119
Tabla 37: Medidas de reducción de emisiones de MP y sus precursores que pueden ser utilizadas para seguir reduciendo los niveles de MP _{2,5}	128
Tabla 38. Glosario de términos.....	150
Tabla 39. Coeficientes de riesgo asociados a efectos a la salud por µg-m ³ de MP _{2,5} por grupo de edad (Media).....	154
Tabla 40. Tasas de incidencia a nivel nacional por grupo de edad (Casos cada 100 mil habitantes). Fuente: Elaboración propia a partir de DICTUC (2022).	159
Tabla 41. Tasas de incidencia asociadas a mortalidad prematura (CPM) a nivel regional (Casos cada 100 mil habitantes).	160
Tabla 42. Población para el año 2023 según grupo de edad.....	162
Tabla 43. Valores económicos asociados a los efectos en salud (y causas) según grupo de edad (USD por caso).....	163
Tabla 44. Beneficios económicos en salud unitarios por región (USD anuales por µg-m ³ de MP _{2,5} , por habitante).....	165
Tabla 45. Valor presente beneficios económicos en salud a nivel nacional de diferentes escenarios de Norma de Calidad Anual de MP _{2,5}	166
Tabla 46. Participación de los diversos efectos en salud (y causas) en el total de beneficios económicos.	167
Tabla 47. Casos evitados a nivel nacional relativos a un nivel de concentración anual de 5 mg-m ³ de MP _{2,5}	168
Tabla 48. Inventario de emisiones al 2020 a nivel nacional (ton/año).	172
Tabla 49. Costos de cumplimiento de diversos escenarios de concentración anual de MP _{2,5} . Fuente: Elaboración propia.....	177
Tabla 50. Valor presente para diversos escenarios de concentración anual de MP _{2,5} (Miles de millones de USD).	181
Tabla 51. Valor presente Beneficio Neto para diversos escenarios de concentración anual de MP _{2,5} (Miles de millones de USD).	181

Índice de figuras

Figura 1: Análisis de calidad del aire	13
Figura 2: Material particulado y efectos en la salud pulmonares y extrapulmonares. Figura adaptada y traducida desde (Pope & Dockery, 2006).	24
Figura 3: Material particulado y efectos en la salud pulmonares y extrapulmonares. Figura adaptada y traducida desde (Brook et al., 2010b).....	26
Figura 4: N° de estaciones a nivel nacional con monitoreo de MP _{2,5} . Incluye estaciones públicas y privadas.	32
Figura 5: Ubicación de las estaciones de calidad del aire analizadas. Color Rojo indica estaciones públicas, color azul indica estaciones privadas.	33
Figura 6: Cumplimiento de normas diaria y anual para MP _{2,5} zona norte. El número sobre las barras es la concentración de MP _{2,5} en µg/m ³ . Estaciones con asterisco (*) señalan cuales son EMRP para MP _{2,5}	37
Figura 7: Cumplimiento de normas diaria y anual para MP _{2,5} Región Metropolitana. El número sobre las barras es la concentración de MP _{2,5} en µg/m ³ . Estaciones con asterisco (*) señalan cuales son EMRP para MP _{2,5}	42
Figura 8: Evolución del promedio trianual de las concentraciones de MP _{2,5} para todas las estaciones de monitoreo de la R.M. Área naranja indica el rango de valores en donde se encuentran los promedios Trianuales de todas las estaciones de monitoreo (valores mínimo y máximo del promedio trianual) y línea negra representa el promedio de todas las estaciones de monitoreo.....	43
Figura 9: Evolución del Percentil 98 (P98) de las concentraciones de MP _{2,5} para todas las estaciones de monitoreo de la R.M. Área naranja indica el rango de valores en donde se encuentran los valores de P98 de todas las estaciones de monitoreo (valores mínimo y máximo del promedio trianual) y línea negra representa el promedio de todas las estaciones de monitoreo.	44
Figura 10: Evolución del Material Particulado Respirable fracción fina, de la R.M., equipos dicotómicos.....	45
Figura 11: Cumplimiento de normas diaria y anual para MP _{2,5} en el Concepción Metropolitano. El número sobre las barras es la concentración de MP _{2,5} en µg/m ³ . Estaciones con asterisco (*) señalan cuales son EMRP para MP _{2,5}	48
Figura 12: Evolución del Promedio Anual concentraciones de MP _{2,5} en todas las estaciones de monitoreo de Concepción Metropolitano. Área naranja indica rango de concentración (mínimo y máximo) y línea negra representa el promedio.....	49
Figura 13: Evolución del Percentil 98 de concentraciones de MP _{2,5} en todas las estaciones de monitoreo de Concepción Metropolitano. Área naranja indica rango de concentración (mínimo y máximo) y línea negra representa el promedio.....	49
Figura 14: Cumplimiento de normas diaria y anual para MP _{2,5} en la Zona Sur (Valle Central). El número sobre las barras es la concentración de MP _{2,5} en µg/m ³ . Estaciones con asterisco (*) señalan cuales son EMRP para MP _{2,5}	53
Figura 15: Tendencias en Regiones Zona Norte	59
Figura 16: Tendencias en Regiones Zona Sur. *Región de la Araucanía tiene datos meteorológicos hasta el año 2019.....	60
Figura 17: Tendencias en Concepción Metropolitano.....	61

Figura 18: Efecto Mes y Semana Zona Norte, Centro, y Concepción Metropolitano. Gráficos superiores indican efecto mes tomando como referencia el mes de enero (valor 1 en eje X). Gráficos inferiores indican efecto semanal tomando como referencia el día Lunes (valor 1 en el eje x). Se presentan gráficos de caja. Se muestran los puntos internos de la distribución, la media y promedio de cada serie.	62
Figura 19: Efecto meteorológico Zona Norte, Centro, y Concepción Metropolitano. Gráficos superiores corresponden a FIC de Velocidad del viento. Gráficos del medio corresponden a FIC de temperatura. Gráficos inferiores corresponden a FIC de Humedad Relativa. Se presentan gráficos de caja. Se muestran los puntos internos de la distribución, la media y promedio de cada serie.	64
Figura 20: Tendencias FICs para las estaciones de la RM.....	66
Figura 21: Mapa conceptual del monitoreo de la calidad del aire que combina tanto las mediciones regulatorias como las estaciones de investigación de tipo "supersite".....	90
Figura 22: Evolución del promedio Trianual y del percentil 98 de la concentración de MP _{2,5} en la RM (monitoreo continuo).	70
Figura 23: Estado de avance de Programa de Recambio de Calefactores y Subsidios de Acondicionamiento térmico en el Concepción Metropolitano.....	72
Figura 24: Aporte de las principales medidas de los planes, en base a las proyecciones realizadas en los AGIES respectivos.	73
Figura 25: Avance del programa de recambio de calefactores a nivel nacional	74
Figura 26: Avance del programa de Acondicionamiento Térmico a nivel nacional	75
Figura 27: Avance del programa de acondicionamiento térmico a nivel nacional, desagregado en etapas (asignado, iniciado y terminado)	76
Figura 28: Plan de O'Higgins: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico	77
Figura 29: Plan de Curicó: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico	77
Figura 30: Plan de Talca - Maule: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico.....	78
Figura 31: Plan de Chillán – Chillán V.: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico.....	78
Figura 32: Plan de C. Metropolitano: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico.....	79
Figura 33: Plan de Los Ángeles: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico.....	79
Figura 34: Plan de Temuco PLC: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico.....	80
Figura 35: Plan de Valdivia: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico	80
Figura 36: Plan de Osorno: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico	81
Figura 37: Plan de Coyhaique: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico	81
Figura 38: Estructuración del inventario.	131

Figura 39: Distribución Porcentual de Emisiones por Grupo, Año 202. Fuente: Elaboración Propia.....	138
Figura 40: Crecimiento (%) variables socioeconómicas de interés. Fuente: Elaboración propia en base a Dargay et al (1999)	145
Figura 41: Amarillo: Zonas Saturadas/Latente por MP ₁₀ /MP _{2,5} en Chile. Puntos de color rojo indican estaciones de calidad del aire públicas. Triángulos azules estaciones de calidad del aire privadas. Se indican los nombres de las comunas en color azul	96
Figura 42: Valores de estándar anual en diversos países. Fuente: Nazarenko et al., 2021. 103	
Figura 43: Valores de estándar diario de 24 horas en diversos países. Fuente: Nazarenko et al., 2021.	104
Figura 44: Comparación de niveles de excedencia para MP _{2,5} US EPA con Chile.....	112
Figura 45: Simulación utilizando niveles de excedencia de Chile.	115
Figura 46: Simulación utilizando niveles de excedencia de USEPA.	116
Figura 47: Promedio Movil de 24 hrs Zona de Los Ángeles.	117
Figura 48: Simulación de nuevos niveles de contingencia manteniendo el mismo nivel de reducción normativo.	119
Figura 49: Simulación de estados de calidad del aire utilizando niveles de excedencia de los escenarios 2.....	121
Figura 50: Simulación de estados de calidad del aire utilizando niveles de excedencia de los escenarios 3.....	122
Figura 51: Simulación de estados de calidad del aire utilizando niveles de excedencia de los escenarios 4.....	123
Figura 52: Diagrama que resume acciones con efectos en la reducción del MP _{2,5} a Nivel Nacional.....	126
Figura 53. Concentración MP _{2,5} simulada por comuna de Norte a Sur. Fuente: Elaboración propia.	155
Figura 54: Concentración anual de MP _{2,5} (µg-m ³). Zona Norte. Fuente: Elaboración propia.	156
Figura 55: Concentración anual de MP _{2,5} (µg-m ³). Zona Centro. Fuente: Elaboración propia.	157
Figura 56: Concentración anual de MP _{2,5} (µg-m ³). Zona Sur. Fuente: Elaboración propia.	158
Figura 57: Tasas de incidencia por comuna para mortalidad prematura (cardiopulmonar) para mayores de 65 años. Fuente: Elaboración propia a partir de DICTUC (2022).	161
Figura 58: Población nacional al 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de INE (2018).	162
Figura 59. Beneficios económicos en salud a nivel nacional diferentes niveles de cumplimiento de valores anuales de calidad de MP _{2,5}	164
Figura 60: Valor presente beneficios económicos en salud a nivel nacional diferentes niveles de cumplimiento de valores anuales de calidad de MP _{2,5} . Fuente: Elaboración propia.	166
Figura 61: Casos evitados de mortalidad prematura (CPM) a nivel nacional diferentes niveles de cumplimiento de Norma Anual MP _{2,5} . Fuente: Elaboración propia.....	167
Figura 62: Estimación de costos de control de emisiones. Fuente: Elaboración propia en base a DICTUC (2022).....	170

Figura 63. Fracción de componentes elementales para MP2,5. Fuente: Elaboración propia en base a Rizzi y De La Maza (2017)	171
Figura 64. Proyección inventario de emisiones al 2050 para diferentes contaminantes a nivel nacional. Fuente: Elaboración propia.	173
Figura 65. Proyección inventario de emisiones al 2050 para material particulado fino a nivel nacional en toneladas por año. Fuente: Elaboración propia.	174
Figura 66. Proyección exposición de la población a MP2,5 a nivel nacional. Fuente: Elaboración propia.....	175
Figura 67. Medidas para la comuna de Quilicura ordenadas por costo medio por mg-m3 de MP2,5 reducidos.	176
Figura 68. Curva de costos de cumplimiento por comuna. Fuente: Elaboración propia....	177
Figura 69. Flujos anuales a nivel nacional para diferentes niveles de cumplimiento de concentración de MP2,5. Fuente: Elaboración propia.....	179
Figura 70. Valor presente a nivel nacional para diferentes niveles de cumplimiento de concentración de MP2,5. Fuente: Elaboración propia.....	180
Figura 71. Valor presente a nivel nacional para diferentes escenarios de norma de MP2,5 incluyendo incertidumbre.	182

1 Presentación

Centro Mario Molina Chile (CMMCh), institución privada orientada a la provisión de servicios de investigación aplicada en tópicos de medio ambiente y energía, presenta el informe final, correspondiente al “Estudio de antecedentes para la revisión de la Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado fino respirable (MP_{2,5}).

El estudio tiene como Objetivo general *“Proveer antecedentes al proceso de revisión del D.S. N°12/2011 del MMA que establece la Norma de Primaria de Calidad del Aire para MP_{2,5}, mediante una evaluación técnica, económica y científica considerando los costos y desafíos asociados a diferentes escenarios regulatorios”*.

En este documento compila los resultados de actividades que abordan los siguientes objetivos específicos:

A) Analizar el origen, comportamiento, tendencia histórica y proyección de la concentración de MP_{2,5} a nivel nacional, regional y/o por área de interés.

Los contenidos para responder a este objetivo se encuentran detallados en el capítulo 5. Análisis de la Calidad del Aire para MP_{2,5} a nivel nacional; y 8. Efecto de los Planes.

B) Estudiar descriptivamente nuevos efectos en la salud de la población al estar expuesta al MP_{2,5}.

Toda la recopilación se encuentra en el capítulo 4. Resumen revisión bibliográfica de análisis efectos en salud, y en su ANEXO respectivo.

C) Proponer nuevos escenarios normativos para la temporalidad anual y diaria.

Este objetivo es abordado con los capítulos 6. Análisis de la pertinencia de incorporar las concentraciones background en la presente revisión normativa., 7. Estudio de metodologías de monitoreo aplicadas a nivel internacional (continuas, discontinuas, mixtas), y 10. Diagnóstico del cumplimiento normativo determinado en las zonas que encontrarían latencia y saturada. Estimación del número de episodios de emergencia ambiental para un año tipo.

D) Evaluar costos asociados a nuevas medidas a implementar para reducir la contaminación, las cuales sean ya diferentes a las ya evaluadas en la NPCA de MP_{2,5}, y las acciones implementadas en los PPDA.

Estos objetivos son abordados en los capítulos 9. Inventario de Emisiones y Proyección, 11. Análisis de Beneficios de escenario actual y de nuevos escenarios normativos., 12. Costos totales de los escenarios normativos propuestos.

2 Resumen ejecutivo

Si bien, la norma primaria de calidad ambiental para el material particulado fino respirable $MP_{2,5}$ que estableció los valores límites de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones de 24 horas y de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio anual entró en vigencia en Chile el 1° de enero de 2012 (D.S. N°12 del 2011 del Ministerio del Medio Ambiente), el control de este contaminante en Chile se ha llevado a cabo desde el año 1990¹, principalmente en la Región Metropolitana, y en la cual ha logrado una reducción del 70% en el promedio anual de $MP_{2,5}$. El enfoque se ha puesto en esta fracción fina del material particulado respirable debido a su impacto en la salud. La implementación de la norma primaria de $MP_{2,5}$ ha tenido diversos efectos a nivel nacional, que incluyen el fortalecimiento del monitoreo, el acceso a la información, la elaboración de normas de emisión y la creación de planes de descontaminación.

Desde la publicación de la norma, se han llevado a cabo varias acciones, entre las cuales se destacan: i) Implementación de redes de monitoreo continuo de $MP_{2,5}$ a partir del año 2012, ii) Creación de una plataforma en línea denominada SINCA, iii) Declaración de zonas saturadas/latentes por $MP_{2,5}$ desde el año 2012, iv) Elaboración de Planes de Descontaminación Atmosférica específicos para el $MP_{2,5}$ desde el año 2012, v) Elaboración de normas de emisión para reducir las emisiones de material particulado y gases precursores, enfocadas en calidad de combustibles, transporte, industria y calefactores a leña y pellets, vi) Establecimiento de un cronograma de descarbonización que incluye el cierre de todas las centrales a carbón para el año 2040, con 20 unidades cerradas para el año 2025 (~70% de la capacidad), vii) Publicación de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) en el año 2020, que establece meta de al menos 25% de reducción de carbono negro para el año 2030, viii) Publicación de la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) en el año 2021, que establece lineamientos de mitigación y adaptación al cambio climático, incluyendo la reducción de contaminantes locales, ix) Promulgación de la Ley Marco de Cambio Climático (Ley 21.455) en junio del año 2022, que establece instrumentos de mitigación y tiene como meta la neutralidad de carbono para el año 2050, x) Promulgación de la Ley de Eficiencia Energética (Ley 21.305) en febrero de 2021, que establece exigencias de reducción de consumo energético en diversos sectores, incluyendo la industria, minería, edificaciones y transporte, xi) Implementación de estándares obligatorios de eficiencia energética para vehículos livianos nuevos a partir de febrero de 2022, xii) Promulgación de la Ley

¹ Las mediciones de $MP_{2,5}$ partieron al menos diez años antes que la implementación de la norma. Esto dio pie para que el primer Plan de Descontaminación de Santiago, que fue para MP_{10} , se focalizara en el control sobre la fracción fina, ya que en base a las mediciones se supo que éste modulaba el incremento de las concentraciones de MP_{10} en invierno.

de Biocombustibles Sólidos (Ley 21.499) en noviembre de 2022, que otorga atribuciones para la fiscalización de la leña y otros biocombustibles.

En Chile, hasta el año 2021 se han establecido o están en proceso de implementación 27 Planes de Prevención y/o Descontaminación (13 vigentes, 7 en Revisión, 5 en Elaboración, 1 anulado y 1 derogado) que buscan recuperar la calidad del aire de 25 zonas Saturadas y 6 zonas Latentes. La 19 de estos planes se ubican desde la región de Valparaíso hasta Los Lagos, la mayoría de ellos se han ido transformando paulatinamente en macrozonas que abarcan todo el sector central del valle. Las comunas bajo estos tipos de regulaciones concentran casi el 70% de la población de Chile.

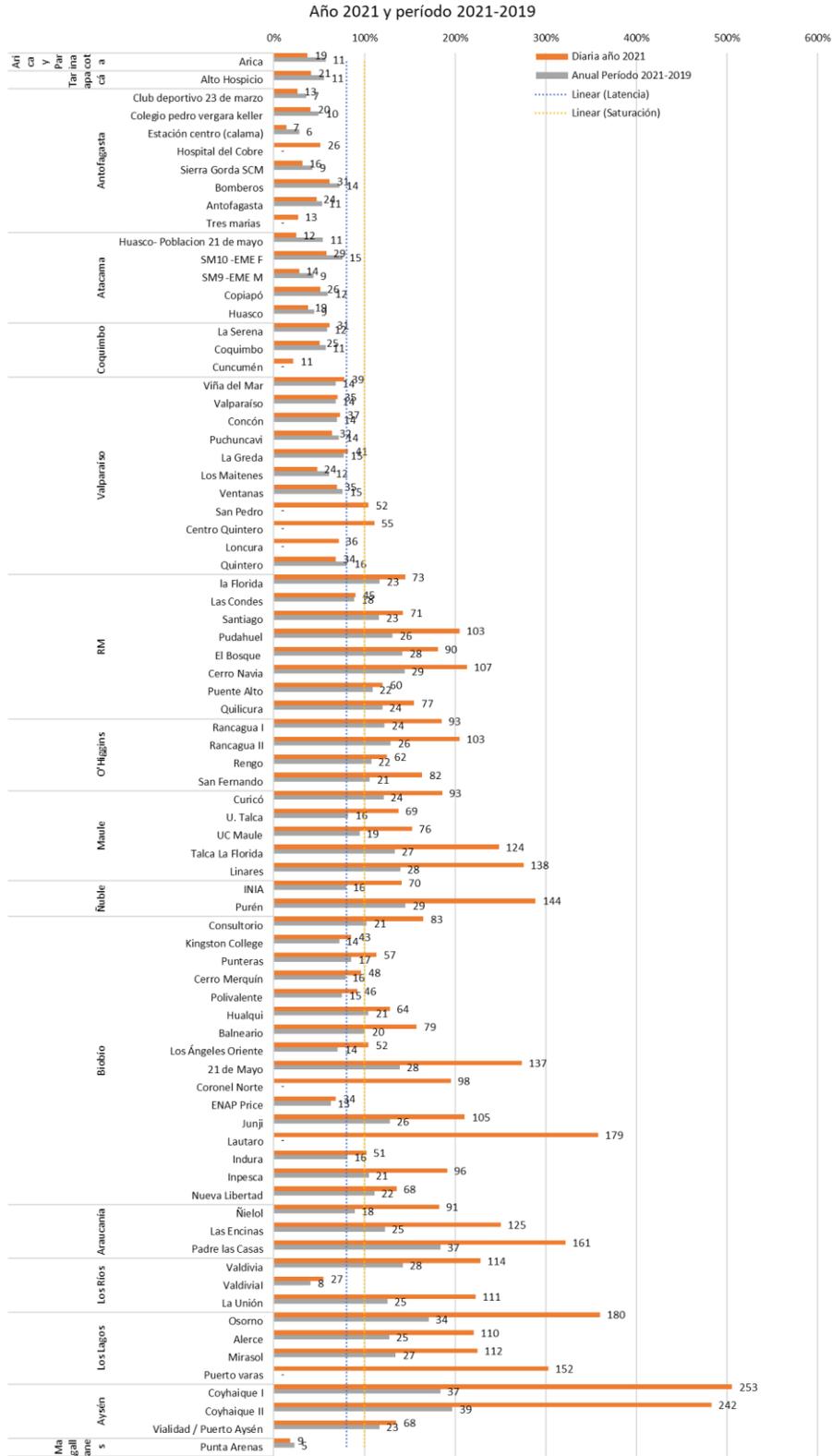


Figura 1: Análisis de calidad del aire

Se presenta un inventario de emisiones a nivel nacional, que fue estructurado en grupos, subgrupos, actividades y subactividades para cuatro grupos de fuentes emisoras (Fuentes Fijas, Fuentes Areales, Fuentes Móviles y Polvo Fugitivo). Respecto a las metodologías de cálculo y factores de emisión utilizados para estimar las emisiones de MP10, MP2.5, CO, NOx, SO2, Black Carbon, COV, NH3 y CO2eq (N2O, CO2, CH4) se utilizaron distintos documentos metodológicos según tipo de fuente, todos ellos contienen las metodologías y criterios de cálculo de emisiones utilizados en el presente estudio. Cabe destacar que en su mayoría los factores de emisión provienen de fuentes de información internacionales tales como AP-42 EPA y EMEP/EEA. Respecto a los niveles de actividad se trabajó con la mejor información disponible proporcionada por la contraparte para realizar la caracterización de los niveles de actividad de las fuentes de emisión, también se revisó las fuentes de información ya disponibles que han sido utilizadas en estudios anteriores.

En la siguiente tabla se presenta las emisiones totales por Grupo y contaminante.

Tabla 1: Emisiones totales por Grupo, año 2021 en t/año.

GRUPO	MP	MP10	MP _{2,5}	BC	SOx	NOx	CO	COV	NH3	CO2eq
FUENTES AREALES	190.774	176.057	164.712	15.660	1.832	29.919	3.173.749	1.786.850	1.902	3.811.669
FUENTES FIJAS	147.106	72.045	50.243	9.928	234.916	182.290	175.024	5.409	638	112.100.668
FUENTES MÓVILES	11.992	11.458	10.766	4.569	846	141.502	227.194	32.551	637	34.527.995
POLVO FUGITIVO	868.090	261.975	34.360							
Total general	1.217.963	521.535	260.081	30.157	237.594	353.711	3.575.967	1.824.811	3.177	150.440.331

Fuente: Elaboración Propia.

En la siguiente tabla se presenta las emisiones totales por región y contaminante.

Tabla 2: Emisiones Totales por Región, año 2021 en t/año

Región	MP	MP10	MP _{2,5}	BC	SOx	NOx	CO	COV	NH3	CO2eq
Arica y Parinacota	2.059	643	212	53	20	1.342	3.088	703	8	268.158
Tarapacá	96.998	30.195	4.145	136	121	5.307	5.692	890	15	1.009.835
Antofagasta	461.849	140.977	20.300	1.257	59.908	40.031	22.442	1.811	38	27.534.497
Atacama	69.305	24.935	5.826	592	39.984	15.681	6.350	1.125	15	9.325.906
Coquimbo	93.165	29.567	5.007	234	140	8.155	23.832	6.087	70	2.493.027
Valparaíso	93.821	58.098	41.102	6.765	29.904	31.467	153.270	38.924	378	15.015.635
Metropolitana de Santiago	59.549	23.219	11.109	2.086	12.344	62.749	175.448	46.128	454	34.014.480
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	90.380	37.594	12.249	1.251	36.833	14.415	125.336	63.693	122	4.017.134
Maule	38.897	18.540	16.587	1.827	1.412	19.740	293.880	152.544	175	7.021.742
Ñuble	24.419	14.472	13.249	1.517	1.643	11.469	239.149	125.785	233	6.884.764
Biobío	56.678	38.816	33.903	4.484	49.774	48.099	599.847	296.711	491	24.335.805

Región	MP	MP10	MP _{2,5}	BC	SOx	NOx	CO	COV	NH3	CO _{2eq}
Araucanía	60.291	50.521	45.564	4.450	815	24.523	791.640	412.410	1.022	6.710.669
Los Ríos	25.286	16.702	15.848	1.752	175	9.752	380.373	240.546	43	5.275.568
Los Lagos	35.617	29.396	27.745	2.966	3.885	43.204	599.054	349.341	83	3.969.313
Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	5.505	4.673	4.418	443	60	2.024	108.810	65.994	12	444.936
Magallanes y de la Antártica Chilena	4.145	3.187	2.815	343	575	15.754	47.756	22.119	18	2.118.863
Total	1.217.963	521.535	260.081	30.157	237.594	353.711	3.575.967	1.824.811	3.177	150.440.331

Fuente: Elaboración Propia.

Considerando la revisión de estándares internacionales, se realizaron simulaciones de escenarios normativos de actualización de la norma de calidad de MP_{2,5} pasando de un primer escenario en donde se consideran esfuerzos necesarios para alcanzar el cumplimiento de la **norma vigente** hasta un escenario ambicioso que representa una reducción del 50% de los valores actuales de la norma (meta 4 propuesta por la guía OMS 2021). Ya con el escenario actual de la normativa vigente se visualizan desafíos relevantes, por la condición de saturación que se observa desde Valparaíso hacia el sur, que va desde los 100% hasta los 506% dependiendo de la zona. Avanzar a un estándar más exigente hace que algunas zonas del Norte como Tocopilla, Copiapó y Huasco entren en condición de Latencia, y en la medida que aumente la exigencia hasta la **meta 4 de la guía OMS 2021** implicaría que gran parte del territorio nacional quede en condición de Latencia o Saturación.

Tabla 3: Valores y escenarios de evaluación propuestos.

Tipo	UE	USEPA	OMS	Escenario
Anual	20 µg/m³ (a)	-	-	Escenario 1
	-	-	15 µg/m³ (b)	Escenario 2
	-	12 µg/m³ (c)	-	Escenario 3
	-	-	10 µg/m³ (d)	Escenario 4
24 horas	-	-	50 µg/m³ (e)	Escenario 1
	-	-	37,5 µg/m³ (f)	Escenario 2
	-	35 µg/m³ (g)	-	Escenario 3
	-	-	25 µg/m³ (h)	Escenario 4

(a): Promedio anual de 3 años con intención de avanzar hacia recomendaciones OMS al año 2030 (35 µg/m³); (b): OMS anual Intermedio 3; (c): Promedio anual 3 años, con intención de avanzar hacia un valor entre el rango 8-11 µg/m³; (d): OMS anual Intermedio 4; (e): OMS Percentil 99 (Intermedio 2); (f): OMS Percentil 99 (Intermedio 3); (g): Percentil 98, promedio en tres años. Eventualmente se puede disminuir a 25 µg/m³; (h): OMS Percentil 99 (Intermedio 4).

Respecto de la revisión de los niveles de excedencia de MP_{2,5}, referidos al umbral en el que la concentración de partículas en el aire supera los límites aceptables o regulados por los estándares de calidad del aire definidos para identificar días episodios se analizaron las diferentes

categorías que tiene la USEPA (AQI-Air Quality Index) y se compararon con las actualmente vigentes en Chile. La mayor diferencia entre ellos es que el nivel “Bueno” en Chile incorpora los casi tres primeros niveles de la USEPA, en tanto que los niveles “Regular”, “Alerta” y “Preemergencia” de Chile se ubican prácticamente en el rango “No Saludable” de la USEPA, y en tanto que el nivel de “Emergencia” se ubica en los dos últimos rangos de la USEPA (“No muy saludable” y “Peligroso”). En relación a las altas concentraciones, la escala de la norma chilena es mucho más exigente, sin embargo, existe a juicio del equipo consultor un espacio para mejorar, reduciendo el nivel de emergencia a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para hacerlo coincidir con el límite “no saludable”. Considerando los actuales niveles, se encuentra que prácticamente todo el año se encuentran niveles de concentración de $\text{MP}_{2,5}$ que están en la categoría “bueno” para todas las zonas del Norte (desde Arica hasta Cuncumén), en tanto que en el sector centro a sur el porcentaje del tiempo en donde se encuentra una calidad del aire categorizada como “Bueno” se reduce hasta un 68% del año. Sin embargo, cuando se hace la misma simulación, pero ahora considerando los niveles de la USEPA, se encuentra una reducción significativa en el porcentaje del tiempo con niveles categorizados como “Bueno”, pasando ahora a ser “Moderado”. Basado en las acciones internacionales, ya en este rango hay acciones que se recomiendan a las “Personas inusualmente sensibles”, y en algunos casos para grupos sensibles en el caso de las zonas del norte. Una reducción el nivel de emergencia actual a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, haría coincidir con el umbral “no saludable” de la USEPA. Sin embargo, este ajuste no modificaría el número total de días episodios, sino que solo cambiaría la distribución de los días según su nivel de gravedad (es decir habría más emergencias que antes).

Se hizo un análisis de beneficio aplicado a nivel nacional utilizando metodología de la USEPA (método de la función de daño, 1991). El impacto más relevante en el caso de las medidas evaluadas corresponde a la reducción de riesgos para la salud. En esta consultoría se utilizaron como referencia los impactos cuantificados y monetizados por aumentos de riesgo de mortalidad prematura y morbilidad identificados por la contraparte técnica en diversos estudios. Los efectos en la salud asociados a la contaminación del aire se estiman usando funciones dosis-respuesta que relacionan niveles de concentración ambiental de $\text{MP}_{2,5}$ con aumentos en riesgos a la salud, mediante modelos log-lineales. El análisis de beneficios se realizó en función de diversos escenarios de norma anual de calidad de $\text{MP}_{2,5}$, asumiendo el total cumplimiento de ésta. Dichos escenarios van desde 30 hasta $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$, con beneficios a nivel nacional de entre 220 millones de USD² y 6.600 millones de USD respectivamente. El grueso de los beneficios corresponde a casos evitados de mortalidad prematura (CPM), los que representan el 97% del total.

² Un escenario hipotético de norma de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ representa beneficios aun cuando la norma de calidad de $\text{MP}_{2,5}$ es de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto se debe a que existen localidades que superan la norma actual, con concentraciones anuales mayores a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que explica que existan reducciones de concentraciones y por ende beneficios en salud.

Tabla 4. Casos evitados a nivel nacional relativos a un nivel de concentración anual de 5 mg-m3 de MP_{2,5}.

Escenario	Tipo de efecto	Efecto	Causa	<18	18–29	30–64	65+	Total
0	Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	913	5.562	6.475
	Acciones médicas	HA	ASTH	206	24	134	0	363
			CVD	0	63	1.548	3.291	4.902
			PNEU	0	0	0	4.437	4.437
			ERV	BRO	223.229	0	0	0
	Restricción actividad	WLD	-	0	509.124	1.400.006	0	1.909.130
		RAD	-	0	2.277.046	6.425.369	0	8.702.415
	5	Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	708	4.318
Acciones médicas		HA	ASTH	159	18	104	0	281
			CVD	0	48	1.198	2.552	3.799
			PNEU	0	0	0	3.477	3.477
			ERV	BRO	172.838	0	0	0
Restricción actividad		WLD	-	0	392.025	1.081.411	0	1.473.437
		RAD	-	0	1.756.451	4.975.030	0	6.731.481
10		Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	503	3.075
	Acciones médicas	HA	ASTH	111	13	75	0	199
			CVD	0	34	849	1.814	2.697
			PNEU	0	0	0	2.517	2.517
			ERV	BRO	122.447	0	0	0
	Restricción actividad	WLD	-	0	274.927	762.817	0	1.037.745
		RAD	-	0	1.235.858	3.524.696	0	4.760.554
	12	Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	422	2.579
Acciones médicas		HA	ASTH	93	11	63	0	166
			CVD	0	28	710	1.519	2.257
			PNEU	0	0	0	2.134	2.134
			ERV	BRO	102.366	0	0	0
Restricción actividad		WLD	-	0	228.234	635.768	0	864.002
		RAD	-	0	1.028.309	2.946.645	0	3.974.954
15		Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	304	1.860
	Acciones médicas	HA	ASTH	66	8	46	0	119
			CVD	0	20	510	1.092	1.622
			PNEU	0	0	0	1.577	1.577
			ERV	BRO	73.595	0	0	0
	Restricción actividad	WLD	-	0	161.153	453.078	0	614.230
		RAD	-	0	730.243	2.114.438	0	2.844.681

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó una revisión de las metodologías de monitoreo aplicadas a nivel internacional, buscando analizar el estatus actual de las tecnologías reconocidas como de referencia y/o equivalentes. Esto se hace ya que la actualización de la guía OMS y las futuras actualizaciones de norma que se realizarán en Estados Unidos y Europa, no solo se limita a la definición de valores o estándares o guías más estrictos, sino también a estar atentos a los avances tecnológicos respecto de las diferentes alternativas de evaluación de calidad del aire que están disponibles y que se han robustecido con el tiempo. Todo esto con la finalidad de garantizar una evaluación más representativa de los efectos en la salud que tiene la exposición de la población en el corto, mediano y largo plazo. En este aspecto se observan dos tendencias importantes que han sido motivo de discusión: i) inclusión de sensores de calidad del aire como monitoreo complementario a la red actual, y ii) necesidad de especialización del monitoreo de $MP_{2,5}$ hacia contaminantes no regulados, pero que son necesarios para identificar impactos en la calidad del aire y gestionar de mejor forma las medidas de contaminación. Respecto de los sensores de calidad del aire (así como también otras técnicas complementarias o de screening), la regulación de la UE abre posibilidades, sin embargo, los procesos de acreditación de técnicas de monitoreo son largos y costosos, lo que ha incidido en un desincentivo a que empresas proveedoras de este tipo de tecnología participen. Esto ha hecho que tanto los instrumentos de medición fija e indicativa pasen por el mismo proceso de homologación y por lo tanto tienen costos de este proceso equivalente, generando desincentivos a que empresas puedan elegir otros instrumentos diferentes. Actualmente se está discutiendo en hacer más flexible este tipo de procesos en la UE, de manera tal que la verificación del nivel de incertidumbre sea más expedita. En Estados Unidos tampoco se observa que los sensores sean usados para propósitos regulatorios, pero sí han sido útiles para complementar el monitoreo oficial mediante la identificación de impactos de plumas de fuentes emisoras, generación de alertas, etc. El monitoreo oficial de referencia está definido operacionalmente como gravimétrico, y actualmente es el más utilizado tanto en Europa como en USA. Dentro de los equipamientos equivalentes destacan principalmente el uso de instrumentos de atenuación beta. Con relación a la necesidad de actualizar el monitoreo de $MP_{2,5}$ a contaminantes no normados, se encuentra que es información clave que deben levantar las redes actuales. Esto lo ha señalado también la OMS en su última actualización, ya que dentro de las partículas existen otros componentes que también tienen efectos negativos, como el carbono negro, las partículas ultrafinas e inclusive el polen (alergias). Sin embargo, el monitoreo de estos parámetros adicionales requerirá una nueva y extensa estandarización con respecto a los nuevos instrumentos específicos necesarios y por ende se requerirá de costos adicionales de inversiones en monitoreo para nuevos instrumentos. Por lo tanto, puede ser más apropiado sugerir una sinergia de acciones en donde se involucre a la comunidad científica³ para el monitoreo de estos

³ Usualmente la comunidad científica se envuelve más en detalle con monitoreo de contaminantes específicos que ayudan a entender procesos complejos, enfocados en investigación. Algunos de esto son estudios de contribución por fuentes emisoras, testeo de nuevos modelos, etc. La oportunidad de actuar de forma colaborativa con la información regulatoria que genera la autoridad ambiental.

parámetros más específicos y costosos estableciendo estaciones de tipo “supersite” que incluyen propósitos de tipo investigativo, que ayuden a complementar el monitoreo regulatorio existente y proporcionen nuevas perspectivas sobre la calidad del aire. Algunos parámetros que se recomiendan incluir en este tipo de “supersitios” son i) Partículas ultrafinas, ii) Compuestos orgánicos volátiles (COV) específicos (benceno, y TEX), iii) Caracterización química de MP (orgánicos, inorgánicos y elementos), iv) Contaminantes atmosféricos relacionados con el cambio climático y contaminantes biológicos (en algunos casos).

3 Contexto

La norma primaria de $MP_{2,5}$ entró en vigencia el 1° de enero del año 2012, de acuerdo al Decreto Supremo N°12 del 2011, del Ministerio del Medio Ambiente, que “Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable $MP_{2,5}$ ” (en adelante, D.S.12/MMA), por lo cual a la fecha cuenta con una década de implementación, constituyéndose así en la principal norma de calidad atmosférica de nuestro país. Si bien la norma a nivel nacional es de implementación relativamente reciente, este contaminante ya se tenía interés en Chile inclusive desde antes del año 1990⁴ en el marco del Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana, registrando a la fecha una reducción del 70% del promedio anual de este contaminante. Este Plan siempre se ha focalizado en la fracción fina del material particulado porque es la que representa los mayores impactos en la salud.

Dado lo anterior, es importante comprender los efectos que esta norma ha tenido a nivel nacional en diversos aspectos: i) fortalecimiento del monitoreo, ii) acceso a la información, iii) elaboración de normas de emisión y iv) planes de descontaminación. Con la implementación de la norma de $MP_{2,5}$ se comenzó a levantar información de calidad del aire en zonas donde no se tenía información. Junto con eso, la disposición de la información en portales públicos como el SINCA permitió levantar mayor atención para poder levantar todo el cuerpo normativo posterior de control de emisiones (Planes de descontaminación, Normas de emisión, etc).

Cabe mencionar que el $MP_{2,5}$ es un contaminante complejo de caracterizar, puesto que su presencia en la atmósfera se explica por emisiones directas y por formación secundaria a partir de gases precursores. A nivel regional, también se pueden encontrar niveles background que se explican por fuentes no antropogénicas o por transporte interregional. También es relevante considerar que una fracción del $MP_{2,5}$, el carbono negro, representa el segundo nivel de impacto en cambio climático después del CO_2 .

Un factor determinante para el logro de los objetivos de este estudio, además de la especificación de los escenarios de la norma, es la selección de medidas de control de emisiones que contribuirán a disminuir las emisiones. Establecer estas acciones, estimar su efecto en reducción de emisiones, los costos y los beneficios de su aplicación, es esencial para evaluarlos. Asimismo, se incluye en este informe una revisión del estado del arte a nivel internacional, respecto de las normas de calidad y las guías disponibles, así como también de los nuevos antecedentes disponibles en relación a los impactos sobre la salud. Se ha puesto especial interés en la revisión de la Guía de la OMS, publicada el 2021, que reduce significativamente los niveles de $MP_{2,5}$ en las referencias diaria y anual.

⁴ Las mediciones de $MP_{2,5}$ comienzan en el 1988.

4 Resumen revisión bibliográfica de análisis efectos en salud⁵

Alcance de la revisión bibliográfica

Para facilitar la lectura del documento se ha incluido un **ANEXO II: Análisis efectos en salud**, el que contiene con todo el detalle de la revisión realizada. En este capítulo del informe se incluye un resumen de los principales hallazgos.

El estudio de los efectos en la salud producidos por la exposición a $MP_{2.5}$ ha sido desarrollado por distintas ciencias del conocimiento. Los más utilizados corresponden a estudios epidemiológicos, los que permiten establecer asociaciones entre los niveles de diversos contaminantes del aire (entre ellos el $MP_{2.5}$). Si bien, dichas asociaciones no son necesariamente causales, y, por lo tanto, deben interpretarse con cautela⁶, han constituido la base principal para fundamentar el establecimiento de regulaciones de contaminantes que busquen proteger la salud pública.

Está consensuado en la comunidad científica que algunas personas son más susceptibles que otras a los contaminantes del aire (Ver capítulo **3.4 Factores Sociodemográficos del ANEXO II Análisis efectos en Salud**). Estos grupos incluyen niños, mujeres embarazadas, adultos mayores y personas con enfermedades cardíacas y pulmonares preexistentes. También se ha visto que las personas que viven en vecindarios y comunidades de bajo nivel socioeconómico pueden ser más vulnerables a la contaminación del aire debido a muchos factores. La proximidad a fuentes industriales de contaminación del aire, problemas de salud subyacentes, mala nutrición, estrés y otros factores pueden contribuir a aumentar los impactos en la salud de estas comunidades. Si bien existen antecedentes nacionales, el alcance de esta revisión consideró la recopilación de información robusta científicamente consensuada, por lo tanto, algunos antecedentes nacionales disponibles no fueron incluidos. Así, también quedaron fuera del alcance últimos antecedentes levantados que aún no están totalmente consensuados, como por ejemplo la relación entre el COVID y contaminación atmosférica por $MP_{2.5}$, ya que se requiere mayor

⁵ Esta sección del documento da cuenta a lo requerido en los puntos 3.2.1 y 3.2.2 de las bases técnicas.

⁶ El diseño de los estudios epidemiológicos que consideren probables efectos de variables adicionales y factores correlacionados con los niveles de contaminantes del aire deben incluirse al momento de evaluar el impacto y la plausibilidad de los hallazgos. Además, la acumulación de evidencia epidemiológica en diversos contextos (poblaciones diversas, zonas geográficas) y la revisión sistemática de efectos reportados, refuerza la idea de causalidad tras una asociación entre un contaminante y un efecto.

La determinación de causalidad debe establecerse en condiciones controladas de manera tal de aislar el factor a estudiar. Diversos estudios clínicos y de laboratorio intentan establecer dichas condiciones y, a través de un diseño experimental, probar si la exposición a un contaminante del aire es capaz de alterar algún parámetro de medición. Gracias a la experimentación continua - bajo condiciones controladas, en humanos, animales y modelos in vitro - se han podido establecer mecanismos y eventos que explicarían como la inhalación de contaminantes del aire (y de $MP_{2.5}$) es capaz de perturbar funciones fisiológicas en órganos distantes.

levantamiento de información para poder establecer interrelaciones robustas. El detalle de la revisión bibliográfica se entrega en el **ANEXO II: Análisis efectos en Salud**⁷.

Mecanismos biológicos

(Pope & Dockery, 2006) en su revisión resume cómo los efectos de la inhalación de material particulado pueden afectar el sistema cardiovascular (efecto de interés emergente en esos años). Nosotros hemos actualizado la figura contenida en dicha revisión (Figura 2, adaptada y traducida desde Pope & Dockery 2006, donde se muestra que los efectos pulmonares de la inhalación a material particulado pueden consecutivamente alterar funciones cardíacas, vasculares y hematológicas que a su vez impactan funciones sistémicas y neurológicas.

⁷ Para facilitar la lectura del documento se ha incluido un anexo con todo el detalle de la revisión de efectos en la salud. En este capítulo del informe se incluye un resumen de los principales hallazgos.

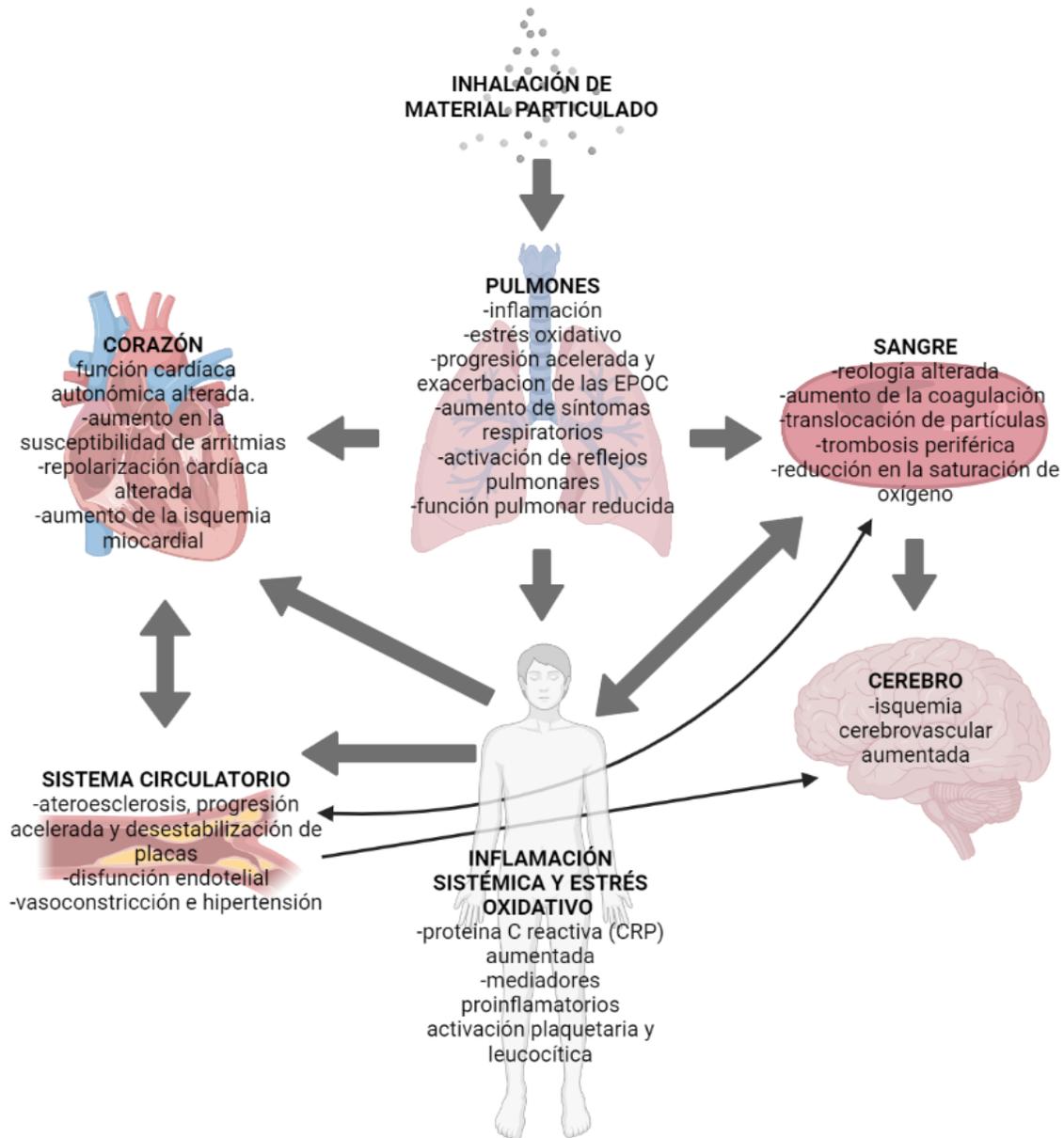


Figura 2: Material particulado y efectos en la salud pulmonares y extrapulmonares. Figura adaptada y traducida desde (Pope & Dockery, 2006).

Extendiendo este esquema, Brook et al., 2010a provee una serie de vías biológicas que conectan la exposición a material particulado y el desarrollo o exacerbación de enfermedades cardiovasculares (Figura 3 adaptada y traducida desde Brook et al., 2010a). Desde que el material particulado inhalado ha contactado las zonas más profundas del sistema respiratorio (bronquios y alveolos), tres vías intermedias y subsecuentes respuestas biológicas específicas se proponen como eventos biológicos que explicarían los efectos extra-pulmonares de la inhalación de material particulado:

- La primera vía considera que el estrés oxidativo y la inflamación pulmonar producida por la exposición sub-crónica o crónica al material particulado produciría un rebalse sistémico o “systemic spillover” que consistiría en el traspaso de compuestos bioactivos producidos en el pulmón con potencial dañino hacia la sangre determinando la activación de procesos inflamatorios y de estrés oxidativo a nivel sistémico.
- La segunda vía incluye la activación del sistema nervioso autónomo (SNA) a través de receptores en los pulmones. Esta vía considera el rápido desbalance entre el sistema nervioso simpático y parasimpático luego de una exposición aguda a material particulado que determinaría entre otras, respuestas cardíacas (como el aumento en la frecuencia cardíaca, la disminución de la variabilidad de dicha frecuencia y la generación de potenciales arritmias), vasculares (vasoconstricción, disfunción endotelial y aumento en la presión sanguínea) y hematológicas (aumento en la agregación plaquetaria).
- La tercera vía describe la translocación del material particulado y/o constituyentes de éste hacia el torrente sanguíneo afectando las funciones vasculares (vasoconstricción, disfunción endotelial y aumento en la presión sanguínea) y hematológicas (posible aumento en la agregación plaquetaria) bajo un régimen de exposición agudo y/o crónico.

Las tres vías descritas promueven el estrés oxidativo y la inflamación a nivel sistémico. Compuestos proinflamatorios como las citoquinas, glóbulos blancos activados, macromoléculas oxidadas (lípidos), entre otros serían los responsables de ejercer acciones directas o a través de la activación de blancos distantes como el tejido adiposo (generando un estado activado o inflamatorio a través de la liberación de adipoquinas) o el hígado (activando la respuesta de fase aguda o incrementando la concentración de factores de coagulación y la proteína C reactiva [CRP]). Dichas acciones son agrupadas en las producidas sobre los vasos (vasoconstricción y disfunción endotelial, aumento de especies reactivas de oxígeno, promoción de aterosclerosis [síndrome producido por el depósito de sustancias lipídicas en las paredes de las arterias] y aumento en la trombogenicidad), el metabolismo (resistencia a la insulina, dislipidemia) y la sangre (aumento en la capacidad de coagulación y formación de trombos y disminución de la fibrinólisis).

Cabe destacar que las tres vías descritas no son excluyentes y su contribución depende de la naturaleza de la exposición (intensidad, dosis, régimen, etc) y características inherentes de la población / individuo expuesta/o. Adicionalmente, y como se aprecia en la Figura 3, los efectos extrapulmonares de la exposición a $MP_{2.5}$ no serían dependientes de la translocación directa de partículas o constituyentes de estas desde los pulmones hacia otros órganos y agentes intermediarios o desbalances en el sistema nervioso podrían afectar sistemas en la periferia. Finalmente, y siguiendo el desarrollo de las vías presentadas la Figura 2 y Figura 3, es posible establecer que órganos y sistemas adicionales a los presentados pueden ser impactados por la exposición a $MP_{2.5}$.

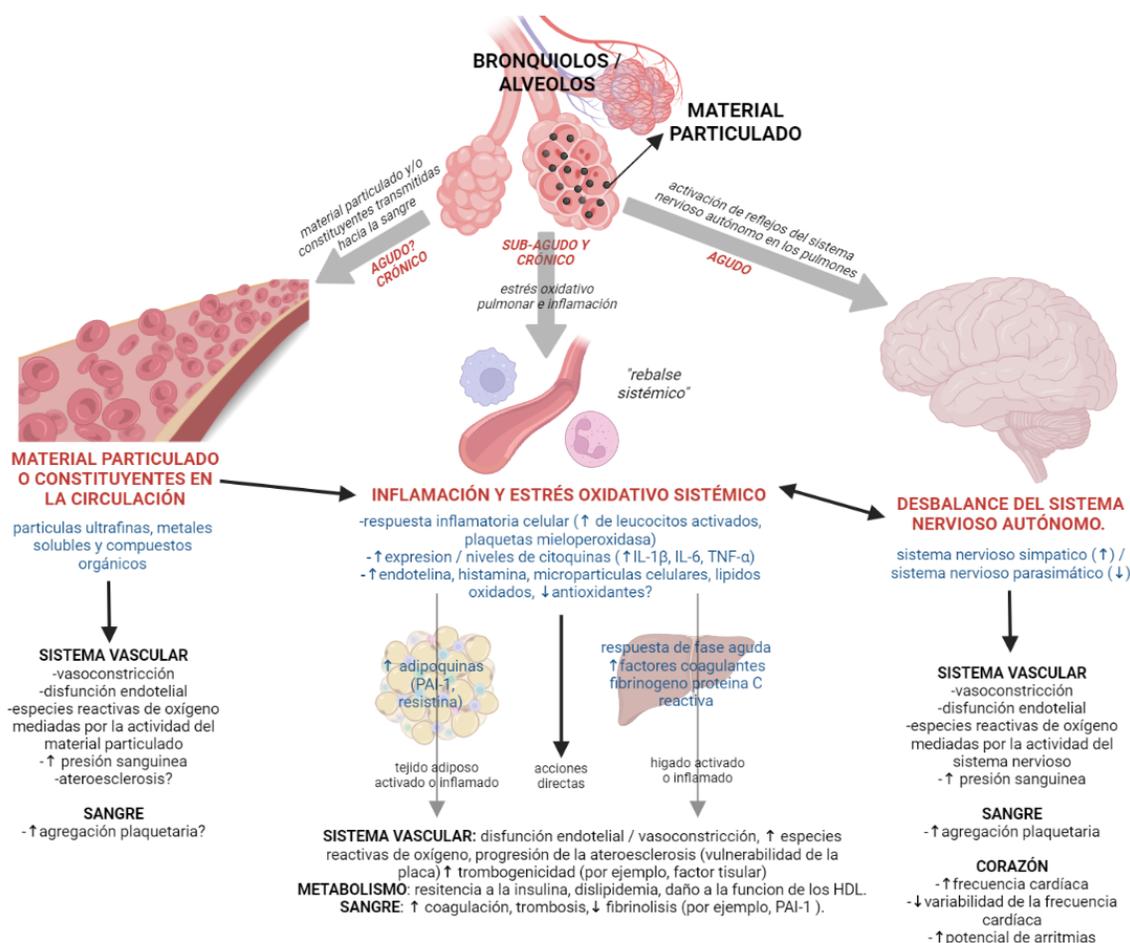


Figura 3: Material particulado y efectos en la salud pulmonares y extrapulmonares. Figura adaptada y traducida desde (Brook et al., 2010b)

Considerando la información expuesta, se analizó la amplia literatura reciente enfocada en los efectos en la salud de la exposición a $MP_{2.5}$ incorporando aspectos de interés en la asociación entre la exposición a $MP_{2.5}$ y condiciones/enfermedades donde el criterio causal ha sido establecido. Además, se consideró la nueva evidencia resaltando los efectos de la exposición a $MP_{2.5}$ en concentraciones relativamente bajas y la afectación a poblaciones vulnerables o susceptibles.

Revisión de efectos en la salud

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US. EPA.) han realizado recopilaciones exhaustivas de la literatura sobre el tema. Estas revisiones son las más completas y recientes disponibles, y están escritas por expertos en el campo.

La OMS durante el año 2021 publicó su guía global de calidad del aire (WHO Global Air Quality Guidelines) donde se actualizaron los niveles de concentración recomendados para diversos contaminantes del aire incluyendo el $MP_{2.5}$ (WHO, 2021). Dicho documento corresponde a una versión actualizada de la guía publicada en el año 2005 (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2006). La evidencia epidemiológica usada para determinar los nuevos niveles recomendados se encuentran en una revisión (meta-analysis) en la revista Environment International (J. Chen & Hoek, 2020b). A continuación, se incluye una tabla resumen que deja ver las principales modificaciones que expresa la OMS en su versión 2005 y su versión más actualizada, 2021.

Tabla 5: material particulado y efectos en la salud propuestos para la revisión sistemática en el proceso de desarrollo de las guías de la Organización mundial de la salud.
Tabla adaptada y traducida desde (J. Chen & Hoek, 2020a).

Contaminante	Efectos en la salud usados en la guía del año 2005	Efectos en la salud seleccionados y actualizados para la guía del 2021	Determinación de causalidad
Exposición de Largo Plazo			
PM_{2.5} y PM₁₀	Mortalidad total, cardiopulmonar y de cáncer al pulmón.	*Mortalidad por todas las causas no accidentales *Mortalidad cardiovascular (total, cerebrovascular, de las arterias coronarias) *Mortalidad Respiratoria (cualquiera, enfermedad obstructiva pulmonar crónica [EPOC], Infecciones respiratorias agudas de las vías aéreas inferiores) *Mortalidad por cáncer pulmonar	PM_{2.5} *Causal para mortalidad cardiovascular y respiratoria (US EPA, 2009) *Causal para mortalidad cardiovascular y total (Health Canada, 2013)
			PM *Causal para mortalidad total en relación a PM (Health Canada, 2013) *Grupo 1b para cáncer pulmonar (Straif et al. 2013) *Probablemente causal para mortalidad por cáncer pulmonar (Health Canadá, 2013)
			Consideraciones adicionales *PM ₁₀ --> Efectos en la salud apoyadas por evidencia provenientes del PM _{2.5} y PM ₁₀
			Otras determinaciones causales relevantes *PM _{2.5} --> Probablemente causal para efectos respiratorios (US EPA, 2009) *PM _{2.5} --> Probablemente causal para efectos respiratorios (Health Canadá, 2013)

Contaminante	Efectos en la salud usados en la guía del año 2005	Efectos en la salud seleccionados y actualizados para la guía del 2021	Determinación de causalidad
Exposición de Corto Plazo			
PM_{2.5} y PM₁₀	Niveles de carboxihemoglobina menor al 2% en la sangre de no-fumadores (WHO Regional Office for Europe, 200a, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> *Mortalidad por todas las causas *Mortalidad cardiovascular *Mortalidad Respiratoria 	<p>PM_{2.5}</p> <ul style="list-style-type: none"> *Causal para mortalidad por todas las causas, cardiovascular y respiratoria (US EPA, 2009) *Causal para mortalidad por todas las causas, cardiovascular y respiratoria (Health Canada, 2013)
PM (Fracción de cualquier tamaño)			
*Causal para mortalidad por todas las causas (Health Canada, 2013)			
Consideraciones adicionales			
*Mortalidad cardiovascular y respiratoria también considerada en la determinación causal de efectos respiratorios y cardiovasculares (US EPA, 2009)			
*PM ₁₀ , apoyado por la evidencia del PM _{2.5}			
Otras determinaciones causales relevantes			
*Probablemente causal para efectos respiratorios (US EPA, 2009)			
*Causal para efectos cardiovasculares (US EPA, 2009)			
*Causal para efectos respiratorios (Health Canada, 2013)			
*Causal para efectos cardiovasculares (Health Canada, 2013)			

Paralelamente, la US EPA recientemente actualizó su ISA (Evaluación Integral de la Ciencia, Integrated Science Assessment) para el material particulado (PM ISA). El reporte final de la última PM ISA fue publicada el 2019 (U.S. EPA., 2019) y corresponde a una evaluación de la evidencia científica relevante al momento de decretar políticas en relación a la normativa del material particulado. Bajo el Acta Del Aire Limpio (Clean Air Act) - que corresponde a la ley federal primaria que regula la calidad del aire en EEUU - la ISA es preparada periódicamente como parte de la revisión de las normas nacionales de la calidad del aire ambiental (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) primarias (usadas para proteger la salud) y secundarias (usadas para proteger el bienestar) que incluyen al material particulado. La versión actualizada incluye la revisión de evidencia científica divulgada desde la publicación del anterior PM ISA realizada el 2009. Es importante considerar que la PM ISA contiene la revisión de la literatura para el material particulado en todas sus fracciones (no solo MP_{2.5}).

La US EPA, durante diciembre del 2020 decidió mantener los niveles establecidos de normas para el MP_{2.5} y MP₁₀ sin revisión. En junio del 2021, la EPA anunció reconsiderar su decisión explicando que desarrollaría un suplemento de la PM ISA. El borrador de dicho suplemento fue publicado en septiembre del 2021 y en mayo del 2022 su versión final (U.S. EPA., 2022)⁸.

⁸ U.S. EPA. (2022). Supplement to the 2019 Integrated Science Assessment for Particulate Matter (Final Report, 2022). [Supplement to the 2019 Integrated Science Assessment for Particulate Matter \(Final Report, 2022\) | ISA: Integrated Science Assessments | Environmental Assessment | US EPA](#)

5 Análisis de la Calidad del Aire para MP_{2,5} a nivel nacional⁹

Se incluye en este capítulo un análisis de la calidad del aire para MP_{2,5} con foco en la revisión de la información disponible desde tres perspectivas: Cumplimiento normativo, perfiles temporales (variación diaria, semanal y mensual) y evolución de los niveles de MP_{2,5}, para lo cual utilizaremos un análisis de las tendencias.

5.1 Universo de estaciones analizadas

Se analizó información de calidad del aire y meteorología de 85 estaciones de calidad del aire proporcionadas por la contraparte técnica del estudio. De ellas, 58 son públicas y 27 son privadas, estas últimas emplazadas principalmente en las regiones de Antofagasta, Atacama, Valparaíso y Biobío. Solo las estaciones públicas cuentan con validación de datos por parte de la Subsecretaría del Medio Ambiente¹⁰. Conforme con la Resolución Exenta N°1690/2022¹¹ de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) se contabilizan 107 estaciones de monitoreo con representación poblacional o representación de recursos naturales en Chile, de las cuales 41 son EMRP para MP_{2,5} que se encuentran en las regiones desde Valparaíso hacia el sur. Todas ellas están incluidas dentro de este listado, excepto la estación de Valle Alegre (Valparaíso)¹².

La disponibilidad de información de las estaciones incluidas en este análisis indica mayor nivel de completitud para aquellas ubicadas en la Región Metropolitana (RM) que registran datos desde el año 2000.

La entrada en vigencia de la norma de calidad en el año 2012 hizo que el número de estaciones aumentara significativamente desde 20 a más de 80 estaciones en menos de 10 años (Figura 4).

⁹ Esta sección del documento da cuenta de los puntos 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.5, de las bases técnicas del estudio. Se incluye un anexo con mayor detalle de los análisis.

¹⁰ En base a información del portal SINCA, se contabilizan un total de 219 estaciones de calidad del aire a nivel nacional, de las cuales 109 tienen/tenían información de MP_{2,5}. En este estudio se analizaron 85 estaciones. Las estaciones que no están consideradas son: Supersite (EMRP), Escuela E-10, Los Andes, La Palma, Cerrillos II, Quilicura II, Cauquenes, El Boldo, San Carlos, Chiguayante, Escuadron-Enel, Escuadron-Endesa, Lagunillas-Enel, Lota Rural, Lota Urbana, Bocatoma, Club de Empleados, San Vicente, Libertad, CEFAM Lago Ranco y Entre Lagos. Cabe mencionar que Quilpué, Cuerpo de Bomberos y Museo Ferroviario dejaron de tener registros desde al menos 4 años atrás, por lo tanto, están inactivas. Descontando estas estaciones inactivas, en este informe corresponden a un 80% del registro de las estaciones activas en SINCA. Se usó toda la información disponible al momento. Las estaciones que no fueron incluidas se deben a que ya no contaban con mediciones vigentes al año 2021, su periodo de medición es menor a un año o no hay información disponible. Por lo cual, en el presente estudio se analizaron todas las estaciones monitoras vigentes con información disponible

[Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire \(mma.gob.cl\)](http://mma.gob.cl)

¹¹ <https://bcn.cl/39sat>

¹² A pesar de que tiene representatividad poblacional por MP_{2,5}, no se monitorea. Se comprueba en que en SINCA no tiene datos de MP_{2,5}

En el año 2021 se reduce de 82 a 80 debido a que Indura y Cerrillos no tienen registros en ese último año.

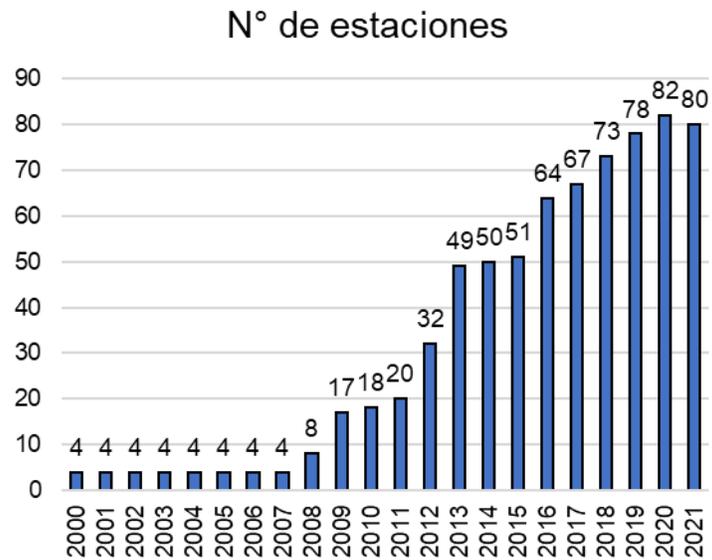


Figura 4: N° de estaciones a nivel nacional con monitoreo de $MP_{2.5}$. Incluye estaciones públicas y privadas.

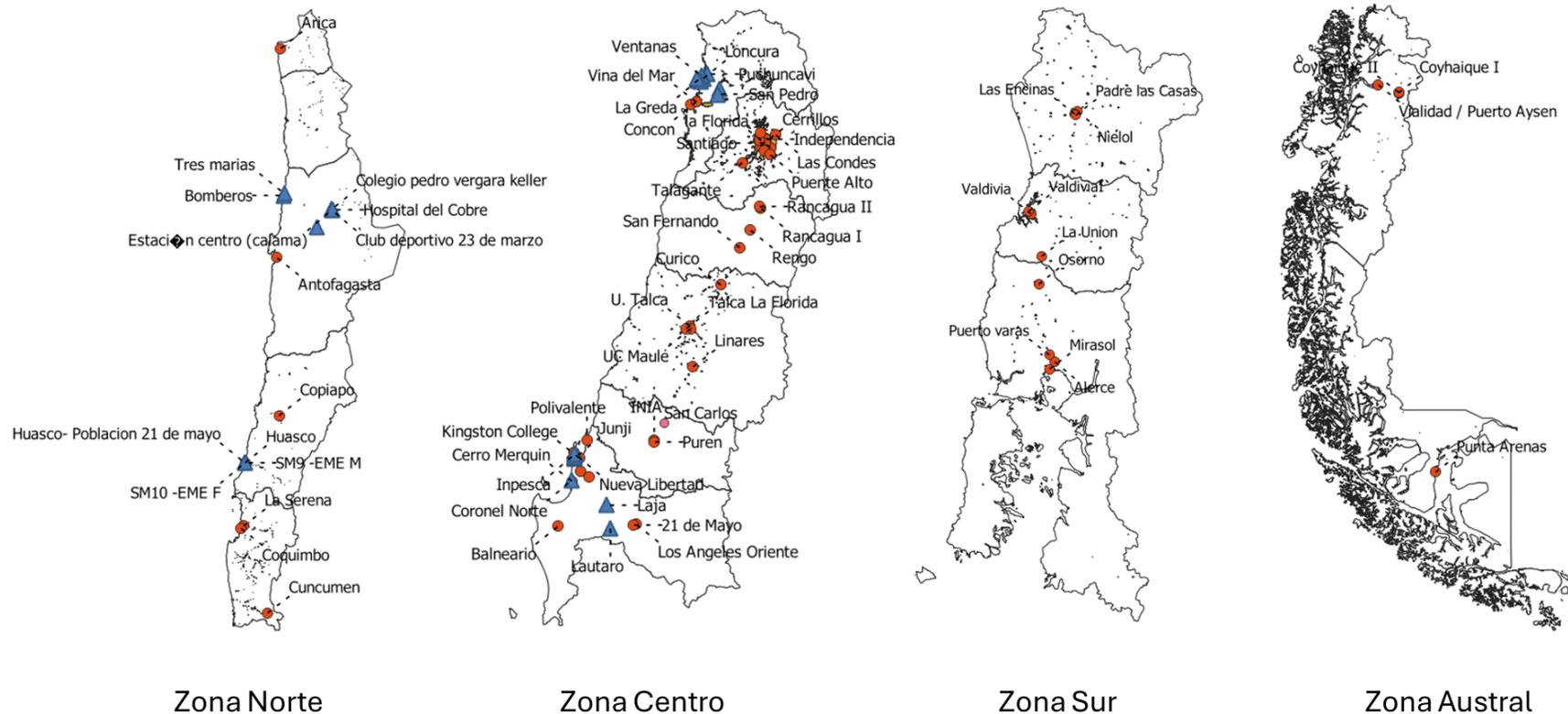


Figura 5: Ubicación de las estaciones de calidad del aire analizadas. Color Rojo indica estaciones públicas, color azul indica estaciones privadas.

Se hizo un análisis screening de la ubicación de estas estaciones en función del nivel de población por cada provincia. La UE dispone de criterios de número de sitios fijos para el monitoreo que se basan tamaño de población y según nivel de la norma (Tabla 6). Aplicando ambos criterios en Chile se encuentra que se necesitarían cerca de 85 estaciones de calidad del aire de MP₁₀ y MP_{2,5} a nivel nacional, que es similar al número considerado en este estudio. Sin embargo, no están bien distribuidas espacialmente según el tamaño de la población, ya que la disposición de ellos en otros casos ha incluido otros aspectos (máximo impacto, requerimientos locales de la zona de emplazamiento, etc). En algunos casos como en la provincia de Valparaíso hay una sobrepoblación de estaciones (se necesitarían 2 y hay 10); situación similar a la Provincia de Concepción (donde se necesitan 6 estaciones y hay 12). En otros casos hay mayor necesidad de incrementar el monitoreo.

Tabla 6: Número de estaciones según criterios de la Unión Europea.

Población (en miles)	Si la concentración máxima excede el umbral superior de evaluación*		Si la concentración máxima excede el umbral inferior de evaluación*	
	Todos los contaminantes excepto MP ₁₀ /MP _{2,5}	MP (Suma de MP _{2,5} y MP ₁₀)	Todos los contaminantes excepto MP ₁₀ /MP _{2,5}	MP (Suma de MP _{2,5} y MP ₁₀)
0–249	1	2	1	1
250–499	2	3	1	2
500–749	2	3	1	2
750–999	3	4	1	2
1000–1499	4	6	2	3
1500–1999	5	7	2	3
2000–2749	6	8	3	4
2750–3749	7	10	3	4
3750–4749	8	11	3	6
4750–5999	9	13	4	6
≥6000	10	15	4	7

*umbral superior de evaluación: 17 µg/m³; umbral inferior de evaluación: 12 17 µg/m³.

Tabla 7: Análisis exploratorio de la ubicación de estaciones en función del nivel de población por cada provincia.

Nombre Región	Nombre Provincia	Población 2021	N° de estaciones	N° de estaciones según UE	
Arica y Parinacota	Arica	252.034	1	2	
Tarapacá	Iquique	361.212	1	2	
Antofagasta	Antofagasta	464.458	2	2	
Antofagasta	El Loa	204.301	4	1	
Antofagasta	Tocopilla	34.987	2	1	
Atacama	Copiapó	207.239	1	1	
Atacama	Huasco	82.091	4	1	
Coquimbo	Elqui	567.232	2	2	
Coquimbo	Choapa	95.474	1	1	
Valparaíso	Valparaíso	816.244	10	2	
Valparaíso	Quillota	221.082	1	2	
Metropolitana de Santiago	Santiago	6.075.403	8	15	
Metropolitana de Santiago	Cordillera	705.084	1	3	
Metropolitana de Santiago	Talagante	343.209	1	3	
Libertador General Bernardo O'Higgins	Cachapoal	712.411	3	3	
Libertador General Bernardo O'Higgins	Colchagua	239.520	1	2	
Maule	Talca	454.238	3	3	
Maule	Curicó	316.202	1	3	
Maule	Linares	310.813	1	3	
Ñuble	Diguillín	344.251	2	3	
Biobío	Concepción	1.068.338	12	6	
Biobío	Arauco	176.990	1	2	
Biobío	Bíobío	425.262	3	3	
La Araucanía	Cautín	803.872	3	4	
Los Ríos	Valdivia	309.728	2	3	
Los Ríos	Ranco	98.090	1	2	
Los Lagos	Llanquihue	447.281	3	3	
Los Lagos	Osorno	248.663	1	2	
Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	Coyhaique	62.415	2	2	
Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	Aysén	32.534	1	2	
Magallanes y de la Antártica Chilena	Magallanes	144.350	1	1	
	16	31	16.625.008	80	85

5.2 Cumplimiento normativo

Se evaluó el cumplimiento de la norma MP2,5 en sus parámetros diario y anual, de acuerdo a lo establecido en el artículo 4 del D.S.12/MMA13. Se analizaron los registros de todas las estaciones consideradas en la información proporcionada por la contraparte técnica (públicas y privadas), con especial atención las que tienen calificación EMRP porque son las consideradas para la evaluación normativa, independiente si son públicas o privadas. Para simplificar el análisis, se dividió el país en cuatro zonas geográficas, considerando las 85 estaciones disponibles.

- Zona norte: Regiones XV (Arica y Parinacota), I (Tarapacá), II (Antofagasta), III (Atacama), IV, (Coquimbo) y V (Valparaíso).
- Región Metropolitana: 52 comunas que componen la Región Metropolitana.
- Concepción Metropolitano: 10 comunas que componen la zona Metropolitana de Concepción.
- Zona sur: VI (O'Higgins), VII (Maule), VIII (Bio-bío, exceptuando Concepción Metropolitano), IX (La Araucanía), X (Los Lagos), XI (Aysén), XII (Magallanes), XIV (Los Ríos) y XVI (Ñuble).

5.2.1 Zona norte: Regiones XV, I, II, III, IV, V.

El resumen de la zona norte se entrega en la Figura 6, como porcentaje (%) del cumplimiento de la norma para el año 2021 (norma diaria) y para el período 2019-2021 (norma anual). En general todas las estaciones se encuentran por debajo de la norma con excepción de la estación de San Pedro y Quintero Centro (en Valparaíso) que se encuentran en un 105% y un 111% del nivel de la norma. Sin embargo, cabe mencionar que estas estaciones no tienen calificación EMRP para MP2,5. La única estación EMRP de interés es La Greda, que se encuentra en nivel de Latencia al año 2021 (82% de la norma diaria).

¹³ Los datos horarios de calidad del aire fueron promediados para obtener información de promedios diarios válidos (esto es con al menos 18 horas de medición, según D.S N° 61/2008 MINSAL). El cálculo del promedio anual y percentil 98 fue realizado siguiendo los procedimientos señalados en el artículo 6 de la norma de calidad de MP_{2,5}. Cabe mencionar que los cálculos oficiales de verificación de norma corresponden a los realizados por la SMA, cuyos informes de cumplimientos se encuentran en el portal: <https://snifa.sma.gob.cl/>. Los realizados en este estudio son referenciales.

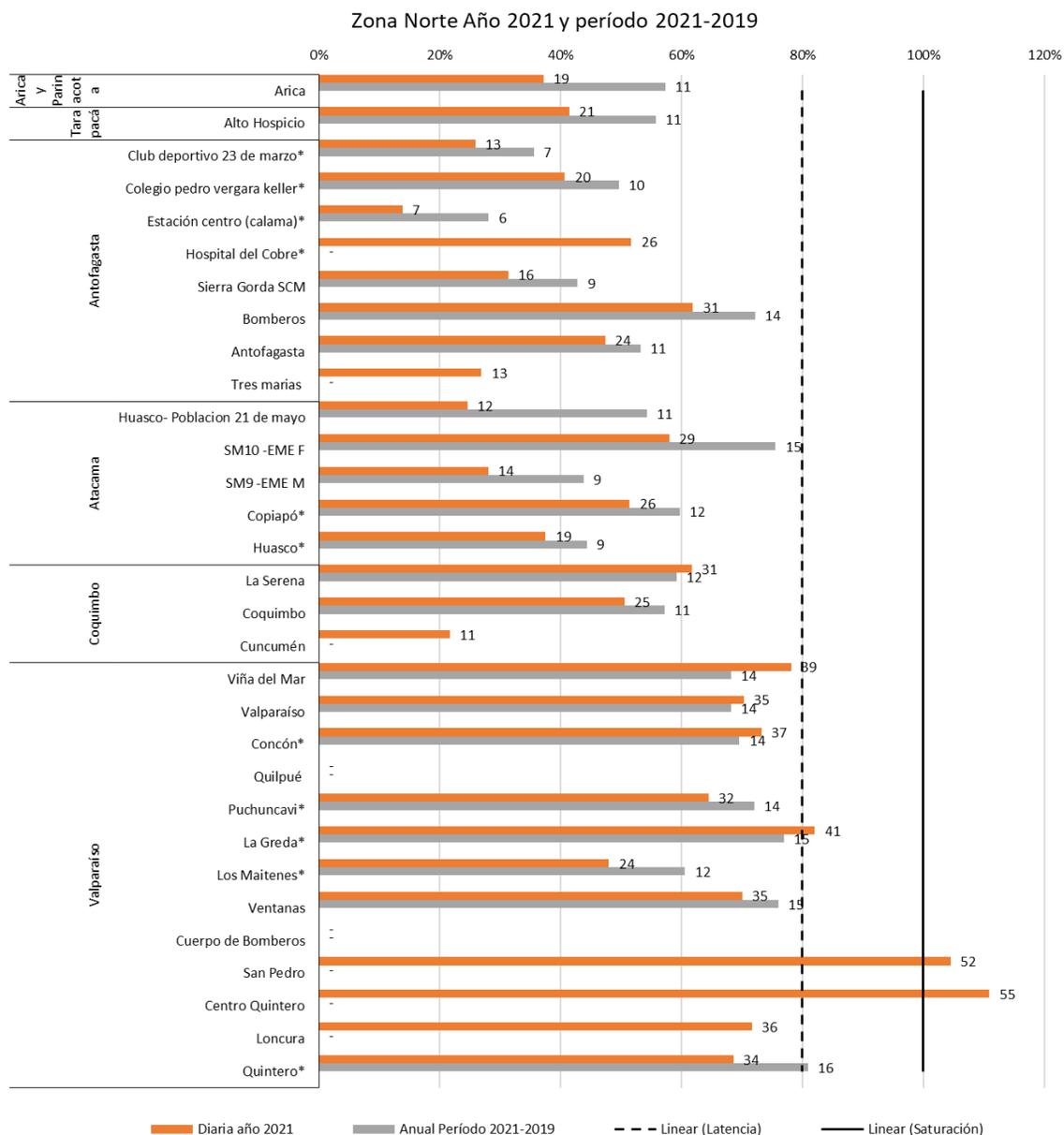


Figura 6: Cumplimiento de normas diaria y anual para $MP_{2,5}$ zona norte. El número sobre las barras es la concentración de $MP_{2,5}$ en $\mu g/m^3$. Estaciones con asterisco (*) señalan cuales son EMRP para $MP_{2,5}$.

Respecto al promedio de concentración anual (Tabla 8) y el Percentil 98 (Tabla 9) histórico en las estaciones de la zona norte no se identifican tendencias importantes, excepto algunas estaciones que evidencian una reducción en el nivel de concentración: Región de Antofagasta, estación centro de Calama, y bomberos; Atacama, estación Copiapó. La completitud de información de la estación Viña del Mar no es suficiente para cumplir con el umbral del 75% requerido regulatoriamente en el período previo al año 2016.

Tabla 8: Promedio Anual válido Zona Norte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). En amarillo se identifican las estaciones en condición de Latencia.

Región	Estación	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Promedio trianual del periodo 2019-2021	EMRP MP _{2,5}
Arica y Parinacota	Arica	-	-	-	-	-	15	13	11	12	13	11	12	11	11	
Tarapacá	Alto Hospicio	-	-	-	-	-	-	-	12	13	11	11	10	12	11	
Antofagasta	Club deportivo 23 de marzo	-	-	-	-	8	9	-	7	6	10	7	7	7	7	EMRP
Antofagasta	Colegio PVK	-	-	-	-	12	12	12	11	10	12	10	9	11	10	EMRP
Antofagasta	Estación centro (Calama)	-	-	-	-	11	9	9	9	8	9	6	6	5	6	EMRP
Antofagasta	Hospital del Cobre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12		EMRP
Antofagasta	Sierra Gorda SCM	-	-	-	-	10	10	10	8	-	10	9	9	7	9	
Antofagasta	Bomberos	-	-	-	-	-	26	26	24	22	19	15	14	14	14	
Antofagasta	Antofagasta	-	-	-	-	-	12	12	9	8	10	12	9	11	11	
Antofagasta	Tres Marías	-	-	-	19	-	16	12	15	14	15	-	11	8		
Atacama	Huasco- población 21 de mayo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	11	7	11	
Atacama	SM10 -EME F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	17	16	15	
Atacama	SM9 -EME M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	9	7	9	
Atacama	Copiapó	-	-	-	-	-	19	20	14	14	14	12	12	12	12	EMRP
Atacama	Huasco	-	-	-	-	-	-	11	9	10	11	9	9	9	9	EMRP
Coquimbo	La Serena	-	-	-	-	-	14	-	17	13	15	14	10	12	12	
Coquimbo	Coquimbo	-	-	-	-	-	15	14	12	14	14	12	11	12	11	
Coquimbo	Cuncumén	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	5		
Valparaíso	Viña del Mar	24	-	-	-	-	-	-	21	12	13	14	12	14	14	

Región	Estación	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Promedio trianual del periodo 2019-2021	EMRP MP _{2,5}
Valparaíso	Valparaíso	-	-	-	-	-	16	17	15	14	15	14	13	14	14	
Valparaíso	Concón	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	14	14	13	14	EMRP
Valparaíso	Quilpué	-	-	-	-	-	18	17	29	-	-	-	-	-		
Valparaíso	Puchuncaví	-	-	-	-	-	-	-	18	15	15	14	14	15	14	EMRP
Valparaíso	La Greda	-	-	-	-	18	15	14	16	13	17	15	14	16	15	EMRP
Valparaíso	Los Maitenes	-	-	-	-	13	12	14	18	13	14	13	11	12	12	EMRP
Valparaíso	Ventanas	-	-	-	-	17	15	19	17	14	15	16	14	16	15	
Valparaíso	Cuerpo de Bomberos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Valparaíso	San Pedro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	17		
Valparaíso	Centro Quintero	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	21		
Valparaíso	Loncura	-	-	-	-	-	-	-	16	15	16	-	16	15		
Valparaíso	Quintero	-	-	-	-	-	-	-	18	15	16	16	16	16	16	EMRP

Tabla 9: Percentil 98 de la norma diaria Zona Norte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). En Color amarillo estaciones en condición de Latencia. En Rojo estaciones en condición de Saturación.

Región	Estación	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	EMRP MP _{2,5}
Arica y Parinacota	Arica	-	-	-	-	-	25	21	18	19	22	17	18	19	
Tarapacá	Alto Hospicio	-	-	-	-	-	-	-	19	20	22	19	19	21	
Antofagasta	Club deportivo 23 de marzo	-	-	-	-	14	21	-	13	10	20	13	16	13	EMRP
Antofagasta	Colegio PVK	-	-	-	-	23	28	25	16	22	26	22	17	20	EMRP
Antofagasta	Estación centro (Calama)	-	-	-	-	18	19	15	14	13	13	10	10	7	EMRP
Antofagasta	Hospital del Cobre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	EMRP
Antofagasta	Sierra Gorda SCM	-	-	-	-	18	19	17	13	-	16	18	19	16	
Antofagasta	Bomberos	-	-	-	-	-	46	64	61	49	41	30	35	31	
Antofagasta	Antofagasta	-	-	-	-	-	27	24	20	21	19	23	19	24	
Antofagasta	Tres marías	-	-	-	37	-	32	24	25	25	24	-	22	13	
Atacama	Huasco- Poblacion 21 de mayo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	19	12	
Atacama	SM10 -EME F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	30	29	
Atacama	SM9 -EME M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	15	14	
Atacama	Copiapó	-	-	-	-	-	35	43	30	28	31	27	23	26	EMRP
Atacama	Huasco	-	-	-	-	-	-	26	20	18	20	18	15	19	EMRP
Coquimbo	La Serena	-	-	-	-	-	32	-	44	25	38	32	22	31	
Coquimbo	Coquimbo	-	-	-	-	-	31	27	26	25	28	22	19	25	
Coquimbo	Cuncumén	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	11	
Valparaíso	Viña del Mar	62	-	-	-	-	-	-	41	32	33	36	27	39	
Valparaíso	Valparaíso	-	-	-	-	-	32	39	34	34	35	28	27	35	
Valparaíso	Concón	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41	29	29	37	EMRP

Región	Estación	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	EMRP MP _{2,5}
Valparaíso	Quilpué	-	-	-	-	-	52	58	66	-	-	-	-	-	
Valparaíso	Puchuncaví	-	-	-	-	-	-	-	39	33	32	27	25	32	EMRP
Valparaíso	La Greda	-	-	-	-	37	31	32	35	31	42	30	28	41	EMRP
Valparaíso	Los Maitenes	-	-	-	-	26	25	34	36	27	27	23	20	24	EMRP
Valparaíso	Ventanas	-	-	-	-	36	30	44	36	31	30	27	24	35	
Valparaíso	Cuerpo de Bomberos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Valparaíso	San Pedro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	52	
Valparaíso	Centro Quintero	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46	55	
Valparaíso	Loncura	-	-	-	-	-	-	-	35	31	35	-	28	36	
Valparaíso	Quintero	-	-	-	-	-	-	-	44	32	32	31	33	34	EMRP

5.2.2 Región Metropolitana

El resumen de la Región Metropolitana se entrega en la Figura 7, como % del cumplimiento de la norma para el año 2021 (norma diaria) y para el período 2019-2021 (norma anual). En general todas las estaciones se encuentran en condición de saturación con excepción de la estación Las Condes que está en latencia (90% de la norma anual y diaria). Los niveles diarios son los que presentan mayor nivel de saturación, superando el 200% de la norma en las estaciones de Pudahuel y Cerro Navia.

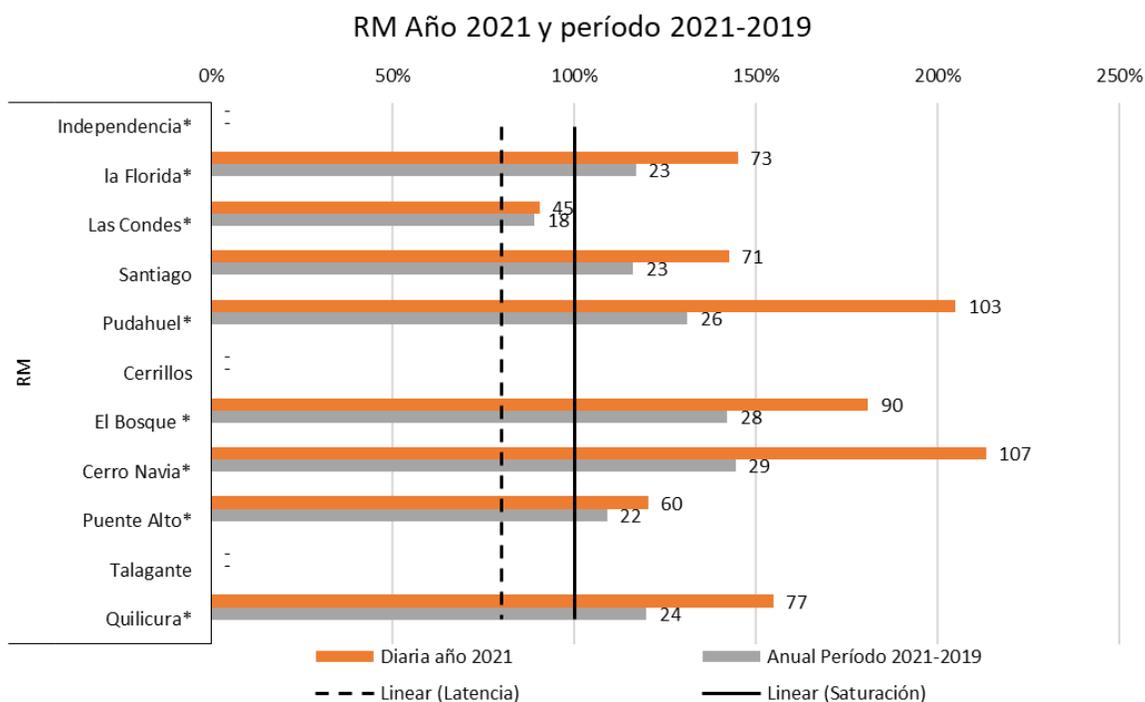


Figura 7: Cumplimiento de normas diaria y anual para $MP_{2,5}$ Región Metropolitana. El número sobre las barras es la concentración de $MP_{2,5}$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estaciones con asterisco (*) señalan cuales son EMRP para $MP_{2,5}$.

La evolución del promedio trianual y percentil 98 de la concentración de $MP_{2,5}$ en la Región Metropolitana se entrega en la Figura 8 y Figura 9, respectivamente. En la gráfica, el área naranja muestra el rango de valores que abarca el promedio trianual de todas las estaciones de monitoreo, es decir, el mínimo y máximo del promedio trianual de toda la Red MACAM. La línea negra representa el promedio de todas las estaciones de monitoreo. Esta representación gráfica permite visualizar cómo han variado las concentraciones de $MP_{2,5}$ a lo largo del tiempo y cómo se comparan con los valores mínimos y máximos observados. Se identifica en ambos casos una tendencia a la reducción.

Cabe mencionar que en la Red MACAM se implementó un cambio tecnológico en el monitoreo el año 2013. En los años anteriores, las mediciones se realizaban con equipos que no eran protocolo EPA/UE, y tuvieron que ser reemplazados para poder verificar el cumplimiento de la Norma a

partir del 2013. Análisis realizados en su momento incluyeron la intercomparación de estos equipos, encontrándose que el monitoreo previo al año 2013 tenía un sesgo sistemático hacia concentraciones menores. Para corregir lo anterior, los datos fueron ajustados en base análisis de regresión lineal, cuyo análisis se resume en el **ANEXO I: ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AIRE**. Para visualizar las tendencias reales de se utilizaron los datos ajustados de MP_{2,5}.

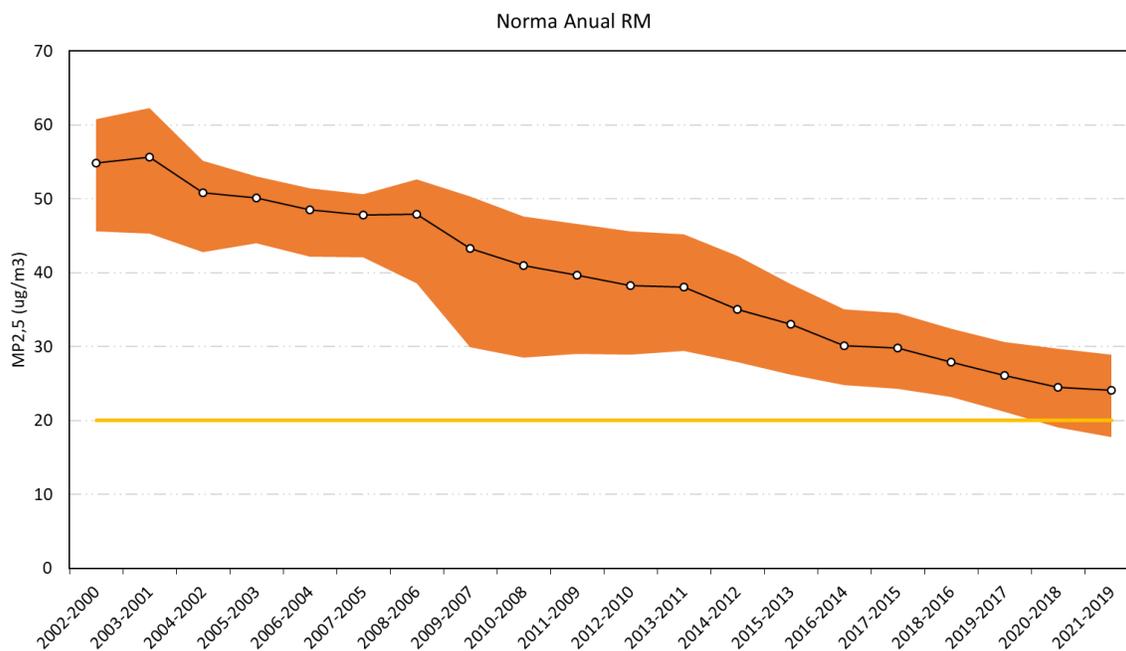


Figura 8: Evolución del promedio trianual de las concentraciones de MP_{2,5} para todas las estaciones de monitoreo de la R.M. Área naranja indica el rango de valores en donde se encuentran los promedios Trianales de todas las estaciones de monitoreo (valores mínimo y máximo del promedio trianual) y línea negra representa el promedio de todas las estaciones de monitoreo.

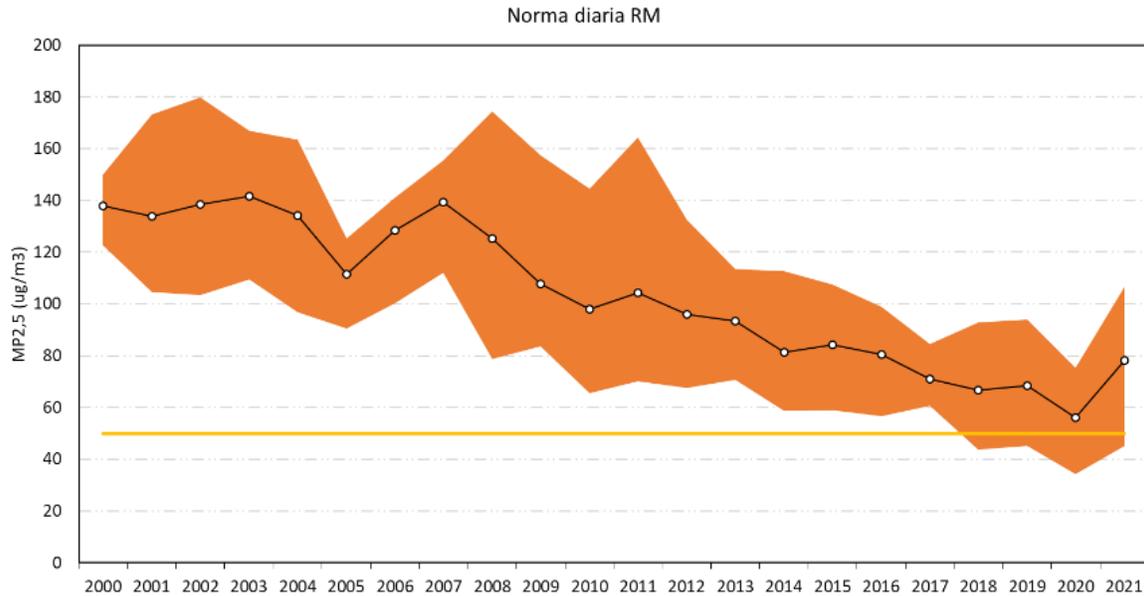


Figura 9: Evolución del Percentil 98 (P98) de las concentraciones de $MP_{2,5}$ para todas las estaciones de monitoreo de la R.M. Área naranja indica el rango de valores en donde se encuentran los valores de P98 de todas las estaciones de monitoreo (valores mínimo y máximo del promedio trianual) y línea negra representa el promedio de todas las estaciones de monitoreo.

Desde el año 1989 se realiza monitoreo de dicotómico en tres estaciones de la Red MACAM (Independencia, Parque O'Higgins y Las Condes), que son equipos que permiten separar la fracción fina y gruesa del material particulado mediante gravimetría en filtros. El análisis de las concentraciones de $MP_{2,5}$ que entregan estos equipos indican la misma tendencia de reducción de concentración observada en los equipamientos de monitoreo continuo presentada en los gráficos anteriores. Sin embargo, la tendencia muestra una menor intensidad, especialmente debido a los incrementos de concentración registrados durante 2017, 2018 y 2019 (Figura 10).

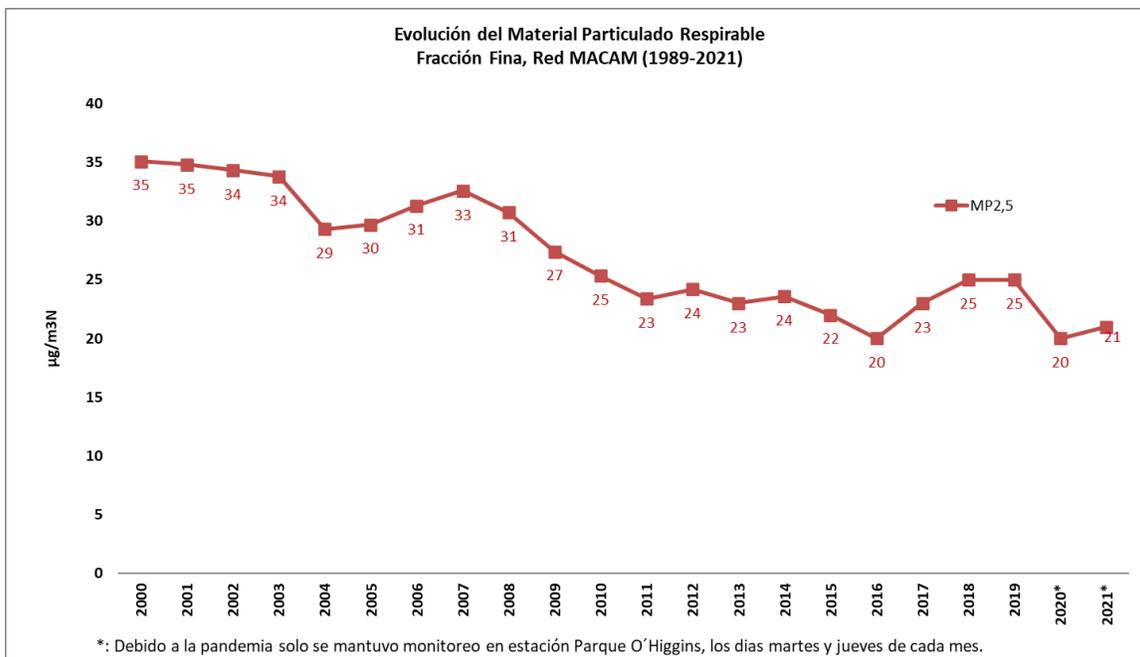


Figura 10: Evolución del Material Particulado Respirable fracción fina, de la R.M., equipos dicotómicos.

En la Tabla 10 y Tabla 11 se entrega el resumen del cálculo de la norma anual y percentil 98 de la Región Metropolitana. Se destaca que todas las estaciones se encuentran en condición de saturación por percentil 98. Para norma anual, todas las estaciones están en condición de saturación a excepción de Las Condes que se encuentra en condición de latencia. Cabe mencionar que estación de Independencia, Cerrillos y Talagante no tienen información suficiente para los últimos años (54%, 0% y 55%, respectivamente).

Tabla 10: Promedio Anual de MP_{2,5} en la Región Metropolitana (µg/m³).

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Promedio trianual del periodo 2019-2021	EMRP
Independencia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41	35	35	33	31	29	31	30	28	27	26	22	-		EMRP
la Florida*	52	65	47	50	54	49	51	50	52	43	37	37	36	35	29	30	29	27	25	25	21	24	23	EMRP
Las Condes**	46	50	41	45	42	44	40	42	34	37	31	31	30	30	23	25	26	22	22	20	15	18	18	EMRP
Santiago*	52	70	53	60	52	45	50	50	48	43	37	38	38	38	30	32	28	27	27	26	21	23	23	
Pudahuel*	53	75	55	57	53	48	52	51	54	45	43	42	41	37	29	34	32	37	26	27	24	28	26	EMRP
Cerrillos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43	46	50	39	41	37	37	31	-	-	25	27	-		EMRP
El Bosque *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	44	46	45	45	33	34	34	32	31	29	27	30	28	EMRP
Cerro Navia*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	45	47	45	40	33	34	33	30	31	30	28	29	29	EMRP
Puente Alto*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41	37	35	45	55	27	28	27	23	21	21	22	22	22	EMRP
Talagante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	27	30	29	28	-	30	25	27	21	21	-	-		
Quilicura*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	39	36	34	34	30	30	28	27	25	24	22	25	24	EMRP

(**) estaciones en condición de Latencia. (*) estaciones en condición de Saturación.

Tabla 11: Percentil 98 de $MP_{2,5}$ en la Región Metropolitana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Clasificación
Independencia*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	94	83	78	83	77	66	82	74	70	66	67	51	-	EMRP
la Florida*	129	123	119	134	128	109	134	138	118	93	81	86	84	83	75	78	78	71	59	64	49	73	EMRP
Las Condes**	123	105	104	109	97	90	100	112	79	84	66	70	68	71	59	59	57	61	44	45	34	45	EMRP
Santiago*	149	135	151	167	148	122	141	151	131	109	91	97	93	93	78	83	74	64	66	65	57	71	
Pudahuel*	150	173	180	155	164	125	138	156	174	130	125	150	130	111	101	106	91	80	80	91	69	103	EMRP
Cerrillos*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	104	106	115	94	95	86	95	89	-	-	74	58	-	EMRP
El Bosque*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	117	126	116	107	114	91	88	95	84	81	72	65	90	EMRP
Cerro Navia*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	157	144	164	132	112	113	107	99	82	93	94	75	107	EMRP
Puente Alto*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88	74	78	89	113	67	65	68	61	52	53	47	60	EMRP
Talagante*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	101	79	96	85	78	-	79	86	67	64	63	-	-	
Quilicura*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108	105	97	92	83	79	82	74	71	63	67	58	77	EMRP

(**) estaciones en condición de Latencia. (*) estaciones en condición de Saturación.

5.2.3 Concepción Metropolitano

El resumen del Concepción Metropolitano se entrega en la Figura 11 como porcentaje (%) del cumplimiento de la norma para el año 2021 (norma diaria) y para el período 2019-2021 (norma anual). En general, casi todas las estaciones se encuentran en condición de saturación con excepción de las estaciones de Kingston College, Cerro Merquín y Liceo Polivalente (que se encuentran en latencia), y ENAP y Laja que están bajo el nivel de latencia. Hay estaciones que no tienen información suficiente para el promedio trianual, pero de sus registros anteriores se puede constatar que estarían en condición de Saturación, como las estaciones de Coronel Norte,

Cabe mencionar que solo las estaciones de Kingston College, Punteras, Cerro Merquín, Balneario Curanilahue, Los Ángeles Oriente y 21 de Mayo están calificadas como EMRP. De ellas, 21 de Mayo presenta los niveles más elevados, 274% y 139% para norma diaria y anual, respectivamente.

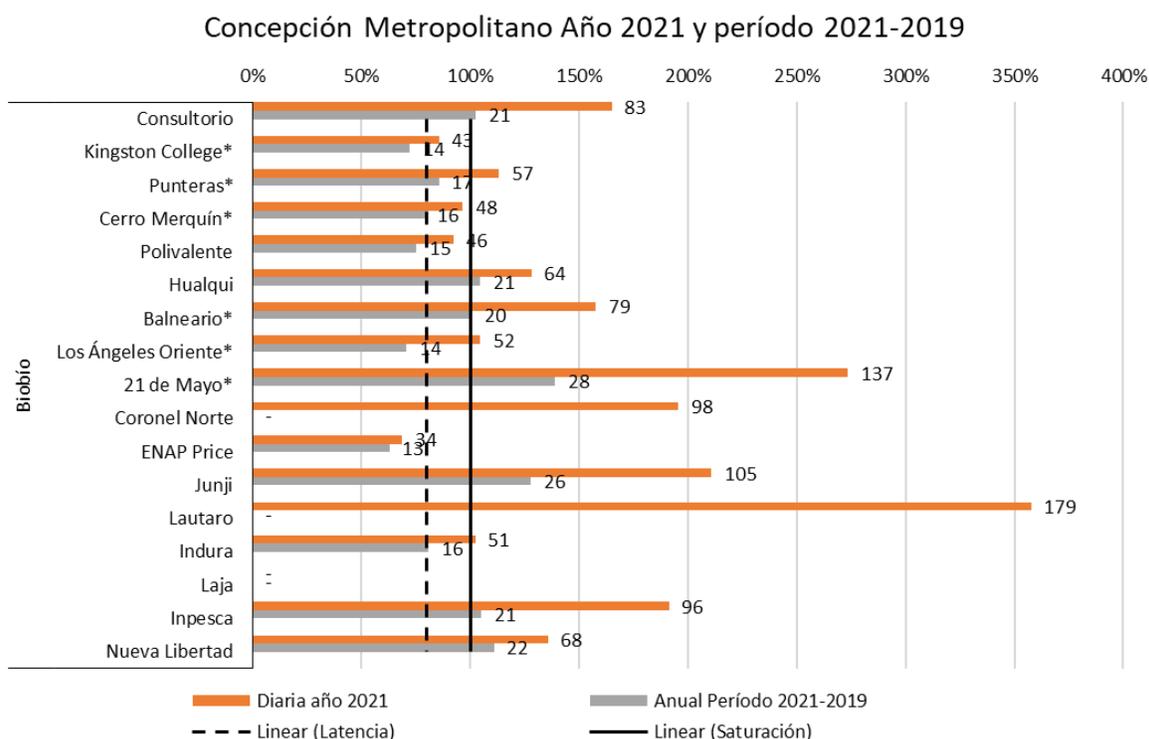


Figura 11: Cumplimiento de normas diaria y anual para $MP_{2,5}$ en el Concepción Metropolitano. El número sobre las barras es la concentración de $MP_{2,5}$ en $\mu g/m^3$. Estaciones con asterisco (*) señalan cuales son EMRP para $MP_{2,5}$

En relación al promedio anual y percentil 98 histórico de las estaciones del Concepción Metropolitano no se distingue una tendencia clara a nivel regional (Figura 12, Figura 13). El incremento de la dispersión del área se debe a que entraron más estaciones en la red.

Concepción Metropolitano Promedio anual válido

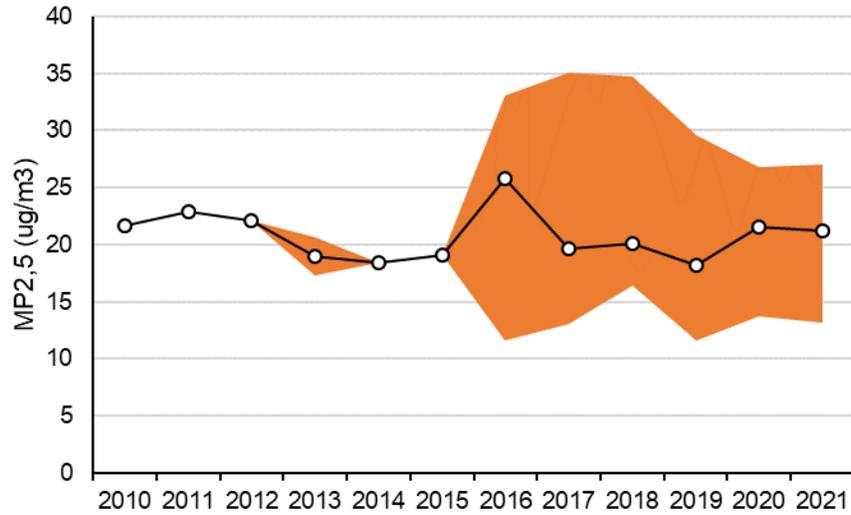


Figura 12: Evolución del Promedio Anual concentraciones de $MP_{2,5}$ en todas las estaciones de monitoreo de Concepción Metropolitano. Área naranja indica rango de concentración (mínimo y máximo) y línea negra representa el promedio.

Concepción Metropolitano Percentil 98

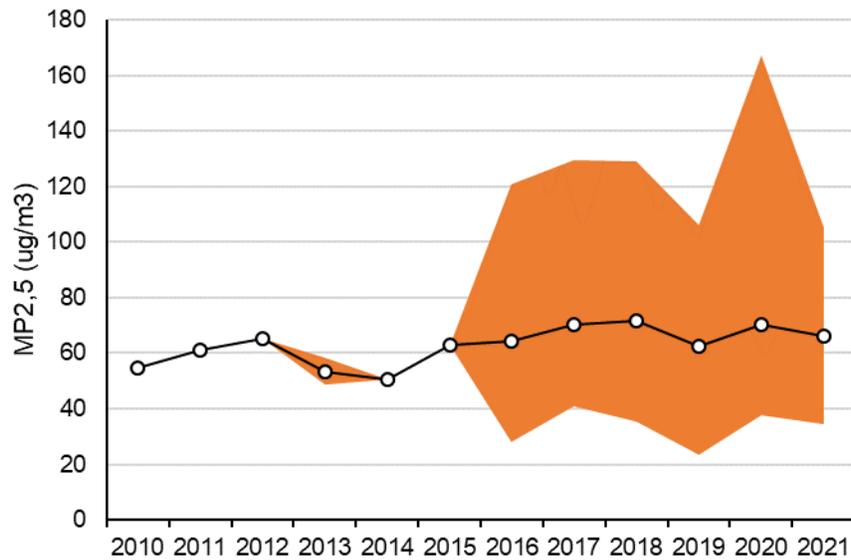


Figura 13: Evolución del Percentil 98 de concentraciones de $MP_{2,5}$ en todas las estaciones de monitoreo de Concepción Metropolitano. Área naranja indica rango de concentración (mínimo y máximo) y línea negra representa el promedio.

Tabla 12: Promedio Anual de MP_{2,5} en Concepción Metropolitano.

Estación													Promedio trianual del periodo 2019-2021	EMRP MP _{2,5}
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021		
Consultorio*	-	-	-	-	-	-	-	20	23	21	20		21	21
Kingston College	-	-	-	-	-	-	30	16	19	15	14		15	14
Punteras**	-	-	-	-	-	-	12	17	16	17	17		17	17
Cerro Merquín	-	-	-	-	-	-	18	20	18	12	18		18	16
Polivalente	-	-	-	-	-	-	-	13	21	15	14		16	15
Hualqui*	-	-	-	-	-	-	-	21	20	22	19		22	21
Balneario**	-	-	-	-	-	-	-	35	26	22	17		21	20
Los Ángeles Oriente	-	-	-	-	27	34	-	-	23	15	14		13	14
21 de Mayo*	-	-	48	30	27	29	33	28	35	30	27		27	28
Coronel Norte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37		24	
ENAP Price	-	-	-	17	-	-	-	15	13	13	12		13	13
Junji*	-	-	-	-	-	-	-	27	24	25	26		26	26
Lautaro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47		45	
Indura	-	-	-	-	-	-	-	20	14	17	16		16	16
Laja	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Inpesca*	-	-	-	-	-	-	46	25	28	20	21		22	21
Nueva Libertad*	22	23	22	21	18	19	22	21	24	23	21		23	22

(**) estaciones en condición de Latencia. (*) estaciones en condición de Saturación.

Tabla 13: Percentil 98 de MP_{2,5} en Concepción Metropolitano.

Estación	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	EMRP MP _{2,5}
Consultorio*	-	-	-	-	-	-	-	92	104	82	81	83	
Kingston College**	-	-	-	-	-	-	56	48	54	40	38	43	EMRP
Punteras*	-	-	-	-	-	-	28	53	49	66	51	57	EMRP
Cerro Merquín**	-	-	-	-	-	-	45	49	35	23	50	48	EMRP
Polivalente**	-	-	-	-	-	-	-	41	64	47	40	46	
Hualqui*	-	-	-	-	-	-	-	61	65	65	54	64	
Balneario*	-	-	-	-	-	-	-	164	109	77	55	79	EMRP
Los Ángeles Oriente*	-	-	-	-	61	72	-	-	102	69	46	52	EMRP
21 de Mayo*	-	-	174	134	140	122	172	124	189	140	122	137	EMRP
Coronel Norte*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	168	98	
ENAP Price	-	-	-	49	-	-	-	43	38	39	38	34	
Junji*	-	-	-	-	-	-	-	130	105	106	107	105	
Lautaro*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	172	179	
Indura*	-	-	-	-	-	-	-	64	58	57	52	51	
Laja*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Inpesca*	-	-	-	-	-	-	121	123	129	96	104	96	
Nueva Libertad*	55	61	65	58	50	63	73	70	88	67	63	68	

(**) estaciones en condición de Latencia. (*) estaciones en condición de Saturación.

5.2.4 Zona Sur

El resumen de la zona Sur se entrega en la Figura 14 cómo porcentaje (%) del cumplimiento de la norma para el año 2021 (norma diaria) y para el período 2019-2021 (norma anual). Todas las estaciones se encuentran en condición de saturación, excepto las estaciones de Valdivia I (en los Ríos) y Punta Arenas (en Magallanes). Cabe mencionar que todas las estaciones presentadas tienen calificación EMRP, exceptuadas Purén (Ñuble), Valdivia I y La Unión (Los Ríos) y Punta Arenas (Magallanes).

En particular, las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II, presentan los niveles más altos de Chile, aproximándose al 500% de la norma diaria y al 180% de la norma anual.

En general, la mayor parte de las estaciones de la zona Sur muestran una tendencia a la disminución de concentración tanto en el promedio anual (Tabla 14) como en el percentil 98 (Tabla 15), producto de las medidas de alcance nacional y local que se han implementado en la última década, las que se describen en el capítulo 6 Efecto de los Planes. Todas estas estaciones comparten un problema común que tiene relación con la quema de leña residencial en invierno para calefacción.

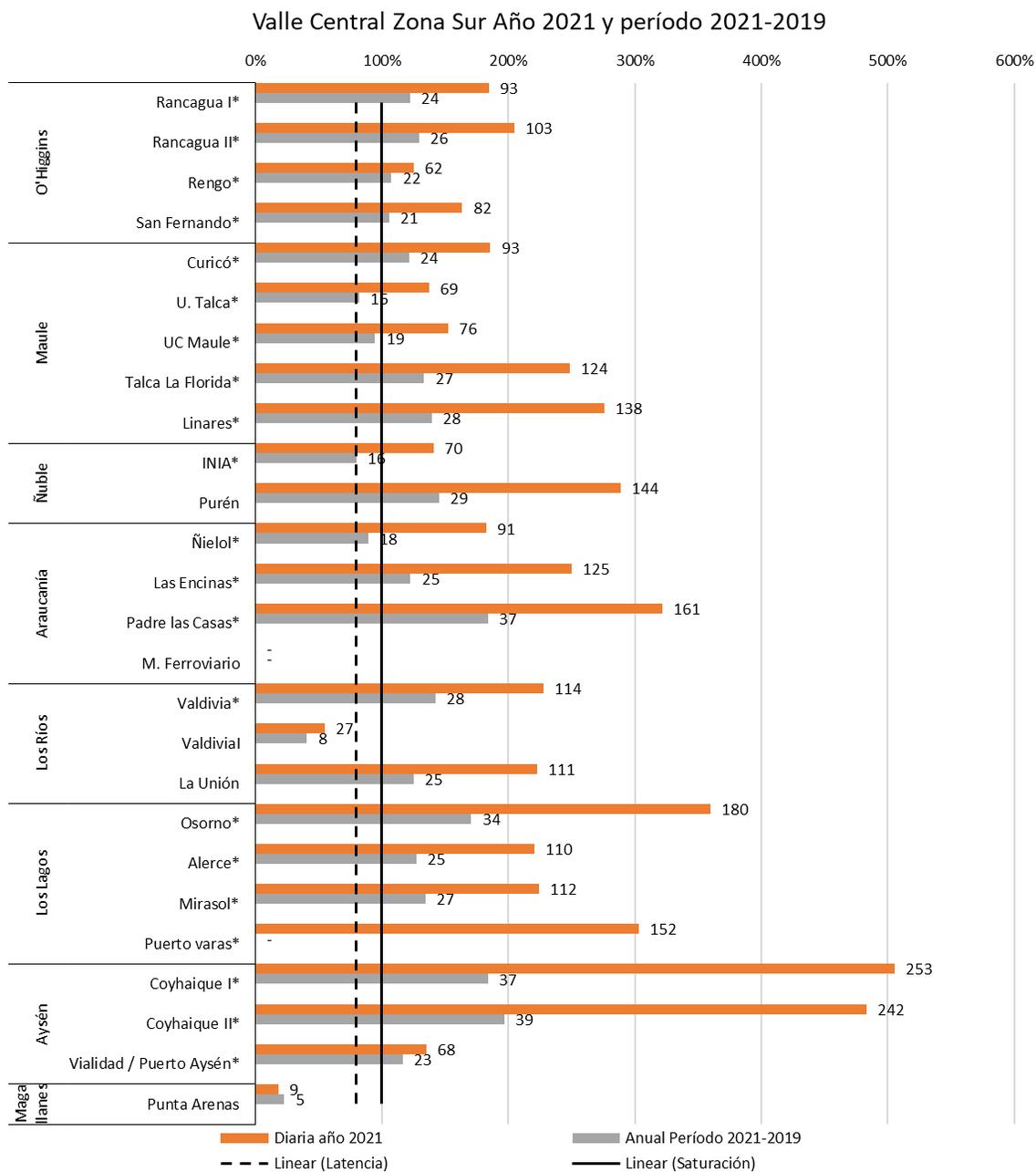


Figura 14: Cumplimiento de normas diaria y anual para $MP_{2,5}$ en la Zona Sur (Valle Central). El número sobre las barras es la concentración de $MP_{2,5}$ en $\mu g/m^3$. Estaciones con asterisco (*) señalan cuales son EMRP para $MP_{2,5}$.

Tabla 14: Promedio Anual de MP_{2,5} en la Zona Sur.

Región	Estación	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Promedio trianual del periodo 2019-2021	EMRP
O'Higgins	Rancagua I*	60	-	51	42	43	28	25	24	23	21	24	23	24	EMRP
O'Higgins	Rancagua II*	-	-	-	-	-	32	42	31	26	28	27	25	26	EMRP
O'Higgins	Rengo*	-	-	-	-	-	-	-	-	21	22	23	22	22	EMRP
O'Higgins	San Fernando*	-	-	-	-	-	-	-	36	21	18	20	21	21	EMRP
Maule	Curicó*	-	-	-	-	37	27	25	30	25	23	24	23	24	EMRP
Maule	U. Talca	-	-	-	-	34	18	19	19	16	17	17	15	16	EMRP
Maule	UC Maule**	-	-	-	-	34	22	22	20	20	20	20	16	19	EMRP
Maule	Talca La Florida*	-	-	-	-	52	33	32	37	24	29	24	26	27	EMRP
Maule	Linares*	-	-	-	-	-	-	-	32	28	30	28	27	28	EMRP
Ñuble	INIA	-	-	-	-	-	23	29	19	-	20	15	13	16	EMRP
Ñuble	Purén*	-	-	-	52	32	31	32	35	34	37	32	26	29	
Araucanía	Ñielol**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21	16	19	18	EMRP
Araucanía	Las Encinas*	43	-	45	73	46	31	30	33	27	34	23	25	25	EMRP
Araucanía	Padre las Casas*	-	-	-	71	53	35	48	49	40	49	37	36	37	EMRP
Araucanía	M. Ferroviario	58	-	64	38	47	30	27	36	-	-	-	-		
Los Ríos	Valdivia*	40	69	53	36	36	29	38	40	33	37	29	29	28	EMRP
Los Ríos	Valdivial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	8	8	
Los Ríos	La Unión*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	24	25	25	
Los Lagos	Osorno*	36	-	-	65	59	34	33	46	36	43	33	34	34	EMRP
Los Lagos	Alerce*	-	-	-	-	-	-	-	-	33	27	27	25	25	EMRP
Los Lagos	Mirasol*	-	-	-	-	-	-	-	30	30	23	29	28	27	EMRP
Los Lagos	Puerto varas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50		EMRP
Aysén	Coyhaique I*	-	-	-	-	68	62	52	67	45	51	39	38	37	EMRP
Aysén	Coyhaique II*	-	-	-	-	-	61	51	65	50	49	42	39	39	EMRP

Región	Estación	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Promedio trianual del periodo 2019-2021	EMRP
Aysén	Vialidad / Puerto Aysén*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39	24	23	23	EMRP
Magallanes	Punta Arenas	-	-	-	-	-	5	5	6	5	4	5	5	5	

(**) estaciones en condición de Latencia. (*) estaciones en condición de Saturación.

Tabla 15: Percentil 98 de MP_{2,5} en la Zona Sur.

Región	Estación	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	EMRP
O'Higgins	Rancagua I*	139	-	170	110	115	98	75	89	73	76	82	75	EMRP
O'Higgins	Rancagua II*	-	-	-	-	-	130	97	110	83	99	87	83	EMRP
O'Higgins	Rengo*	-	-	-	-	-	-	-	-	67	81	84	80	EMRP
O'Higgins	San Fernando*	-	-	-	-	-	-	-	101	70	64	72	70	EMRP
Maule	Curicó*	-	-	-	-	121	89	74	99	91	111	80	75	EMRP
Maule	U. Talca*	-	-	-	-	89	62	69	69	84	85	65	64	EMRP
Maule	UC Maule*	-	-	-	-	88	71	77	69	84	79	63	67	EMRP
Maule	Talca La Florida*	-	-	-	-	179	135	130	115	117	140	99	117	EMRP
Maule	Linares*	-	-	-	-	-	-	-	118	141	143	108	108	EMRP
Ñuble	INIA**	-	-	-	-	-	75	91	45	-	77	43	46	EMRP
Ñuble	Purén*	-	-	-	185	151	155	145	162	164	195	152	117	
Araucanía	Ñielol*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116	79	78	EMRP
Araucanía	Las Encinas*	199	-	183	215	159	154	132	143	159	149	106	99	EMRP
Araucanía	Padre las Casas*	-	-	-	198	201	160	171	190	226	233	158	149	EMRP
Araucanía	M. Ferroviario*	180	-	174	191	164	148	122	164	-	-	-	-	
Los Ríos	Valdivia*	172	170	184	141	127	101	130	146	128	150	133	112	EMRP
Los Ríos	Valdivial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	28	
Los Ríos	La Unión*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108	93	91	
Los Lagos	Osorno*	183	-	-	316	206	183	174	220	184	191	167	170	EMRP
Los Lagos	Alerce*	-	-	-	-	-	-	-	-	97	154	116	110	EMRP
Los Lagos	Mirasol*	-	-	-	-	-	-	-	107	165	98	156	133	EMRP
Los Lagos	Puerto Varas*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	171	EMRP
Aysén	Coyhaique I*	-	-	-	-	226	297	219	378	223	334	174	195	EMRP
Aysén	Coyhaique II*	-	-	-	-	-	196	168	324	217	286	175	179	EMRP
Aysén	Vialidad / Puerto Aysén*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93	71	72	EMRP
Magallanes	Punta Arenas	-	-	-	-	-	13	10	13	14	10	10	11	

(**) estaciones en condición de Latencia. (*) estaciones en condición de Saturación.

5.3 Análisis de Tendencias y perfiles de concentraciones

Comprender el comportamiento de la contaminación a nivel diario, semanal y mensual, permite interpretar de mejor forma las variaciones en los niveles de $MP_{2,5}$. Para tener una mejor representación de los ciclos diarios, semanal y mensual, se elaboraron las gráficas siguientes utilizando toda la información disponible de las estaciones, salvo en algunos casos en donde se indique lo contrario. Cabe recordar que este análisis incluye estaciones públicas y privadas, independiente si tienen o no clasificación EMRP. En el **ANEXO I: ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AIRE** se entrega el detalle de cada una de las estaciones.

En general se pueden diferenciar diferentes tipos de perfil temporal en la concentración de $MP_{2,5}$ resumidas a continuación:

- Estaciones del sector norte de país ubicadas al interior. Se caracterizan por tener bajas concentraciones de $MP_{2,5}$ con incrementos en invierno con un pronunciado efecto de las emisiones del tráfico vehicular y de los factores meteorológicos en el perfil diario.
- Estaciones del sector centro-sur del país ubicados en el valle central: estas estaciones se caracterizan por tener un incremento sustantivo de concentración en los meses de invierno con respecto a los meses de verano, ocasionados por un incremento en las emisiones de quema de leña para calefacción y empeoramiento de las condiciones de ventilación. El perfil diario está modulado principalmente por incrementos sustantivos durante horas de la noche donde hay sinergia en ambos factores (mayor calefacción y condiciones de menor dispersión atmosférica).

Estaciones del sector zonas emplazadas en el sector de costa de Chile, destacándose Tocopilla, Antofagasta, Valparaíso y Concepción Metropolitano. Estas estaciones presentan concentraciones más bajas que las del valle central, con perfiles promedios diarios significativamente diferentes a las otras estaciones, que están modulados preferentemente por fuentes emisoras industriales y por el régimen de vientos costeros. El análisis de tendencias se considera esencial para interpretar la evolución de los niveles de $MP_{2,5}$ en periodos más extensos (años o décadas). Este análisis se realiza utilizando un modelo desarrollado el año 2003¹⁴ para evaluar el Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana e incorpora los parámetros de calidad del aire y meteorológicos, de forma tal de comprender el efecto de las acciones implementadas.

En el **ANEXO I: ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AIRE** se describe el procedimiento estadístico y en esta sección solo se incluye el análisis de resultados. Siguiendo la estructura del capítulo anterior, los gráficos se han agrupado según zona Norte, Zona Sur, Concepción Metropolitano y Región

¹⁴ Sax, S.N., Koutrakis, P., Rudolph, P.A.R., Cereceda-Balic, F., Gramsch, E., Oyola, P., 2007. Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003. Journal of the Air & Waste Management Association 57, 845–855.

Metropolitana para facilitar la comparación. En esta sección del informe se hace una descripción de las tendencias, mientras que en el siguiente capítulo se hace una comparación con el estado de implementación de los planes.

Cabe mencionar que los valores FICs¹⁵ son índices relativos, no absolutos. Es decir, los valores de FIC que entrega el modelo son valores relativos a niveles de referencia definidos a priori durante el análisis de regresión. Por lo tanto, los FIC se interpretan como aumentos o disminuciones de la concentración atribuido a la variación de una variable explicativa, respecto del nivel de referencia definido. En este sentido, el valor 1 (último de cada gráfico) corresponde al valor de referencia, y el resto de los valores se interpreta como nivel de aumento respecto del valor de referencia.

En la Figura 15 se entrega la información de tendencias para la zona Norte, en donde se observa que no es posible visualizar tendencia clara. Estas zonas no tienen plan de descontaminación vigente, o bien tienen planes de descontaminación con poco tiempo de implementación como el caso de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (Región de Valparaíso). Por lo tanto, es esperable no identificar alguna tendencia definida.

¹⁵ Factor de Impacto por Concentración (FIC). Son índices relativos, no absolutos. Es decir, los valores de FIC que entrega el modelo son valores relativos a niveles de referencia definidos a priori durante el análisis de regresión. Por lo tanto, los FIC se interpretan como aumentos o disminuciones de la concentración atribuido a la variación de una variable explicativa, respecto del nivel de referencia definido. Los FICs se obtienen mediante la aplicación de regresiones multivariadas usando los datos continuos de MP_{2,5} en función de las variables meteorológicas (humedad, temperatura y magnitud de velocidad del viento), para cada una de las estaciones de monitoreo que tenían información.

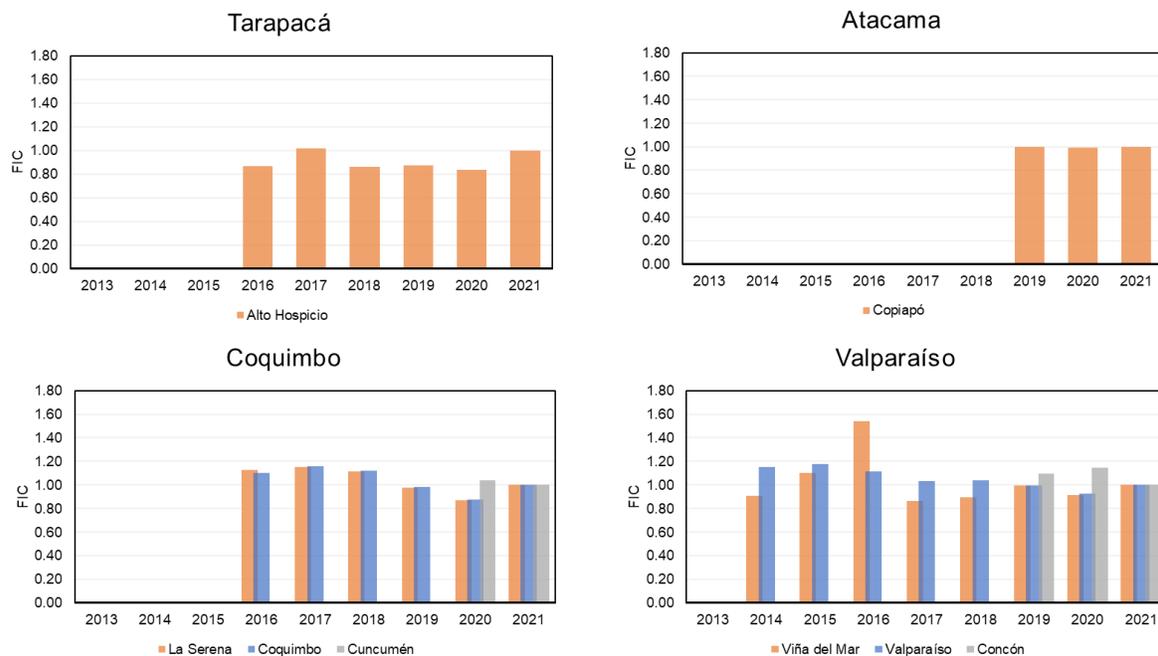


Figura 15: Tendencias en Regiones Zona Norte

En la Figura 16 se entrega la información de tendencias para la zona Sur. En casi todas las regiones se puede observar una tendencia a la disminución de concentración. Otros casos como el de Curicó, Talca y Maule y Osorno han mostrado una estabilización de los impactos en los últimos 3 años. Destacan las tendencias a la disminución de las estaciones en Coyhaique, Osorno, Valdivia.

La zona del Concepción Metropolitano tampoco muestra una tendencia clara (Figura 17). La única que puede ilustrar alguna tendencia es la de Kingston College, que tiende a ser a la disminución, con excepción del último año que se registra un aumento.

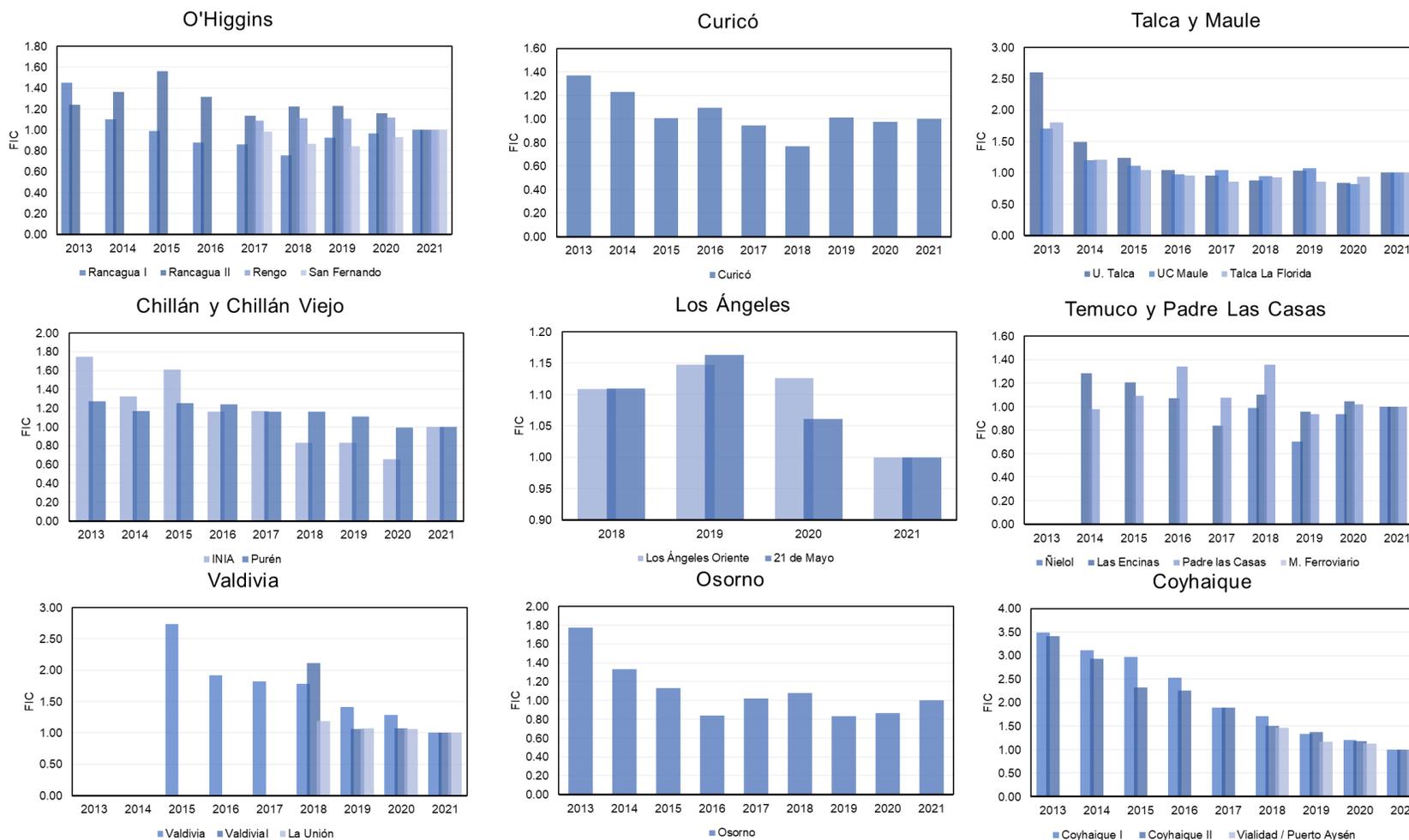


Figura 16: Tendencias en Regiones Zona Sur. *Región de la Araucanía tiene datos meteorológicos hasta el año 2019.

Concepción Metropolitano

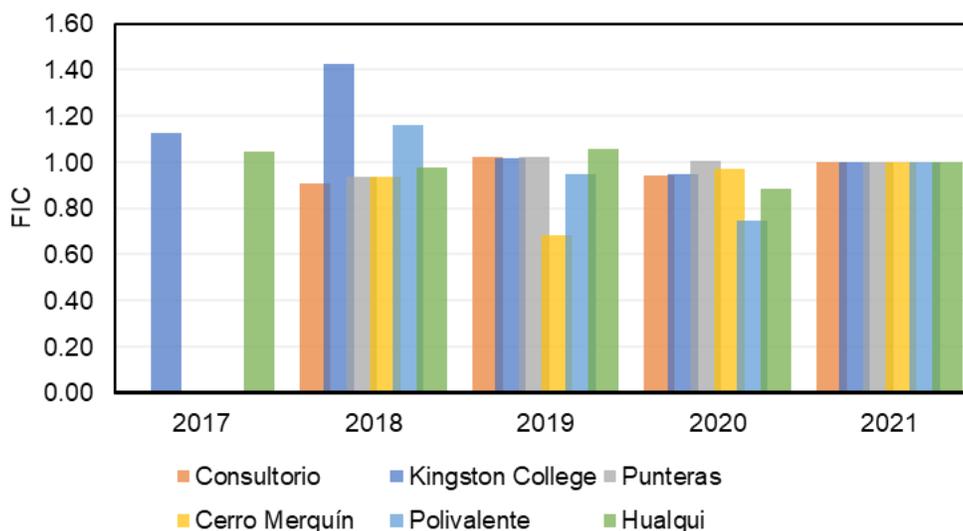


Figura 17: Tendencias en Concepción Metropolitano

En la Figura 18 se entrega el análisis de FICs para el efecto mensual y el efecto semanal agrupado por zona. Para facilitar el análisis, se han agrupado todos los valores FICs de las regiones y dividido por zona Norte, Zona Sur y Concepción Metropolitano¹⁶. Los FICs se muestran como diagramas de cajas, el valor del mes de enero corresponde al mes de referencia (FIC_{enero}=1). Los FICs de la zona Sur son los que más aumentan con una distribución que va desde 2 a 10 veces las concentraciones durante los meses de invierno, con relación al verano. Las estaciones del Concepción Metropolitano presentan incrementos significativos, pero en menor magnitud a las que muestran las estaciones del sector sur (un incremento de 1.5 a 3 veces aproximadamente). En la zona norte los incrementos en invierno son más leves, reflejado principalmente por los menores impactos asociados a las emisiones residenciales para calefacción.

Al observar la distribución de los FICs semanales no se identifican diferencias significativas entre la Zona Sur, Zona Norte y el Concepción Metropolitano; todos tienden a mostrar una reducción del impacto en el día Domingo. En la zona norte la disminución parece ser más atenuada que en la Zona Sur y el Concepción Metropolitano, lo que indica que la fuerza del impacto de las fuentes emisoras tienden a tener mayor protagonismo en las estaciones del sur.

¹⁶ Debido a que prácticamente todas las estaciones del sector Sur (Valle central) tienen un comportamiento semanal y anual se decidió utilizar gráficos de caja, de otra forma hubiera sido muy repetitivo en análisis por cada una de ellas. Lo mismo ocurre con las estaciones de la zona norte.

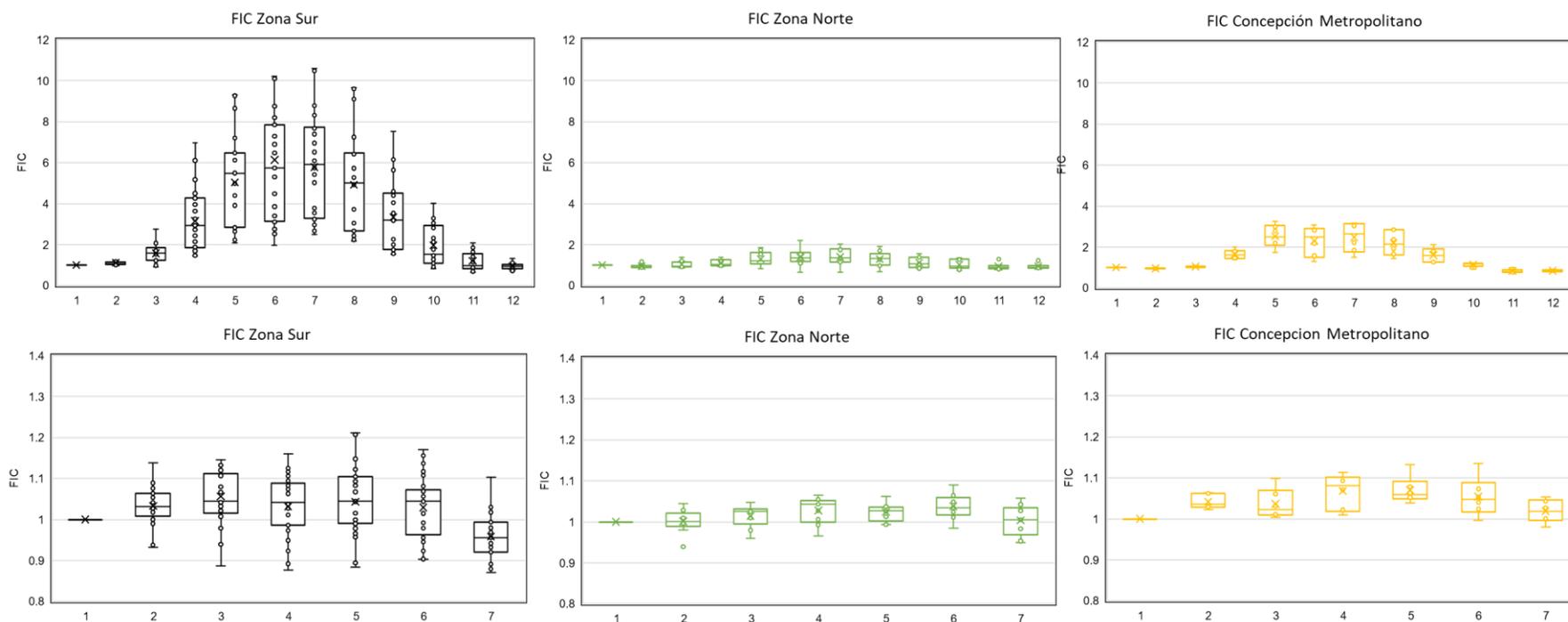


Figura 18: Efecto Mes y Semana Zona Norte, Centro, y Concepción Metropolitana. Gráficos superiores indican efecto mes tomando como referencia el mes de enero (valor 1 en eje X). Gráficos inferiores indican efecto semanal tomando como referencia el día Lunes (valor 1 en el eje x). Se presentan gráficos de caja. Se muestran los puntos internos de la distribución, la media y promedio de cada serie.

En la Figura 19 se entrega el efecto meteorológico, identificado como el impacto relativo de la velocidad del viento, temperatura y humedad relativa en las concentraciones de $MP_{2,5}$ ¹⁷ para todos los grupos, con la finalidad de tener una visión general de ellas. De acuerdo a la selección de variables, la velocidad del viento es el parámetro que más afecta a los impactos por concentración, y es particularmente importante en las estaciones de la zona sur. Los mayores impactos por concentración se dan a velocidades de viento más bajas, ya que hay menos posibilidad de dispersión de contaminantes atmosféricos. Además, bajas velocidades de viento se relacionan en general con períodos de alta estabilidad atmosférica (capa de mezcla reducida, viento cercano a calmas). El FIC va disminuyendo en la medida que aumenta la velocidad del viento, pero esta disminución es mayor en las estaciones de la zona norte (disminución de un 50% en promedio), seguido del Concepción Metropolitano (disminución de un 40% en promedio) y por la zona norte (disminución de algo más de un 20%).

Los otros parámetros meteorológicos tienen un impacto significativamente menor al que se observa con la velocidad del viento, y tiende a ser más aleatorio entre las estaciones, esto es en algunos casos hacia un aumento de los impactos en la concentración y en otros hacia la disminución.

¹⁷ Cabe mencionar que esta metodología utiliza variables meteorológicas tratadas de una forma tal de identificar efectos relativos en términos generales, buscando simplificar la complejidad de las variables meteorológicas mediante un análisis de regresión multivariado.

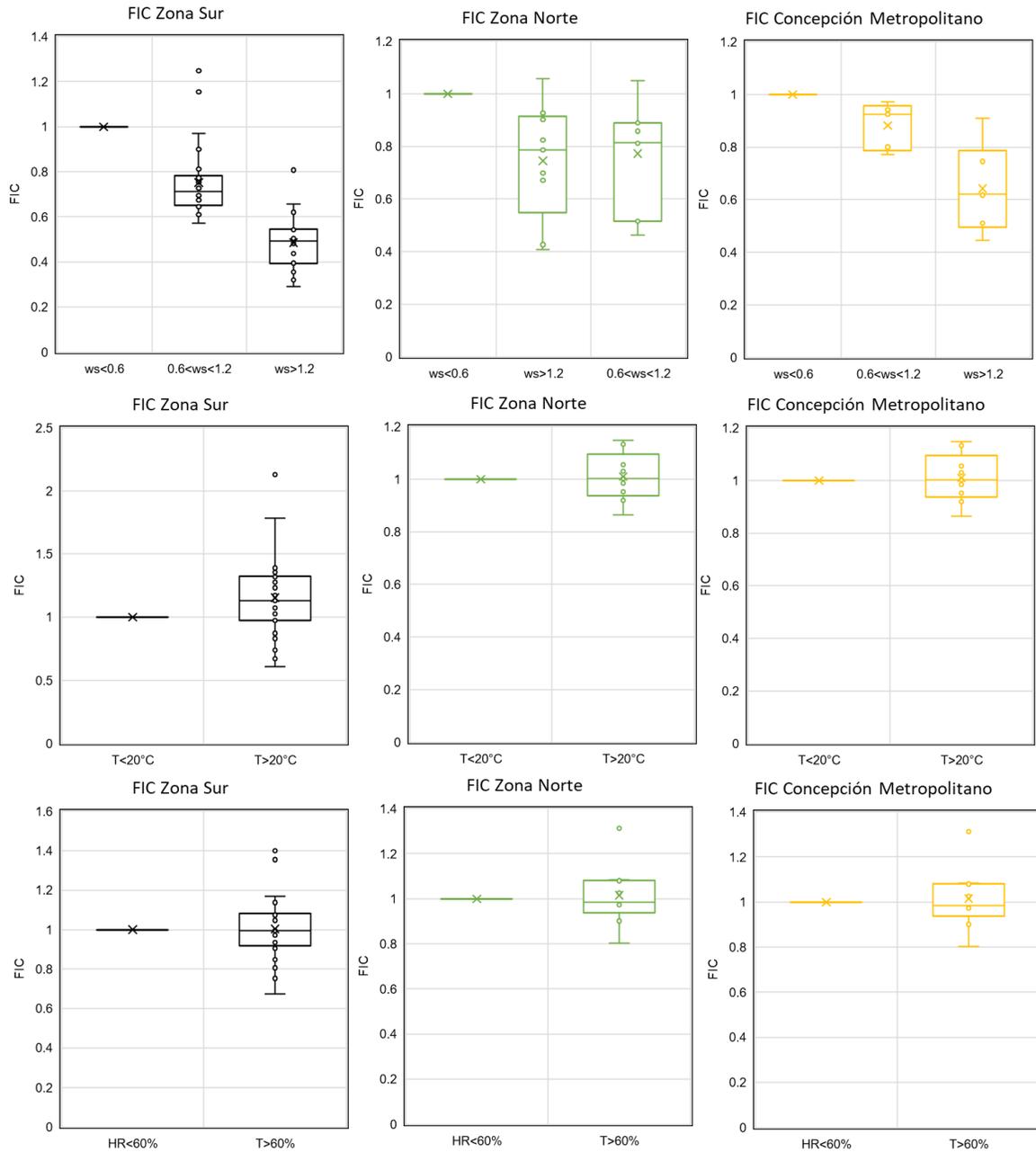


Figura 19: Efecto meteorológico Zona Norte, Centro, y Concepción Metropolitana. Gráficos superiores corresponden a FIC de Velocidad del viento. Gráficos del medio corresponden a FIC de temperatura. Gráficos inferiores corresponden a FIC de Humedad Relativa. Se presentan gráficos de caja. Se muestran los puntos internos de la distribución, la media y promedio de cada serie.

Finalmente, en la Figura 20 se entrega el análisis de FICs para las estaciones de la RM. En base al efecto año, es posible observar una disminución en todas las estaciones de monitoreo, con menor magnitud en la estación de Independencia. Los valores de FIC parten en 1 en el año 2013 (año de referencia) y bajan a valores que van entre 0,4 (Estación Puente Alto) y 0,75 (Independencia).

Durante los meses fríos se observan valores FICs mayores, hasta 3 veces más que los impactos reflejados en verano. El mayor incremento de los impactos durante los meses de invierno se manifiesta principalmente en las estaciones de Talagante y Pudahuel, seguido de Cerro Navia y Cerrillos.

Los FICs tienden a mostrar un incremento gradual durante la semana para luego bajar significativamente el domingo. Este fenómeno podría atribuirse en parte, a la acumulación o mayor emisión de contaminantes producto del funcionamiento de la ciudad durante la semana. Al igual que en las otras estaciones, y de acuerdo a los parámetros seleccionados, la velocidad del viento cercana a la calma sería la variable meteorológica que más influiría en los impactos por concentración.

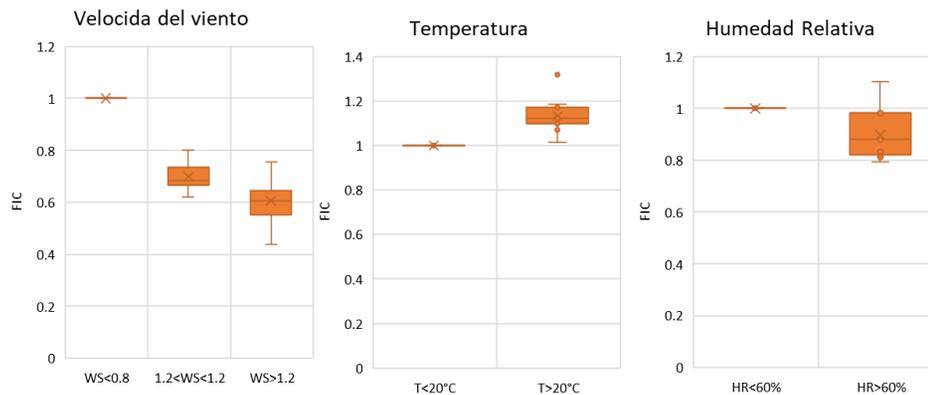
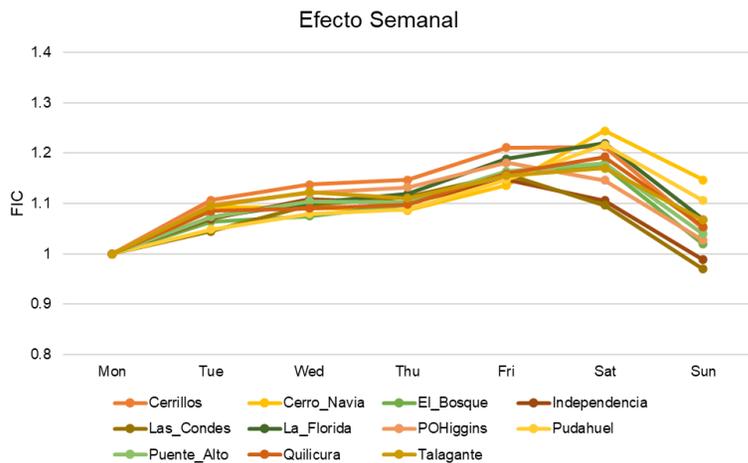
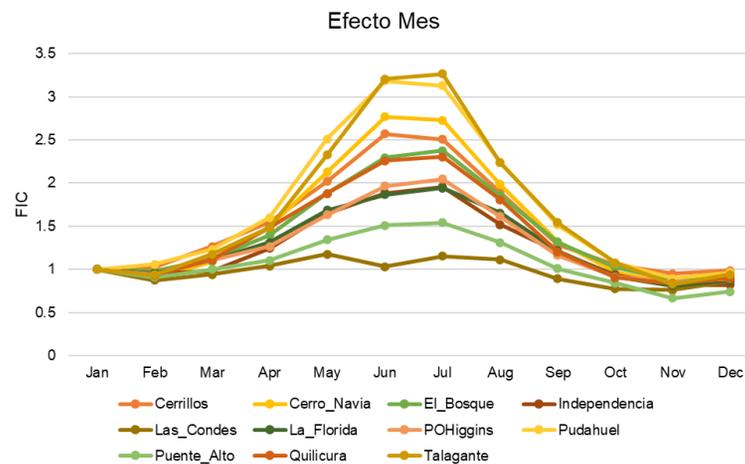
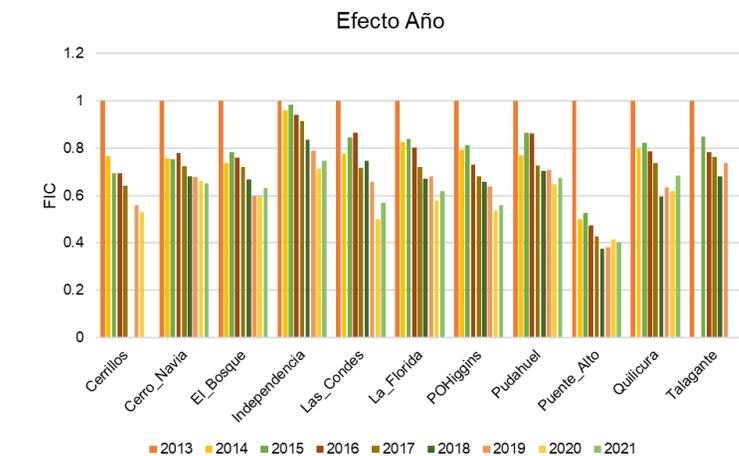


Figura 20: Tendencias FICs para las estaciones de la RM

6 Efecto de los Planes

Desde la publicación de la norma primaria para $MP_{2,5}$ en 2011 se inició un proceso de implementación y fortalecimiento de las redes de monitoreo para este contaminante. Es por esta razón que pocas ciudades cuentan con datos previos a esta fecha. Por otro lado, se inició la declaración de zonas latentes y saturadas, para luego elaborar los planes de prevención/descontaminación según el caso. En la siguiente tabla se entrega un resumen de los planes que se analizaron en este apartado:

Tabla 16: Planes de Descontaminación analizados.

Zona	Año de publicación	1er año de implementación	Información AGIES
CQP (DS 105/2018)	2019	2020	Sí
Región Metropolitana (DS 31/2016)	2017	2018	Sí
O´Higgins (DS 15/2013)	2013	2014	Sí
Curicó (DS 44/2017)	2019	2020	Sí
Talca-Maule (DS 49/2015)	2016	2017	Sí
Chillán-Chillán Viejo (DS 48/2015)	2016	2017	Sí
Concepción Metropolitano (DS 6/2018)	2019	2020	No
Los Ángeles (DS 4/2017)	2019	2020	Sí
Temuco-P Las Casas (DS 8/2015)	2015	2016	No
Valdivia (DS 25/2016)	2017	2018	Sí
Osorno (DS 47/2015)	2016	2017	Sí
Coyhaique (DS 7/2018)	2019	2020	Sí

Considerando el alcance estratégico del presente estudio, cuya finalidad es evaluar el efecto general que ha tenido la implementación de la norma $MP_{2,5}$, el análisis del efecto de los planes se realizó sobre la base de:

- Comparación de la línea base para $MP_{2,5}$ proyectada con el efecto esperado del Plan, ambos datos entregados por los AGIES respectivos, todo lo cual será contrastado con los niveles reales observados.
- Adicionalmente, se analizaron las principales medidas comprometidas en los planes respectivos, de forma tal de entregar una idea general del avance de las mismas.

Cabe mencionar que la Superintendencia del Medio Ambiente tiene por obligación la elaboración de reportes detallados del cumplimiento de los planes de descontaminación, razón por la cual el enfoque del presente informe ha sido un análisis estratégico del nivel de cumplimiento transversal. Indicar además que, para la Región Metropolitana, sólo se cuenta con el informe de cumplimiento del año 2019, que incluye el periodo 2018-2019 (elaborado en enero de 2023).

Tabla 17: Informes de Estado de Avance en la Implementación de Planes de Descontaminación

Decreto N°	Año	Organismo	Informe Estado de Avance	2017	2018	2019	2020	2021	2022	TOTAL
105	2018	MMA	PPDA Concón, Quintero, Puchuncaví			1	1	1		3
31	2016	MMA	PPDA Región Metropolitana			1				1
15	2013	MMA	PDA Valle Central de O'Higgins	1	1	1	1	1		5
44	2017	MMA	PDA Curicó				1	1		2
49	2015	MMA	PDA Talca Maule	1	1	1	1	1		5
48	2015	MMA	PPDA Chillán Chillán Viejo	1	1	1	1	1		5
4	2017	MMA	PDA Los Angeles				1	1		2
6	2018	MMA	PDA Concepción Metropolitano				1			1
25	2016	MMA	PDA Valdivia		1	1	1	1		4
8	2015	MMA	PDA Temuco-Padre Las Casas	1	1	1	1	1		5
47	2015	MMA	PDA Osorno	1	1	1	1	1		5
46	2015	MMA	PDA Coyhaique MP10	1	1	1				3
7	2018	MMA	PDA Coyhaique MP ₁₀ -MP _{2,5}				1	1		2

Fuente: SMA a marzo de 2023.

Por otra parte, dado que el análisis de calidad del aire incorpora datos hasta el año 2021, se adelanta que, para los planes de reciente publicación, no se alcanzará a ver resultados significativos. Tal es el caso de Quintero, Curicó, Concepción Metropolitano, Los Ángeles. Coyhaique, si bien el primer año de implementación corresponde al 2020, se superpone con el plan anterior, que ha logrado efectos importantes en reducción de MP_{2,5} aun cuando se trataba de un plan para MP₁₀. Otro aspecto relevante para el análisis es el efecto de la pandemia, que sin duda distorsiona los registros de calidad del aire para los años 2020 y 2021.

A continuación, se analizan los planes en el orden siguiente:

1. Plan Concón-Quintero-Puchuncaví
2. Plan de la Región Metropolitana
3. Plan de Concepción Metropolitano
4. Planes de la zona centro sur enfocados principalmente al control de las emisiones de leña residencial: O'Higgins, Curicó, Talca-Maule, Chillán - Chillán Viejo, Los Ángeles, Temuco – Padre Las Casas, Valdivia, Osorno y Coyhaique.

6.1 Plan de Descontaminación de Concón-Quintero-Puchuncaví

El Plan de Prevención y Descontaminación de Concón-Quintero-Puchuncaví fue publicado en marzo de 2019, con una meta de reducción de los niveles promedio anual que permitiera salir de la condición de latencia en que se encontraba. El AGIES establece una reducción de 1,57 µg/m³ en el promedio anual, para pasar desde 17,25 a 15,68 µg/m³. Esta reducción se logra principalmente con las medidas que aplican a las tres fuentes industriales más importantes de la zona: ENAP con 1,22 µg/m³ (78% de la meta), Codelco con 0,2 µg/m³ (13% de la meta) y Gener con 0,04 µg/m³ (3% de la meta) es decir, representan el 94% de los efectos esperado del Plan. Por otra parte, los plazos de implementación de

las medidas para el sector industrial corresponden a 3 años, por lo cual se deben cumplir en marzo de 2022. De esta forma, es posible indicar que el cumplimiento de las principales medidas del Plan no se puede evaluar al año 2021.

Después de casi 3 años de publicado el Plan, se ha logrado que todas las estaciones, excepto Quintero Centro se mantengan en el límite o por debajo de la latencia, aun cuando no se han implementado aun las medidas más importantes del plan. Es necesario realizar un análisis enfocado en la estación Quintero Centro para explicar el relativo aumento de los niveles de $MP_{2,5}$, aunque, cabe mencionar que la estación Quintero Centro no tiene representatividad poblacional para $MP_{2,5}$ de acuerdo con la resolución de la SMA¹⁸.

Tabla 18: Promedio anual de concentración de $MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Estación	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Concón	-	-	-	-	-	19	14	14	13
Puchuncaví	-	-	-	18	15	15	14	14	15
La Greda	18	15	14	16	13	17	15	14	16
Los Maitenes	13	12	14	18	13	14	13	11	12
Ventanas	17	15	19	17	14	15	16	14	16
Centro Quintero	-	-	-	-	-	-	-	20	21
Loncura	-	-	-	16	15	16	-	16	15
Quintero	-	-	-	18	15	16	16	16	16

6.2 Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana

La última revisión del Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana fue publicada en noviembre de 2017. Habiéndose cumplido los 5 años para su revisión, la Res. Exenta N°1.442 del 24 de noviembre de 2022 da inicio al proceso de revisión y actualización del PPDA de la Región Metropolitana, publicado el 30 de diciembre 2022.

En relación con la evolución de los niveles de $MP_{2,5}$ se observa una reducción sostenida de los promedios anuales, con estaciones de calidad del aire como Las Condes, donde ya se cumple la norma anual con $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y otras estaciones como Cerro Navia que presentan niveles de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El percentil 98, también venía bajando en forma sostenida hasta el año 2021, en que se observó un relativo retroceso (Figura 21).

¹⁸ <https://bcn.cl/39sat>

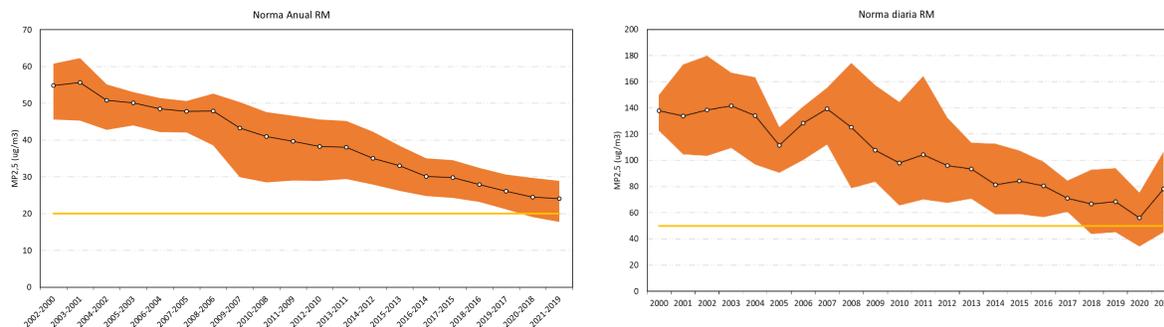


Figura 21: Evolución del promedio Trianual y del percentil 98 de la concentración de MP_{2,5} en la RM (monitoreo continuo).

Las principales 4 medidas de reducción de emisiones del Plan vigente corresponden a la prohibición del uso de leña para calefacción, la regulación de la maquinaria fuera de ruta, la regulación del transporte de fuentes móviles en ruta y las medidas en la industria.

La prohibición de la leña para calefacción fue establecida en el PPDA RM para 34 comunas de la zona A (32 comunas de la provincia de Santiago y las comunas de Puente Alto y San Bernardo). El Artículo 76 del PPDA establece lo siguiente: “Desde la entrada en vigencia del presente Decreto, el Ministerio del Medio Ambiente, a través de monitoreo de calidad del aire para material particulado, fortalecerá el seguimiento de la calidad del aire en la ZONA B y analizará la pertinencia de una futura regulación en el uso de todos los calefactores y cocinas que utilicen o puedan utilizar leña, carbón vegetal y otros derivados de la madera, para las actualizaciones del Plan, para esta zona”. A la fecha, el Ministerio de Medio Ambiente no ha establecido ninguna exigencia adicional respecto de la zona B, donde actualmente está permitido el uso de leña, salvo durante episodios críticos. Según la información base del Plan publicado, la zona B representaría el 65% de las emisiones.

Tabla 19: Resumen principales resultados estudio CDT (2012)

Zona	Consumo de leña (Ton/año)	N° de Equipos	Emisiones de MP (Ton/año)
A	59.217	45.584	750
B	111.664	71.513	1.400
TOTAL R.M.	170.883	117.097	2.150

Cabe mencionar que en el marco del sistema de compensación de emisiones que establece el PPDA R.M., se han realizado a la fecha un número de recambios de calefactores a leña de 15 mil unidades aproximadamente, según datos de Enel X.

Por otra parte, la regulación de la maquinaria fuera de ruta contaba con dos grandes medidas: Implementación de filtros de partículas en las maquinarias que prestaran servicios al Estado, lo cual se

cumplió, y la publicación de la norma de entrada para este tipo de maquinarias, norma de alcance nacional que fue publicada el 21 de octubre de 2021 (DS 39/2020 del MMA), con lo cual los plazos son los siguientes:

Tabla 20: Regulación de la maquinaria fuera de ruta.

	A que maquinaria aplica	Plazo	Fecha Entrada
Estándar Tier IV o Stage V	Todos excepto tractores	24 meses	21 oct 2023
Estándar Tier IV o Stage V	Tractores	36 meses	21 oct 2024

Con estos plazos de implementación, esta medida aún no ha tenido ningún efecto en reducción de emisiones.

En relación a las fuentes móviles en ruta, las medidas del PPDA RM se complementan principalmente con las normas de entrada vehiculares que se establecen a nivel nacional. En relación con las normas de entrada para vehículos nuevos, en el periodo desde la publicación del PPDA no ha entrado ninguna norma nueva en vigencia, la norma Euro 6 para vehículos livianos y medianos, que representa una reducción significativa de emisiones entra en vigencia en marzo de 2023 (Euro 6 b) por lo cual sus efectos se observarán a partir de entonces. Respecto de vehículos pesados, se mantiene la norma Euro 5 que entró en vigencia con anterioridad al Plan, mientras que la norma Euro 6 está en proceso elaboración del proyecto definitivo.

En cuanto a los buses de transporte público, el Plan establece que deben cumplir con la norma de entrada Euro 6. De esta forma, desde la publicación del Plan se han incorporado a la flota buses Euro 6 y eléctricos de cero emisiones. La flota actual de 6.981 buses cuenta con 800 eléctricos y cerca de 2.000 buses Euro 6. Se espera que hacia fines del 2023 los buses eléctricos lleguen a un total de 2.000 unidades.

Finalmente, la regulación aplicable al sector industrial en la Región Metropolitana cuenta con dos medidas principales a considerar: límite de MP en Chimenea de 20 mg/m³ y las metas de reducción de emisiones para grandes establecimientos. Respecto del límite de emisión de MP en chimenea, los plazos ya están cumplidos, por lo cual la medida se encuentra implementada.

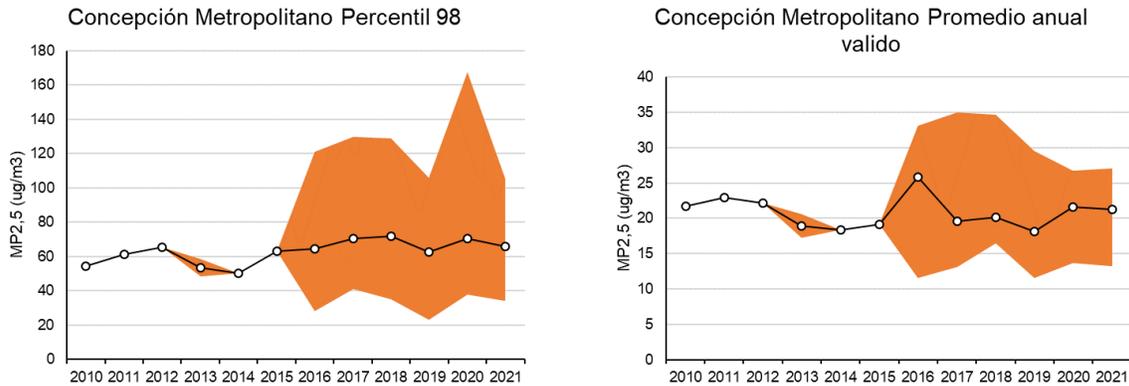
Los grandes establecimientos contaban con un plazo de 48 meses para reducir el 30% de sus emisiones de MP sobre su emisión másica anual asignada. El plazo para aprobar los PRE (Planes de Reducción de Emisiones) se cumplieron en noviembre de 2021, por lo cual a la fecha están todos presentados.

6.3 Plan de Descontaminación de Concepción Metropolitano

El Plan de Descontaminación de Concepción Metropolitano fue publicado en diciembre de 2019, por lo cual se considera el año 2020 como su primer año de implementación. Lo reciente de la publicación de este plan impide evaluar adecuadamente el efecto que ha tenido, puesto que sólo se tiene la evolución

de la calidad del aire hasta el 2021 como muestran las figuras siguientes. Ambas (P98 y Promedio Anual) muestran un relativo estancamiento en el tiempo, por lo cual se espera que el Plan permita iniciar la reducción en ambos parámetros.

Tabla 21: Evolución del promedio Anual y el percentil 98 de las estaciones del Concepción Metropolitano.



El Plan establece dos grupos de medidas que superan el 90% de las reducciones esperadas, estas son: Control de emisiones residenciales de leña y control industrial.

Respecto del control de las emisiones residenciales, se establecen metas de recambio de calefactores (20 mil en 10 años) y subsidios de acondicionamiento térmico (20 mil en 10 años). Entendiendo que no existen metas anuales de recambio ni de subsidios de aislación térmica, para efectos de evaluar el avance se establece una curva que denominamos “comprometido” por la vía de calcular el recambio anual necesario para cumplir las metas de largo plazo.

Respecto de ambos programas, al 2021 se observa un avance del 0% en recambio, mientras que, en subsidios de acondicionamiento térmico, se observa un avance del 30% de lo comprometido a la fecha.



Figura 22: Estado de avance de Programa de Recambio de Calefactores y Subsidios de Acondicionamiento térmico en el Concepción Metropolitano.

En cuanto a las medidas que aplican al sector industrial, estas son principalmente el límite de concentración de MP en chimeneas (30, 50, 100 mg/m³ dependiendo del tamaño y el combustible) cuyo plazo es de 2 años para calderas y 3 años para el resto de las fuentes, y las metas de reducción de MP en grandes establecimientos industriales, cuyo plazo es de 4 años. Dado lo anterior, se hace presente que al 2021, solo se ha cumplido el plazo para el límite de calderas, el cual tiene un aporte menor en relación con las metas de reducción en grandes establecimientos.

6.4 Planes de la zona centro sur enfocados principalmente al control de las emisiones de leña

Los planes de descontaminación que se han agrupado bajo este título comparten un mismo enfoque regulatorio orientado a reducir el impacto de la calefacción con leña. Como se puede apreciar en la ilustración siguiente, las principales medidas enfocadas al control de las emisiones residenciales representan sobre el 85% de las reducciones esperadas, con la excepción de O'Higgins, donde representan el 75%, dado el mayor aporte de otras actividades no residenciales como la industria, el transporte y las quemas agrícolas.

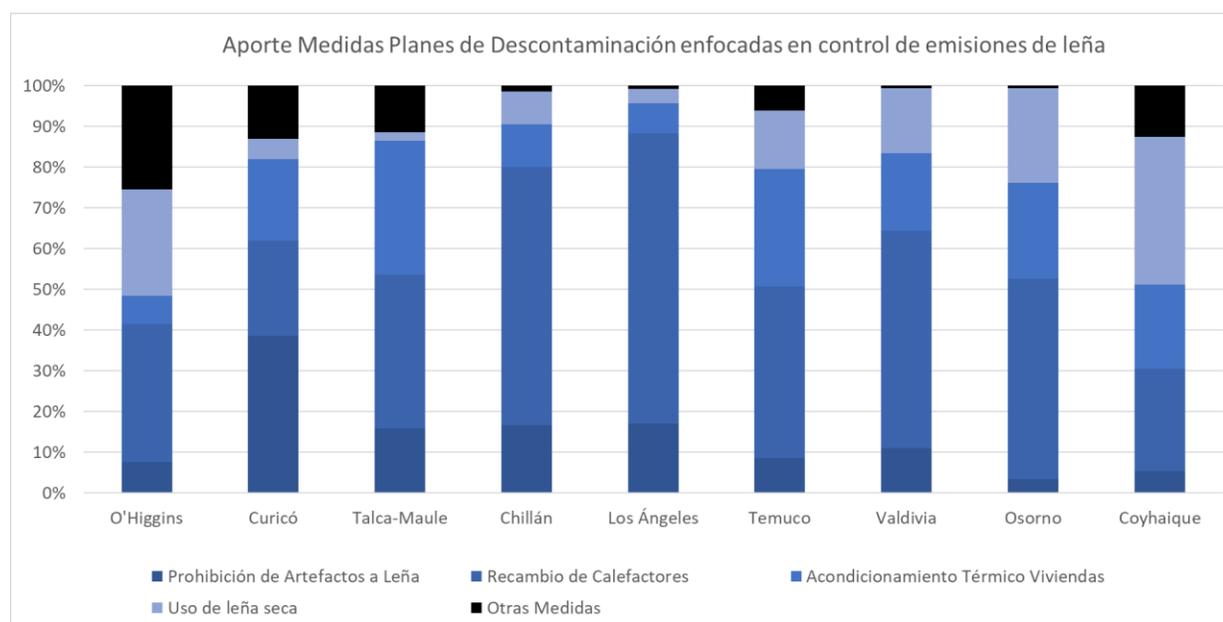


Figura 23: Aporte de las principales medidas de los planes, en base a las proyecciones realizadas en los AGIES respectivos.

Dado lo anterior, para evaluar el avance de estos planes, además del análisis de tendencias en la calidad del aire, hemos incorporado una revisión de los dos principales programas comprometidos en los planes: el programa de recambio de calefactores y el programa de mejoramiento del acondicionamiento térmico de las viviendas.

El retraso en la implementación de las principales medidas de estos planes, sin duda que impide cumplir con las metas de calidad del aire que se proyectaron en los planes de descontaminación.

6.4.1 Implementación del Programa de Recambio de Calefactores

Entendiendo que no existen metas anuales de recambio en los Planes de Descontaminación y tampoco a nivel nacional, para efectos de evaluar el avance se establece una curva que denominamos “comprometido” por la vía de calcular el recambio anual necesario para cumplir las metas de largo plazo comprometidas en los planes de descontaminación.

Lo primero que se destaca es que el programa de recambio ha incrementado fuertemente las metas de largo plazo como resultado de la publicación de nuevos planes de descontaminación. Cabe señalar que esta meta seguirá aumentando en los próximos años en la medida en que se publiquen varios planes en elaboración.

A nivel global se observa hasta el año 2021 que el número total de recambios implementados presenta una brecha en relación con lo “comprometido” a la fecha. El nivel de avance representa el 60% de la meta acumulada al año 2021.

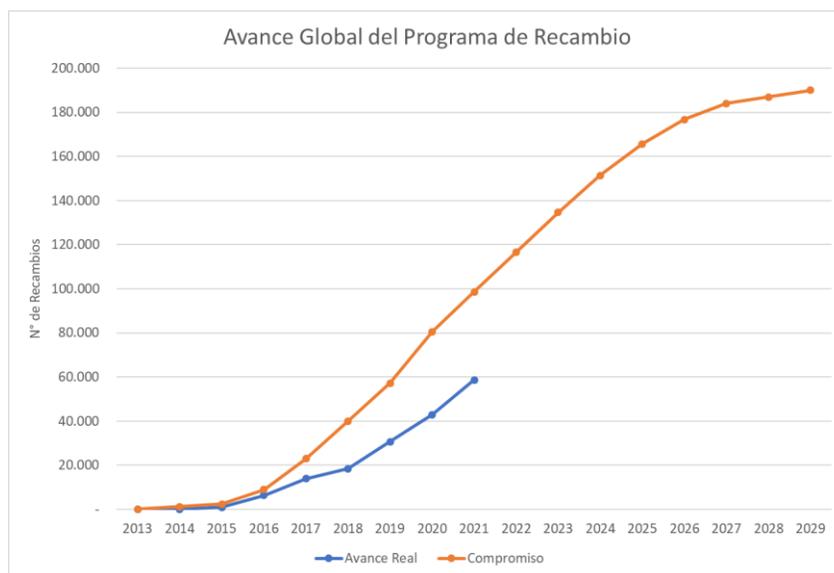


Figura 24: Avance del programa de recambio de calefactores a nivel nacional

6.4.2 Implementación del Programa Acondicionamiento Térmico de Viviendas

Entendiendo que no existen metas anuales de subsidios de Acondicionamiento Térmico en los Planes de Descontaminación y tampoco a nivel nacional, para efectos de evaluar el avance se establece una curva que denominamos “comprometido” por la vía de calcular el número de subsidios anuales necesarios para cumplir las metas de largo plazo comprometidas en los planes de descontaminación. Este programa también ha incrementado fuertemente las metas anuales, debido a la publicación de nuevos planes de descontaminación. Cabe señalar que esta meta seguirá aumentando en los próximos años en la medida en que se publiquen los planes en elaboración.

Para el año 2021, se alcanzó un 38% de la meta acumulada a ese mismo año¹⁹, con lo cual se observa una brecha importante, la cual podría aumentar si se mantienen las bajas tasas de implementación que registra este programa en el periodo 2019-2020-2021.

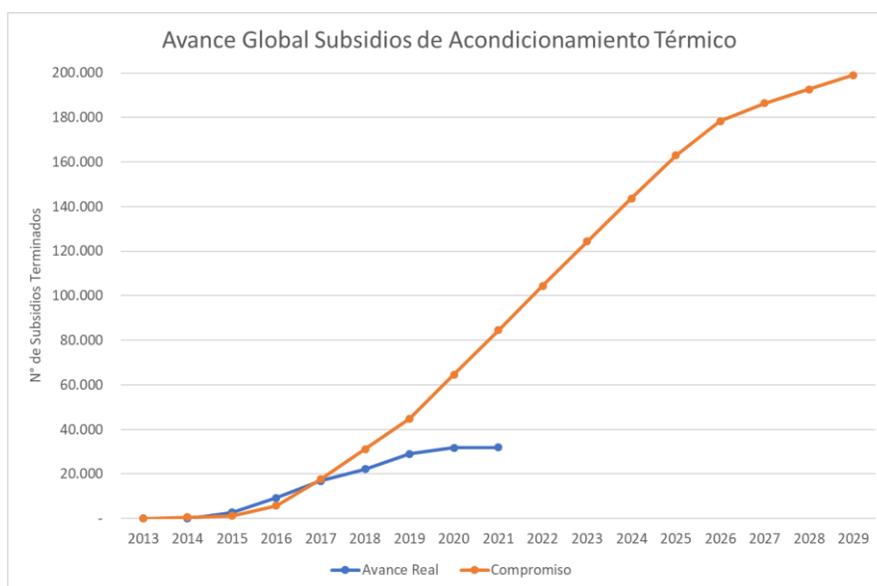


Figura 25: Avance del programa de Acondicionamiento Térmico a nivel nacional

La figura siguiente ayuda a comprender el relativo estancamiento que se ha venido observando en el programa de acondicionamiento térmico. Para que tenga efecto en reducir la demanda energética y por ende los niveles de emisión, estos subsidios deben estar implementados.

¹⁹ % se refiere a las asignaciones ejecutadas por las familias según datos proporcionados por el MMA.

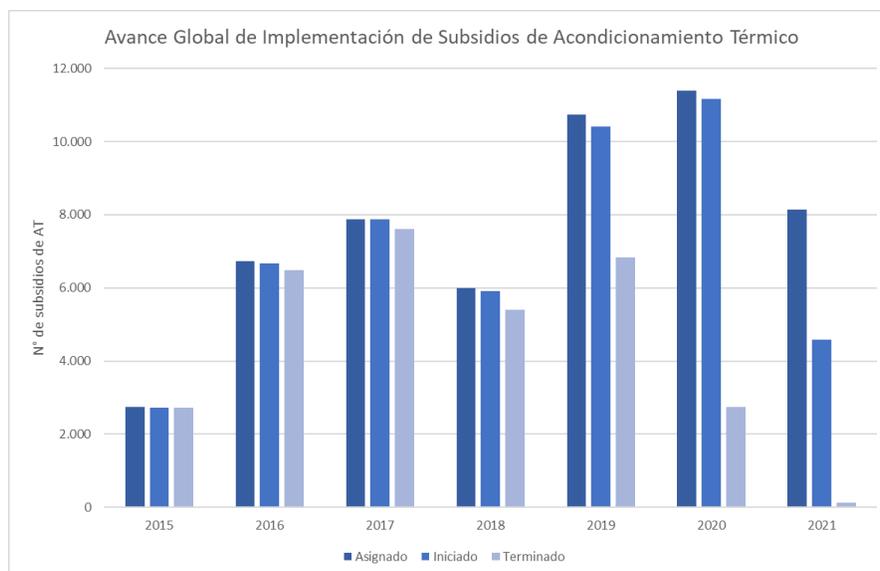


Figura 26: Avance del programa de acondicionamiento térmico a nivel nacional, desagregado en etapas (asignado, iniciado y terminado)

En la medida en que los Planes de Descontaminación han ido incorporando nuevas metas de subsidios de acondicionamiento térmico (AT), se observa un aumento sostenido de los subsidios asignados a las familias, excepto el año 2018, lo que probablemente puede ser atribuible al cambio de administración. El año 2021, nuevamente se observa una caída aún mayor en la asignación de subsidios.

Sin embargo, más allá de las asignaciones, lo que llama la atención respecto de este programa es, la gran diferencia entre subsidios asignados y terminados (53.608 en relación con los 31.906) lo que indica que sólo el 60% de los subsidios entregados en el periodo se han ejecutado completamente. Esto se explica, a nuestro juicio, por varias razones: la dificultad de implementar estos subsidios en terreno, porque los trabajos toman tiempo, pero, además, el efecto de la pandemia los últimos 2 años. A lo anterior se agrega que las entidades patrocinantes cuentan con un año plazo para la ejecución del subsidio.

A continuación, se presenta un análisis del avance de ambos programas para cada zona con Plan de Descontaminación.

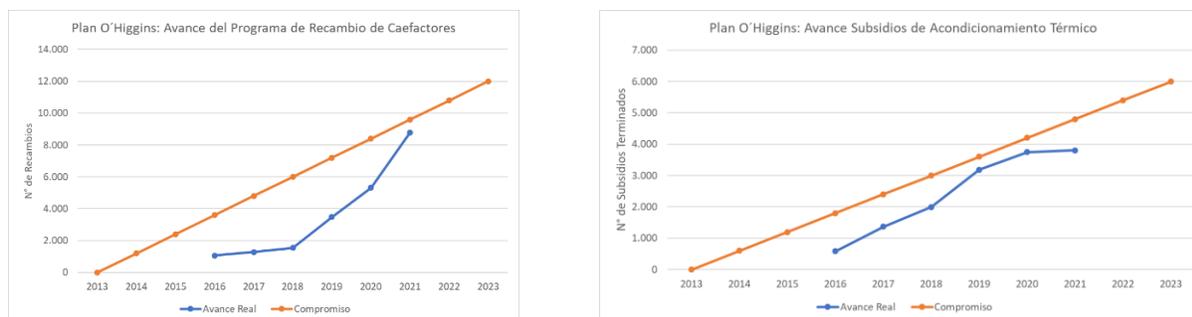


Figura 27: Plan de O'Higgins: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

Ambos programas presentan un buen nivel de avance al año 2021 respecto de lo “comprometido”. El recambio de calefactores presenta una brecha de 10%. En relación al acondicionamiento térmico, la brecha alcanza un 20%.

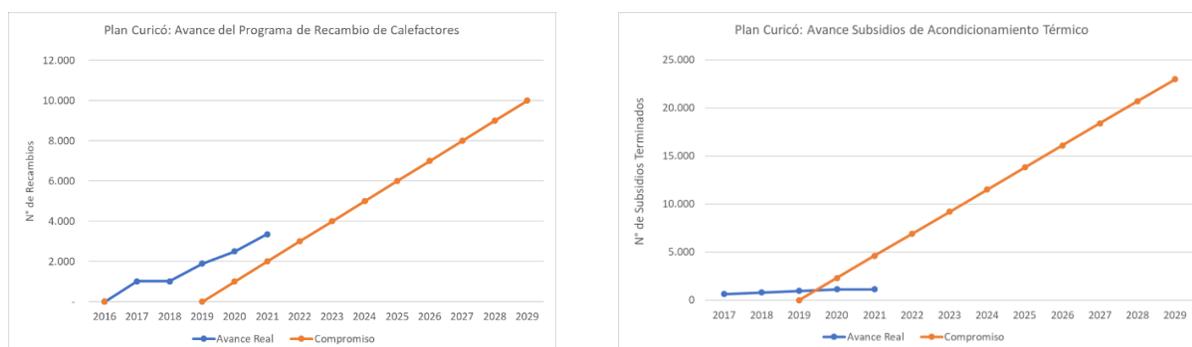


Figura 28: Plan de Curicó: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

El programa de recambio de calefactores avanza con un superavit importante respecto de lo “comprometido” a la fecha. Por su parte, el programa de acondicionamiento térmico evidencia poco avance a la fecha, considerando que se inició un par de años antes de publicar el plan.

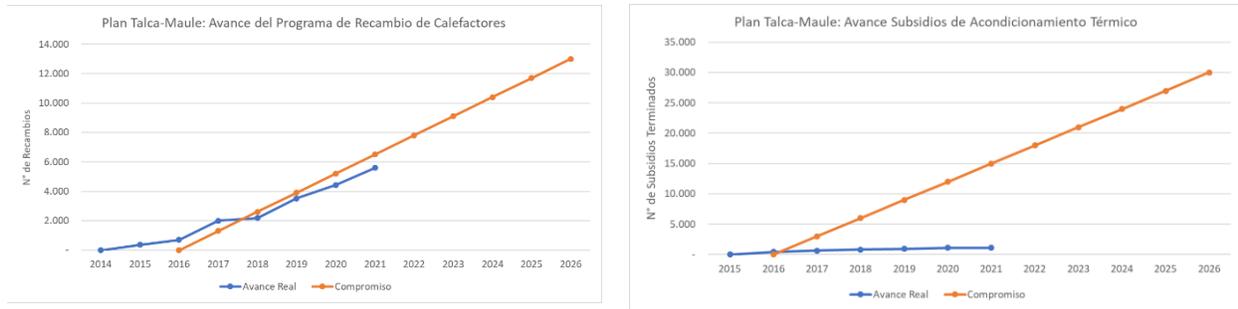


Figura 29: Plan de Talca - Maule: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

El programa de recambio avanza según los compromisos. Por su parte, el acondicionamiento térmico prácticamente no presenta avances desde el 2015 a la fecha.

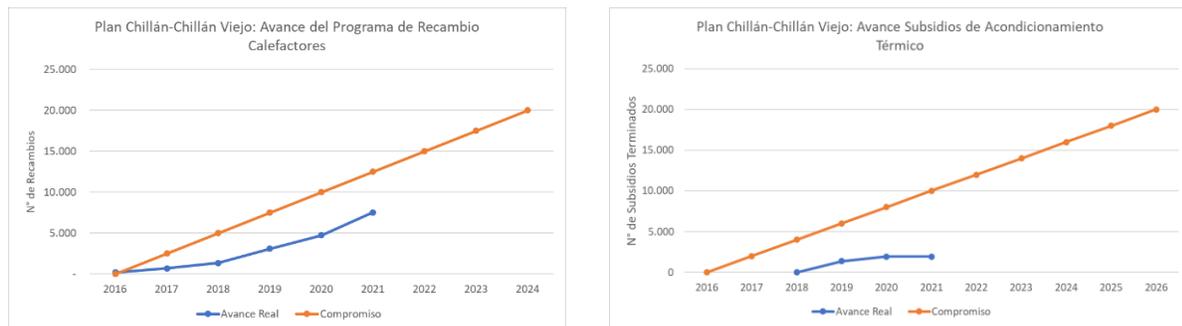


Figura 30: Plan de Chillán – Chillán V.: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

Se observa una brecha importante en el avance de ambos programas. El recambio de calefactores muestra un avance del 60% en comparación con los “comprometido” a la fecha. Por su parte, el acondicionamiento térmico presenta poco avance después de 5 años de publicación del Plan.

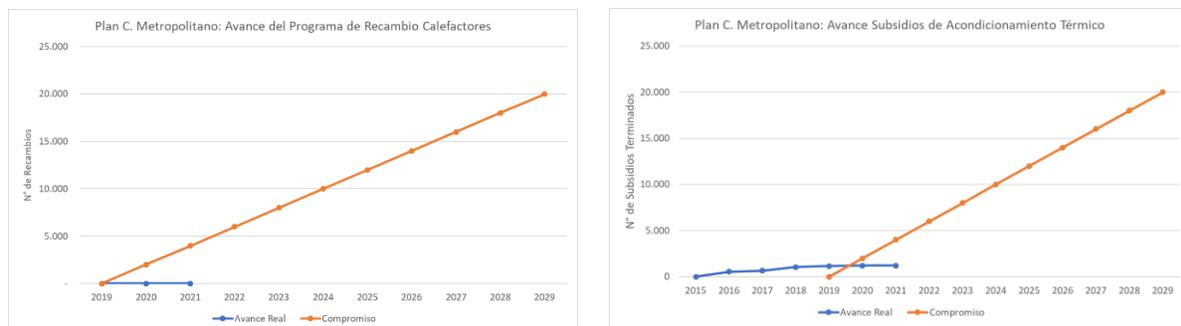


Figura 31: Plan de C. Metropolitano: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

Después de dos años de publicado el Plan, ambos programas muestran una brecha importante en relación a lo “comprometido” a la fecha.

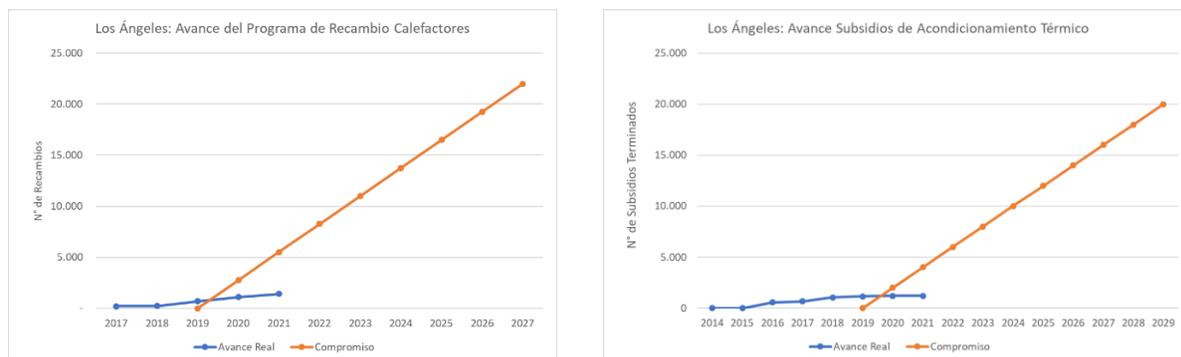


Figura 32: Plan de Los Ángeles: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

Después de dos años de publicado el Plan, ambos programas muestran una brecha importante en relación a lo “comprometido” a la fecha.



Figura 33: Plan de Temuco PLC: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico.

El programa de acondicionamiento térmico ha avanzado de forma muy eficiente en esta ciudad, sin embargo muestra un estancamiento en los últimos 3 años. Por su parte, el recambio de calefactores presenta una brecha importante, habiéndose cumplido el plazo el año 2020, el avance es inferior al 50% de lo comprometido.



Figura 34: Plan de Valdivia: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

Bajo nivel de avance en ambos programas, lo que representa un escenario complejo porque el año 2022 se cumplen los plazos para revisar el Plan.

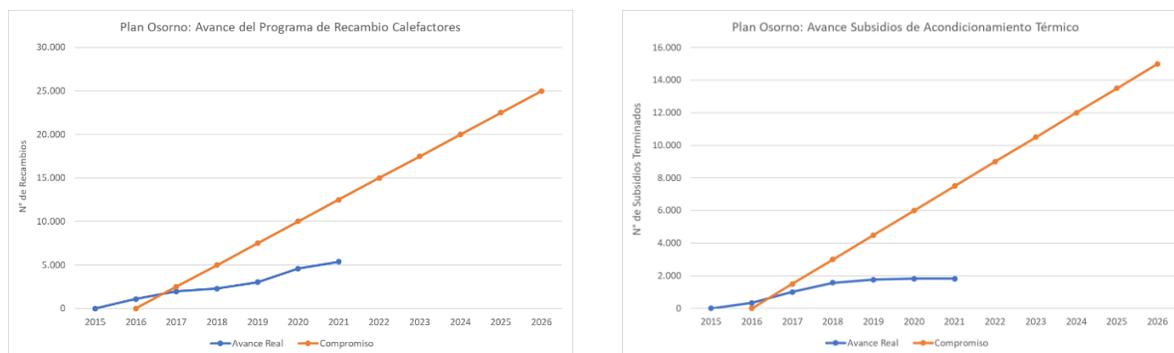


Figura 35: Plan de Osorno: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

Se observa un bajo nivel de avance en ambos programas, sin embargo, el programa de recambio presenta una brecha menor. En el caso de los subsidios de acondicionamiento térmico el avance respecto de lo “comprometido” es del 25%.

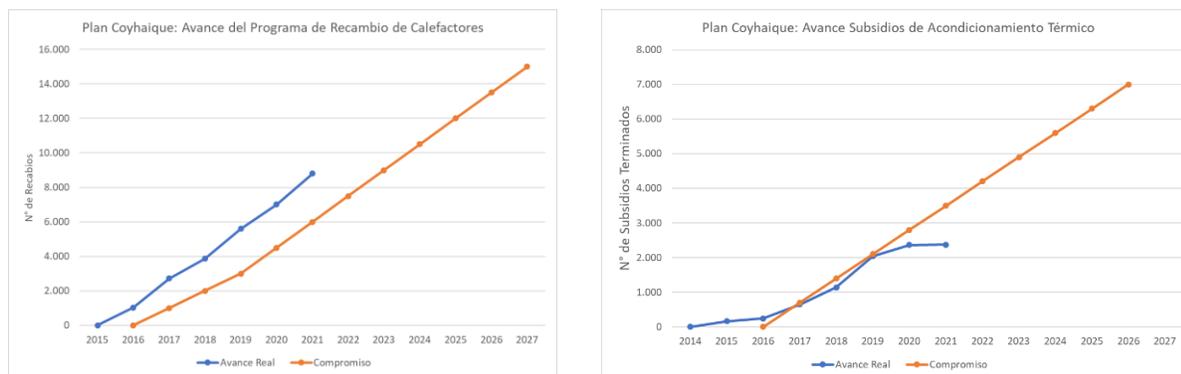


Figura 36: Plan de Coyhaique: Avances en los programas de recambio y acondicionamiento térmico

Ambos programas han avanzado de muy buena forma en la ciudad de Coyhaique. El recambio de calefactores siempre ha superado lo “comprometido”. Actualmente este programa tiene un superavit del 46%. Por su parte, el acondicionamiento térmico si bien presenta una brecha menor, preocupa el estancamiento observado en los últimos 2 años. Además de las razones generales mencionadas al principio de esta sección, en este caso también se explica porque en los primeros años las EP se enfocaron en proyectos para viviendas sociales, que son más pequeñas. Actualmente se deben abordar las viviendas medianas y de mayor tamaño, cuyo subsidio considera un copago, lo cual hace más difícil que el beneficiario aproveche el subsidio, perdiéndose en algunos casos.

7 Estudio de metodologías de monitoreo aplicadas a nivel internacional (continuas, discontinuas, mixtas).

7.1 Técnicas de referencia /equivalentes

La última actualización de las guías de la OMS busca dar soporte a los responsables de la formulación de políticas en el establecimiento de estrategias de gestión de la calidad del aire considerando nueva evidencia científica generada. Si bien, no son legalmente vinculantes, se basan en la evaluación experta de pruebas científicas y, por lo tanto, son una fuente valiosa de información. Además, ayuda a que instituciones importantes también sigan actualizando sus estándares de calidad de aire, y la Unión Europea ha expresado su intención de revisar la actual Directiva sobre la Calidad del Aire Ambiente (AAQD) 2008/50/CE (Consejo Europeo, 2008) para que se acerque más a las nuevas pautas de la OMS (Comisión Europea, 2020).

La actualización de los criterios de calidad del aire es una tarea importante y compleja que requiere de un trabajo coordinado y multidisciplinario. La actualización no solo se limita a la definición de valores o estándares o guías más estrictos, sino también a estar atentos a los avances tecnológicos respecto de las diferentes alternativas de evaluación de calidad del aire que están disponibles y que se han robustecido con el tiempo. Así, se busca garantizar una evaluación más representativa de los efectos en la salud que tiene la exposición de la población en el corto, mediano y largo plazo.

Actualmente la regulación de UE (DIRECTIVE 2008/50/EC) considera que los registros/observaciones para evaluar la calidad del aire comprenden cuatro niveles, basado en un orden decreciente de incertidumbre:

- I. mediciones fijas,
- II. mediciones indicativas,
- III. modelación y
- IV. estimación objetiva.

Existen diferentes parámetros a considerar para evaluar la calidad de los datos de calidad del aire, las que se expresan en la Tabla 22. Los dos niveles más precisos son I): las mediciones fijas II) las mediciones indicativas, se basan en mediciones reales. Los dos siguientes son formas menos precisas: III) modelado y IV) estimación objetiva, las que están basadas estimaciones matemáticas y expertas de las concentraciones.

Tabla 22: Requerimientos de observaciones definidos por la UE (European Council, 2008).

Nivel/Parámetro	SO ₂ , NO ₂ , NO _x y CO	Benceno	MP _{2.5} , MP ₁₀ , y Pb	O ₃ y NO/NO ₂ (fotoquímico)
(1) Mediciones Fijas				
<i>Incertidumbre^a</i>	15%	25%	25%	15%
<i>Captura mínima de datos</i>	90%	90%	90%	90 % (Verano) 75 % (Invierno)
<i>Tiempo mínimo de cobertura</i>				
<i>Sitios background y de tráfico</i>	-	35% ^b	-	-
<i>Sitios industriales</i>	-	90%	-	-
(2) Mediciones Indicativas				
<i>Incertidumbre</i>	25%	30%	50%	30%
<i>Captura mínima de datos</i>	90%	90%	90%	90%
<i>Tiempo mínimo de cobertura</i>	14%	14% ^c	14% ^d	> 10 % (Verano)
(3) Incertidumbre en la modelación				
<i>Horario</i>	50%	-	-	50%
<i>Promedio de 8 horas</i>	50%	-	-	50%
<i>Promedio diario</i>	50%		Aún no definido	-
<i>Promedio Anual</i>	30%	50%	50%	-
(4) Estimación Objetiva				
<i>Incertidumbre</i>	75%	100%	100%	75%

a: Los Estados miembros pueden aplicar mediciones aleatorias en lugar de mediciones continuas para benceno, Pb y MP si pueden demostrar ante la Comisión que la incertidumbre, incluida la incertidumbre debida al muestreo aleatorio, cumple con el objetivo de calidad del 25 % y que la cobertura temporal sigue siendo mayor que la cobertura temporal mínima para las mediciones indicativas. El muestreo aleatorio debe distribuirse uniformemente a lo largo del año para evitar sesgos en los resultados. La incertidumbre debida al muestreo aleatorio puede determinarse mediante el procedimiento establecido en la norma ISO 11222:2002 "Calidad del aire - Determinación de la incertidumbre de la media temporal de las mediciones de la calidad del aire". Si se utilizan mediciones aleatorias para evaluar los requisitos del valor límite de MP₁₀, se debe evaluar el percentil 90,4 (que debe ser inferior o igual a 50 µg/m³) en lugar del número de superaciones, que se ve muy influenciado por la cobertura de datos.

b: Distribuido a lo largo del año para representar diversas condiciones climáticas y de tráfico.

c: Un total de 1 medición por día a la semana al azar, distribuido uniformemente a lo largo del año, o 8 semanas distribuidas uniformemente a lo largo del año.

d: Una medición a la semana al azar, distribuida uniformemente a lo largo del año, o 8 semanas distribuidas uniformemente a lo largo del año.

La principal debilidad de los modos de observación basados en mediciones (I y II) es que usualmente son actividades que consume mucho tiempo y recursos; ya que consiste en establecer y mantener una estación monitorea, especialmente una estación clasificada como instalación de "medición fija". Necesita de recursos considerables, lo que usualmente lleva a una escasez de estaciones y una mala cobertura espacial de las mediciones. Los niveles de observación de modelación y de estimación objetiva requieren mucho menos esfuerzos y pueden cubrir cualquier dominio espacial, pero potencialmente proporcionan datos derivados matemáticamente menos confiables. Esto establece un marco de observación jerárquico, en el cual se pueden utilizar en paralelo diferentes niveles de

observación de diferentes niveles para complementar las fortalezas y debilidades. Así, los encargados de redes de monitoreo pueden utilizar una combinación de distintas técnicas que se ajuste mejor a sus necesidades y recursos.

Hoy día, los sistemas/equipos de mediciones fijas o indicativas que se usan para mostrar información en línea están casi exclusivamente limitados a equipamiento bastante preciso en términos de operación. Esto se debe al proceso largo y costoso que deben pasar estos equipos para tener la “aprobación” de la autoridad; es decir que la técnica/equipo de medición cumple con diversas especificaciones indicadas en un estándar (Por ejemplo, en UE se usa la norma EN16450 para mediciones automáticas de MP). Además, la acreditación de este estándar debe ser verificado por un laboratorio acreditado. Similar situación ocurre en la USEPA en donde existe un listado de equipamiento de referencia y equivalente que está acreditado para diferentes propósitos regulatorios. Esto ha hecho que tanto los instrumentos de medición fija e indicativa pasen por el mismo proceso de homologación y por lo tanto tienen costos de este proceso equivalente, generando desincentivos a que empresas puedan elegir otros instrumentos diferentes.

Cabe mencionar que dada la complejidad de las partículas atmosféricas reguladas (en especial el $MP_{2,5}$), ya que contienen una amplia gama de tamaños de partículas y componentes químicos y, a diferencia de las mediciones de gases traza, no tienen un único valor de concentración correcto. Esto se debe a que el muestreo y posterior acondicionamiento de la muestra afecta la composición y, por lo tanto, la masa. Es por tanto depende de los procedimientos de recolección, conservación y pesaje de la muestra, y se la conoce como una medición definida operativamente. Las agencias reguladoras abordan este problema definiendo métodos altamente restringidos, diseñados para dar mediciones repetibles que son reproducibles entre diferentes laboratorios, y permitiendo técnicas de medición alternativas, si pueden demostrar “equivalencia”. En el caso de las $MP_{2,5}$, existen métodos de referencia establecidos por la Unión Europea y la USEPA (Federal Reference Method, FRM). Ambos dependen de la recolección de partículas en un filtro, acondicionamiento a temperatura y humedad relativa definidas, y pesaje. Como difieren en aspectos clave, los métodos europeo y estadounidense no dan resultados idénticos. Estos exigen tiempos de muestreo típicamente de un día o más que no son adecuados para la información pública casi en tiempo real, y por lo tanto, hay una serie de instrumentos continuos que dan una respuesta mucho más rápida y están ajustados para demostrar la equivalencia con los métodos de referencia.

Tomando en análisis el listado de la USEPA es posible identificar 63 equipos diferentes que se pueden utilizar para monitorear $MP_{2,5}$ para propósitos regulatorios. De ellos se pueden categorizar en las siguientes técnicas /principios de monitoreo.

- 1) *Gravimetría*: Están denominados como “Samplers”, y son utilizados como medición de referencia.
- 2) *Atenuación de rayos Beta*: Los rayos beta son partículas cargadas (electrones o positrones) que se emiten durante la desintegración radiactiva de ciertos isótopos. Cuando los rayos beta pasan a través de un material, experimentan una pérdida de energía debido a la interacción con los

átomos del material. Esta pérdida de energía se manifiesta como una disminución en la intensidad o atenuación de los rayos beta a medida que atraviesan el material. Esta disminución de intensidad es usada para determinar MP.

- 3) *TEOM*: (Tapered Element Oscillating Microbalance): Esta técnica se basa en la medición de la masa de las partículas recolectadas en un filtro utilizando una micro balanza oscilante. Mide la frecuencia de oscilación del filtro en la medida que las partículas van depositándose en él.
- 4) *Espectroscopía de Banda Ancha*: Esta técnica implica el uso de un espectrómetro que puede analizar un amplio rango de longitudes de onda en el espectro electromagnético. Se utiliza un espectrómetro de masa de tiempo de vuelo (TOF-MS, por sus siglas en inglés). Este instrumento puede medir la masa y distribución de partículas en el aire según sus tiempos de vuelo.
- 5) *Dispersión de la luz Láser (Scattering)*: Este método se basa en la dispersión de la luz láser cuando interactúa con las partículas suspendidas en el aire.

A partir de información disponible en la en la UE²⁰, es posible señalar que actualmente los instrumentos regulatorios continuos están dominados principalmente por los de Atenuación de rayos Beta (cerca del 70% de los monitores de MP_{2,5} de Europa en el año 2021), seguido de los instrumentos TEOM. Esto ocurre tanto en Estados Unidos como en Europa. El principio de monitoreo más utilizado en Chile es el de atenuación beta.

7.2 Revolución de la sensorización para el monitoreo de la calidad del aire y oportunidad para ingreso como metodologías de evaluación exploratorio (Screening)

Hoy día tanto la OMS, la Unión Europea y la USEPA han señalado que existe una necesidad de aumentar la cobertura de monitoreo de calidad del aire hacia zonas en donde no se tiene información. Este es un desafío significativo ya que las actuales técnicas tienen limitaciones para capturar la variabilidad espacial de los contaminantes del aire, principalmente debido al alto costo que significa operar las estaciones de calidad del aire convencionales. Una revisión de licitaciones disponibles en Mercado Público indica que la adquisición (compra) de equipamiento de calidad del aire (instrumental) ronda por los 11 mil a 23 mil USD por equipo (por ejemplo, un equipo de MP_{2,5} o MP₁₀ protocolo EPA). El costo de estación (caseta) es más variado y depende de qué tan equipada esté (dataloggers, racks, equipos de respaldo, aire acondicionado, etc), encontrándose valores que van desde los 18 mil a 28 mil USD. Las obras civiles asociadas a la instalación de la estación también son significativas, en particular si son en sitios remotos, encontrando valores que van entre 23 a los 32 mil USD. Así, el costo de inversión de una estación de monitoreo bien equipada es significativamente alto. Información de operación anual en Mercado Público señalan costos que van entre los 18 a 21 mil USD por estación en caso de que sean redes con un número reducido de estaciones.

La detección de la calidad de aire con sensores de bajo costo (<\$2500(US EPA, 2014)) está cambiando el paradigma de la investigación y las prácticas de gestión de la calidad del aire ambiental. El rápido

²⁰ Según información obtenida de [Table publisher \(europa.eu\)](#)

desarrollo de sensores de bajo costo en los últimos años proporciona una oportunidad única que no solo puede ser utilizada para resolver debilidades en la necesidad de monitoreo en zonas donde no hay, sino también en el futuro se ven como dispositivos que van a reemplazar las actuales estaciones de monitoreo. Hoy día, los sensores de bajo costo han sido ampliamente adoptados en regiones de altos ingresos para complementar el monitoreo tradicional de la calidad del aire y el mapeo de calidad del aire local (Castell et al., 2017; Crawford et al., 2021; Gressent et al., 2020; Miskell et al., 2018), sus aplicaciones en familias de bajos ingresos países son limitados (Brauer et al., 2019; deSouza et al., 2020; SM et al., 2019). Como por ejemplo, la USEPA los utiliza para complementar el mapa de incendios forestales (<https://fire.airnow.gov>). Está bien consensuado por la comunidad científica que hoy día que pueden ser utilizados al menos en la Unión Europea como complemento de las estaciones fijas de forma como mediciones indicativas dado su excelente desempeño costo-eficiente. Sin embargo, tanto la formulación como el procedimiento actual para la aprobación de estos tipos de dispositivos no facilitan una integración amplia de sensores en las estrategias de gestión de la calidad del aire. Así, se ha manifestado que es necesario contar con un nuevo protocolo de pruebas si se desea cambiar esta situación.

La sensorización de calidad del aire permite que la información se pueda actualizar en minutos e incluso segundos. Así, se abren nuevas aplicaciones y se pueden construir redes de medición basadas en diferentes ideas y para diferentes propósitos. Los sensores económicos ofrecen movilidad, configuración y reconfiguración sencillas de los nodos de detección. Sin embargo, no son tan precisos como los métodos de referencia/equivalentes. Algunos tienen una sensibilidad limitada y pueden verse afectados por la humedad (particularmente los de MP), así como por muchas otras sustancias.

Hay dos direcciones hacia una mayor cobertura espacial del monitoreo de la calidad del aire. La primera es implementar masivamente sensores de monitoreo de la contaminación del aire de bajo costo en las áreas de interés. La segunda es utilizar plataformas de medición móviles, en lugar de estaciones fijas, para realizar el monitoreo de la contaminación del aire (Li et al., 2023). Estas dos estrategias también están relacionadas hasta cierto punto, ya que los sensores de bajo costo son normalmente compactos y pequeños, y algunos de ellos son muy adecuados para su implementación a bordo de plataformas móviles.

A menudo, los sensores del mismo fabricante y de la misma serie proporcionan mediciones diferentes. Muchos de estos sensores no entregan información sobre las condiciones en las que se realizó la calibración, ni tampoco de los procedimientos de mantenimiento de calidad o las descripciones de cuándo los sensores pueden generar lecturas inexactas.

Se pueden identificar siete desafíos del rendimiento de los sensores de bajo costo: i) variabilidad entre sensores, ii) variabilidad intra-sensor, iii) sesgo, iv) envejecimiento, v) respuesta tiempo, vi) sensibilidad cruzada y viii) sensibilidad a factores ambientales. Mayor investigación y desarrollo se necesita para poder resolver estos desafíos. Otro aspecto está relacionado con la vida útil de los sensores. Aunque no existe mucha certeza al respecto, se esperaría que los sensores tengan una vida útil de menor duración

que equipamiento convencional regulatorio y por lo tanto algunas aplicaciones de sensorización van más por el lado de la comercialización de servicios de monitoreo más que la adquisición de ellos, considerándolos como “desechables”.

De todos modos, el potencial de los sensores de bajo costo es prometedor y en el futuro logren el desempeño que les permita ser utilizado para la verificación de normas, pero hoy día están limitados al uso en combinación con métodos válidos y no como alternativa regulatoria. Bajo ciertas condiciones, las redes basadas en dispositivos económicos pueden llenar la brecha entre los sistemas de monitoreo convencionales y los modelos de calidad del aire.

Teniendo en consideración el estatus actual de rendimiento de los sensores de bajo costo y el creciente interés en usar sensores en áreas donde los monitores regulatorios están ausentes, la USEPA ha estado involucrando a las comunidades locales, a los expertos y a los fabricantes de sensores de aire para desarrollar pautas para su uso y calibración, y existen recomendaciones y sugerencias materializadas en informes para sensores de O₃ y de partículas para su uso complementario e informativo (EE.UU EPA, 2021a, EPA de EE. UU., 2021b). Concretamente, la USEPA ha publicado reportes que guían o permiten verificar el correcto uso de los sensores, particularmente para O₃ y MP_{2,5}²¹. En particular está disponible dos informes publicados²² en año 2021 que proporcionan un conjunto de protocolos de prueba, métricas y valores objetivo para evaluar el rendimiento de los sensores de aire para ozono y MP fino. Estos informes incluyen protocolos para dos escenarios de prueba: pruebas básicas (evaluación en terreno) y pruebas avanzadas (evaluación en laboratorio bajo condiciones controladas). Al mismo tiempo, dispone de una serie de algoritmos para uso público (sensortoolkit²³) para evaluar los datos de los sensores de aire. La biblioteca se puede usar para evaluar el rendimiento de los sensores usando las métricas y objetivos recomendados en los informes.

Existen otras aplicaciones en donde los sensores pueden aportar una solución hoy día. Una de ellas se detalla como sigue: Actualmente la UE, USEPA y Chile presentan requerimientos específicos de ubicación de estaciones de monitoreo (fijas) para ser catalogadas con representatividad poblacional y así evaluar la calidad del aire para propósitos regulatorios. Sin embargo, esta estandarización puede no resolver brechas de representatividad, especialmente cuando hay ciudades densamente urbanizadas en donde es difícil cumplir con tales requisitos. Así, en estos casos se podría confiar más

²¹ Air Sensor Performance Targets and Testing Protocols | US EPA, disponible en US EPA <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols>

²² Duvall, R., A. Clements, G. Hagler, A. Kamal, Vasu Kilaru, L. Goodman, S. Frederick, K. Johnson Barkjohn, I. VonWald, D. Greene, AND T. Dye. Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors: Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-20/280, 2021.

Duvall, R., A. Clements, G. Hagler, A. Kamal, Vasu Kilaru, L. Goodman, S. Frederick, K. Johnson Barkjohn, I. VonWald, D. Greene, AND T. Dye. Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Ozone Air Sensors: Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory and Informational Monitoring Applications. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-20/279, 2021.

²³ biblioteca de código Python

en la experiencia y el criterio de las autoridades locales de calidad del aire, pero sin aumentar la ambigüedad en tales decisiones. Aquí es en donde el uso de redes densas de sensores podría ayudar a resolver el dilema entre la representatividad espacial y las prioridades de ubicación, ya que permitiría medir en más sitios diferentes.

Es indudable que el desarrollo de sensores de bajo costo continuará avanzando en el futuro cercano, por lo que no se puede descartar su uso en Chile. Sin embargo, es importante estandarizar y delimitar el alcance de su uso. Hoy día, a pesar de que existen sensores con un buen desempeño, particularmente monitoreando $MP_{2,5}$, y fracciones más finas, no reemplazan el uso del monitoreo regulatorio para evaluar cumplimiento de normas de calidad del aire. Esto se debe a que **se debe poner especial atención en la revisión y trazabilidad de los procesos de calibración y evaluación de su desempeño previo a su utilización**. Estos procedimientos deben realizarse de forma más frecuente que los equipamientos protocolo USEPA, ya que son esenciales para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos. Por lo tanto, resulta ser más determinante su correcto uso más que el nivel tecnológico de cuantificación propiamente tal el que determinará la calidad de sus datos. Esto ofrece oportunidades sea más práctico la búsqueda de servicios de empresas especializadas en monitoreo de calidad del aire en lugar de buscar y comprar dispositivos para operarlos.

Por lo tanto, el estatus actual es destinar el uso de los sensores a un complemento del monitoreo regulatorio, de forma de incrementar la disponibilidad de información. A su vez, ofrece oportunidades de colaboración de distintos grupos de interés (comunidad científica, sector industrial, autoridades y ciudadanía en general). Algunos ejemplos de aplicaciones concretas son las siguientes:

- Educación y aumento de la conciencia ambiental
- Aumentar el nivel de conocimiento de la calidad del aire local
- Identificación de zonas críticas (hot spots)
- Complemento a las redes de calidad del aire regulatorio.
- Respuesta instantánea ante situaciones de contingencia (emergencia debido a incendios forestales, eventos altos de contaminación, etc).
- Verificación de resultados de modelación de dispersión
- Complemento para mejorar los sistemas pronósticos de calidad del aire.

Particularmente se espera que mejore significativamente la cobertura espacial y temporal de la calidad del aire en Chile.

7.3 Nuevos parámetros objetivo para considerar en el monitoreo de MP.

Si bien el MP_{10} y el $MP_{2,5}$ son los contaminantes regulatoriamente normados, existen otros parámetros contenidos dentro de las partículas que también tienen efectos negativos, entre ellos el carbono negro (BC), las partículas ultrafinas e inclusive el polen (alergias). Hoy día existen técnicas de medición avanzadas para algunos de estos parámetros y el seguimiento de ellos se deberían incluir la gestión de

calidad del aire actual con la finalidad de mejorar el conocimiento y enfocar de mejor forma las diferentes medidas de mitigación de las fuentes de emisión responsables.

El monitoreo de parámetros adicionales de partículas sería útil desde un punto de vista científico, y las nuevas directrices de la OMS respaldan esto, ya que recomiendan el monitoreo de partículas ultrafinas, así como de BC y carbono Elemental (EC) (OMS, 2021). Sin embargo, el monitoreo de estos parámetros adicionales requerirá una nueva y extensa estandarización con respecto a los nuevos instrumentos específicos para cada parámetro y se requerirá de costos adicionales de inversiones en monitoreo para nuevos instrumentos. Por lo tanto, puede ser más apropiado sugerir una sinergia de acciones en donde se involucre a la comunidad científica para el monitoreo de estos parámetros más específicos y costosos estableciendo estaciones de tipo “supersite” que incluyen propósitos de tipo investigativo, que ayuden a complementar el monitoreo regulatorio existente y proporcionen nuevas perspectivas sobre la calidad del aire. La instrumentación podría cubrir mediciones para los parámetros adicionales descritos anteriormente, así como para parámetros más avanzados como la composición química de las partículas. Además, debido al amplio arsenal de mediciones, las nuevas tecnologías de observación podrían ser evaluadas y calibradas rápidamente. Los datos más detallados generados por los supersites permitirían a la comunidad científica y a la autoridad ambiental evaluar las necesidades y direcciones futuras de la regulación de la calidad del aire.

Algunos parámetros que se recomiendan incluir en este tipo de “supersitios” son los siguientes:

1. **Partículas ultrafinas:** Estas son partículas de tamaño extremadamente pequeño (menos de 0.1 micrómetros) que pueden penetrar profundamente en los pulmones y tener efectos adversos en la salud. La inclusión de parámetros relacionados con partículas ultrafinas puede proporcionar una mejor comprensión de la calidad del aire y sus impactos.
2. **Compuestos orgánicos volátiles (COV) específicos:** Además de los COV comúnmente medidos para evaluar el nivel de oxidación fotoquímica atmosférica, es recomendable considerar la inclusión de ciertos COV específicos que tienen efectos tóxicos conocidos o que son relevantes para situaciones de contaminación específicas (BTEX). Esto puede ayudar a identificar fuentes de contaminación y evaluar mejor los riesgos para la salud. En este sentido Chile ha avanzado significativamente mediante el D.S. N°5/2023 que establece norma de calidad para COVs-Benceno.
3. **Caracterización química de MP.** Contar con Especiación de los principales contaminantes del MP (orgánicos, inorgánicos y elementos)
4. **Contaminantes atmosféricos relacionados con el cambio climático:** Considerar la inclusión de parámetros relacionados con los contaminantes atmosféricos que contribuyen al cambio climático, como los gases de efecto invernadero y los aerosoles climáticamente activos. Esto ayudaría a abordar la interconexión entre la calidad del aire y el cambio climático.
5. **Contaminantes biológicos (en algunos casos):** Incluir parámetros para monitorear la presencia de contaminantes biológicos en el aire, como bacterias, virus, hongos y alérgenos, que pueden tener efectos en la salud respiratoria y el bienestar general. Usualmente este es un trabajo colaborativo en donde se incluyen equipos de investigación o bien de vigilancia de salud. El

monitoreo se puede realizar en filtros de calidad del aire, aunque hay desarrollo de algunos sensores de polen que pueden ser automatizados.

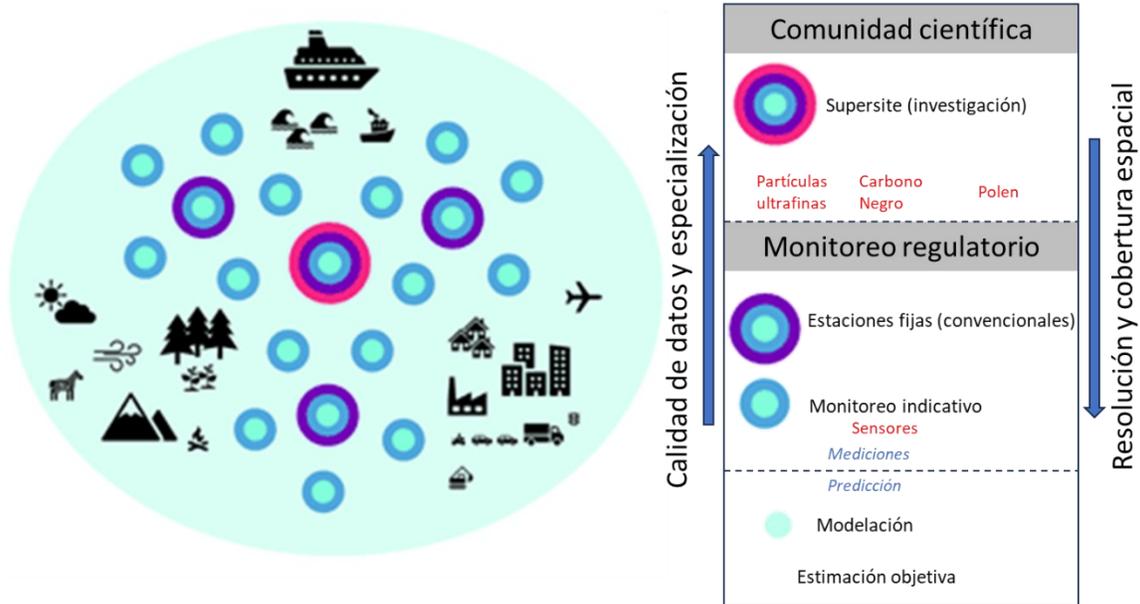


Figura 37: Mapa conceptual del monitoreo de la calidad del aire que combina tanto las mediciones regulatorias como las estaciones de investigación de tipo "supersite".

8 Análisis de la pertinencia de incorporar las concentraciones background en la presente revisión normativa.

Teóricamente hablando, la concentración de fondo (background) de MP_{2.5} atmosférico se refiere a niveles de MP_{2.5} que no están influenciados por actividades antropogénicas. Es una medición clave que entregan las redes de monitoreo especializadas para la elaboración de políticas de estado sobre calidad del aire. Otras definiciones metodológicas indican que la concentración Background corresponde a la suma de la concentración de MP_{2.5} debida a las emisiones de fuentes locales naturales y a fuentes que provienen de otras áreas lejanas (“*long range transport*”). Lo que se busca identificar es el nivel de concentración más bajo de MP_{2.5} al que se podría llegar asumiendo un máximo potencial de reducción de emisiones antropogénicas de MP_{2.5} y precursores. Por lo tanto, el valor de concentración de background representa críticamente un valor de referencia para determinar la influencia de contaminantes remotos y locales.

Este es un aspecto importante para tener en consideración en el estudio. La concentración background de MP_{2.5} se debe a fuentes naturales que siempre estarán presentes y por lo tanto siempre habrá un nivel de concentración mayor que cero. Para el caso de MP_{2.5} estas fuentes naturales pueden corresponder a fuentes como sales marinas, orgánicos secundarios biogénicos, etc.

Conforme con recomendaciones de la OMS, la identificación del background y su posibilidad de transposición de fronteras debe ser considerada a la hora de establecer valores límites. Un aspecto importante es que **las guías OMS no toman en cuenta los valores background de contaminación, ya que están basadas cabalmente en efectos en salud.** En algunos casos hay estándares de calidad del aire que pueden estar corregidos (como el caso de MP₁₀ en Europa²⁴).

Dentro de la revisión de los valores internacionales, en la mayoría de los países no se informa de la cuantificación del aporte background en la definición de los estándares para MP_{2.5}. En el caso de la actualización de la normativa propuesta por la U.S. EPA durante el año 2023, el documento disponible en el registro federal²⁵ que establece un capítulo dedicado al MP background (capítulo 6), define a éste como “cualquier MP formado a partir de emisiones que no sean antropogénicas, es decir, de fuentes naturales o de MP que existiría en ausencia de emisiones antropogénicas o precursores de MP y fuentes transfronterizas que se originan fuera de las fronteras de los EE. UU”. El Informe Policy Assessment for the Reconsideration of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter (EPA 2022) contiene un análisis detallado de lo que significa el MP background para la EPA (sección 2.4). A modo de resumen, se puede establecer la consideración de un background por fuentes naturales y de un background regional producido por el transporte del MP proveniente de otros países (transfronterizo).

²⁴ Artículo 20 de la Directiva de calidad del Aire de la Unión Europea (DIRECTIVE 2008/50/EC), [EUR-Lex - 32008L0050 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj)

²⁵ <https://www.federalregister.gov/documents/2023/01/27/2023-00269/reconsideration-of-the-national-ambient-air-quality-standards-for-particulate-matter>

Si bien el aporte background en los EE.UU. se ha estimado bastante inferior en comparación la contribución antropogénica ($MP_{2.5}$ background anual entre 0,5 y 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se ha determinado que la magnitud y las fuentes pueden variar ampliamente según la región y la época del año. Por ejemplo, los sitios costeros suelen experimentar una contribución constante de MP proveniente del aerosol marino (y en menor medida de sulfato secundario provenientes del dimetilsulfuro²⁶), mientras que otras áreas con mayor cobertura de vegetación suelen verse afectadas por la producción de polen y aerosoles biogénicos, especialmente durante las temporadas de primavera y verano que se asocian a mayor actividad metabólica de las plantas.

Las fuentes MP background también varían según escalas de tiempo. Mientras algunas fuentes, como el aerosol biogénico, varían dependiendo si se estiman a partir de escalas mensuales o estacionales, muchas fuentes background son de naturaleza episódica. Estas fuentes episódicas, por ejemplo, incendios forestales, se pueden caracterizar por contribuciones poco frecuentes y en eventos de alta concentración, que ocurren en períodos de tiempo cortos (horas a días). Tales eventos episódicos son esporádicos y no necesariamente ocurren en todos los años, no obstante, pueden conducir a superaciones del estándar diario de $MP_{2.5}$.

Así, la U.S. EPA establece que las contribuciones en las concentraciones de background en EE.UU. provienen principalmente de fuentes dentro del país (suspensión de polvo de desierto, sal marina y oxidación de terpenos biogénicos). Sin embargo, también se han documentado eventos intercontinentales, por ejemplo, el transporte de tormentas de polvo que ocurren en el desierto del Sahara, aunque estos eventos son menos frecuentes y representan una fracción mínima del MP background. Por ello, el raciocinio de la EPA para establecer el nuevo estándar es que el nivel de $MP_{2.5}$ a regular se debe orientar no en concentraciones background, o en un estándar de “cero riesgo”, sino más bien en un valor que permita reducir el riesgo a un nivel suficiente para proteger la salud pública, incluyendo a grupos sensibles, dentro de un margen adecuado de seguridad. Cabe mencionar que, en el Informe antes mencionado, se comenta que la EPA puede considerar “la proximidad relativa a concentraciones de fondo” como un factor para decidir cómo revisar la norma primaria de calidad del aire, dentro del rango de valores razonables respaldados por los criterios científicos.

Para el caso de Chile, en la actualización de la normativa se podría seguir el ejemplo de la U.S. EPA, y para ello en primer lugar se sugiere que el texto regulatorio considere la definición del nivel “background natural”, que a modo de ejemplo se puede entender localmente como toda contribución de $MP_{2.5}$ que no proviene de la acción humana, es decir, el aporte que se origina naturalmente producto de erosión del suelo (polvo en suspensión), formación secundaria de MP por COVs biogénicos, o bien contribución de sal marina, factor que resulta considerable en la mayoría de las ciudades costeras, y que incluso se ha evidenciado que llegan a formar parte del MP en ciudades más alejadas de la línea de costa. Este último factor se ha determinado en variados estudios científicos desarrollados

²⁶ El dimetil sulfuro se emite por el mar y es la fuente natural más importante que contribuye al azufre en la atmósfera.

anteriormente, y en los cuales se estima que puede alcanzar entre el 5 al 16% del MP2.5 (estudios Contribución por Fuentes: Jorquera et al., 2008, Barraza et al., 2017). También resulta conveniente que se defina el concepto de “background regional”, que incluye todo el MP producido a larga distancia y que pueda alcanzar los sitios de medición, como, por ejemplo, sulfatos secundarios producidos por actividades industriales.

Así como destaca la EPA en su informe,²⁷ estimar el nivel background es complejo. Muchos de los procesos implicados en la biogénica y la formación de orgánicos secundarios no son simples de resumir y los mecanismos químicos no son del todo conocidos. Para esto se pueden usar técnicas de radiocarbono en muestras de material particulado, para distinguir las fracciones de carbono modernas (biogénicas o incendios) de las fósiles (antropogénicas) que componen el aerosol orgánico.

Para estimar el nivel background se puede seguir el método usado en Estados Unidos, para el cual es importante contar con estaciones remotas o localizadas en sitios sin impacto de fuentes humanas (estaciones background). En estas estaciones se colecta MP y se envía a análisis químico para especiación de elementos (fluorescencia de rayos X) con el objeto de determinar la contribución de polvo mineral y sal marina. La especiación también considera la determinación de sulfato de amonio, que, a criterio de la EPA, fue observado en este tipo de sitios como resultado de las emisiones antropogénicas de largo alcance. En el caso de las contribuciones de nitrato de amonio y carbono elemental, se estima que pueden provenir de fuentes antropogénicas o fuentes naturales, pero juntos suelen representar menos de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en EE.UU. Cabe mencionar que, en el caso de Chile, las redes de monitoreo de calidad del aire para MP2.5 están localizadas en zonas urbanas y no se cuenta con estaciones de tipo background, las cuales podrían ser incorporadas como una exigencia en la revisión de la norma, de forma tal de contar con esta información para el próximo proceso de revisión.

Existen varios métodos para estimar el nivel background de MP_{2.5}, éstos incluyen:

- 1) **Balance de masa química (CMB):** es un modelo de receptor que estima las contribuciones de diferentes fuentes a MP2.5. Para ello requiere un análisis de composición química de las muestras. Luego de aplicar el CMB se identifican las fuentes de MP2.5 y se estima sus contribuciones a la masa total. La masa restante se considera como el aporte background o de fondo.
- 2) **Modelos de receptor híbrido:** estos modelos utilizan modelos de receptor y de dispersión para estimar el nivel background. Con este modelo se pueden separar las contribuciones de fuentes locales y regionales y estimar los niveles de fondo.
- 3) **Análisis de trayectoria:** el análisis de trayectoria implica identificar la trayectoria inversa de la masa de aire, lo que proporciona información sobre el origen de la masa de aire y las fuentes de MP2.5. Al analizar la trayectoria, es posible estimar el nivel de fondo de MP2.5 (el aporte regional o de larga distancia).
- 4) **Modelo estadístico:** la modelación con métodos estadísticos involucra el uso de modelos de regresión para relacionar las concentraciones de MP2.5 con variables meteorológicas y otros factores. Al analizar los residuos del modelo, es posible estimar el nivel de fondo de MP2.5.

²⁷ [Federal Register :: Reconsideration of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter](#)

- 5) **Modelación de "zero-out"**: implica el uso de modelos de calidad del aire para estimar el nivel de fondo mediante la simulación de un escenario donde todas las fuentes locales de MP2.5 se eliminan. En este proceso se realizan dos modelaciones regionales, una donde se incluyen las fuentes locales en un área urbana de interés, y otra modelación que se realiza para las fuentes locales en esa área urbana si se pusieran a emisión cero. En otras palabras, para obtener información sobre las concentraciones background, se comparan las dos simulaciones: una para el caso base, en la que se incluyen todas las fuentes de emisión; y uno en el que se excluyen las emisiones utilizadas en el modelo a escala local, que se refiere como el enfoque de "cero" que estima las concentraciones de fondo (Theobald et al., 2019).

9 Diagnóstico del cumplimiento normativo determinado en las zonas que encontrarían latencia y saturada. Estimación del número de episodios de emergencia ambiental para un año tipo.

9.1 Zonas Saturadas/Latentes

En Chile, hasta el año 2021 se han establecido o están en proceso de implementación 27 instrumentos de descontaminación de calidad del aire (zonas saturadas/Latentes, Planes de descontaminación, Tabla 23). Estos planes rigen en 147 comunas del país. A raíz de la implementación de la norma de $MP_{2,5}$ y de MP_{10} lo que ha ido ocurriendo es que en el norte solamente existan planes reducidos en escala territorial, y prácticamente desde la región de Valparaíso hasta Los Lagos los planes se han ido transformando en macrozonas que abarcan todo el sector central del valle. Esto se debe a que los planes del norte están enfocados en el control de la fracción gruesa del MP_{10} , y por fuerzas gravitacionales, tiene un alcance territorial significativamente menor a las partículas más finas, debido a su menor tiempo de residencia atmosférica. Además, los planes del norte tienen una naturaleza más bien enfocada al control de megafuentes industriales (mineras, por ejemplo). En cambio, en la zona sur, la principal fuente es la quema de leña, que tiene una cobertura territorial más extensa. Aquí es donde se encuentran la mayoría de las 147 comunas que tienen plan o están en vías de tenerlo, y representan casi el 70% de la población de Chile, lo que evidencia la relevancia de estos instrumentos para mejorar la calidad del aire y la calidad de vida de las personas.

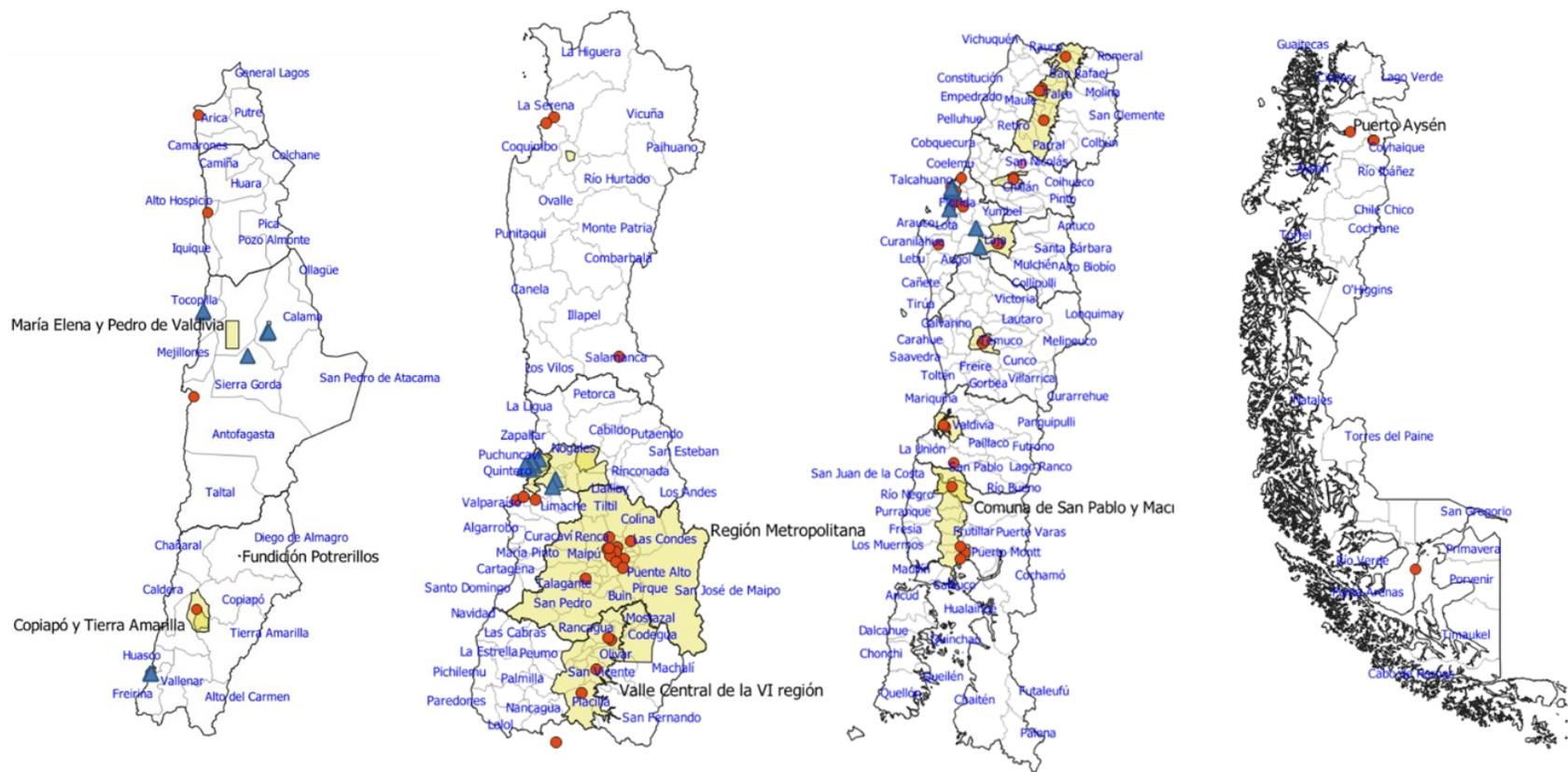


Figura 38: Amarillo: Zonas Saturadas/Latente por $MP_{10}/MP_{2.5}$ en Chile. Puntos de color rojo indican estaciones de calidad del aire públicas. Triángulos azules estaciones de calidad del aire privadas. Se indican los nombres de las comunas en color azul

Tabla 23: Zonas de interés.

N°	Zona	Nombre	Año	Plan Publicado Diario Oficial	descripción	Declarado saturada/latente	Estado del Plan
1	Calama	D.S. N°5/2021 del MMA	2021	2022	Plan de Descontaminación Atmosférica para ciudad de Calama y su área circundante por MP ₁₀	Saturado MP ₁₀	Anulado por el primer tribunal ambiental (7 junio 2023).
2	Tocopilla	D.S. N° 70/20 ₁₀ MINSEGPRES PDA Tocopilla	2010	2010	Plan de descontaminación atmosférica de Tocopilla y su zona circundante.	Saturado MP ₁₀	Vigente
3	Huasco	D.S. N°38/2016 MMA PPA Huasco	2016	2017	Establece plan de prevención de contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante	Latente MP ₁₀	Vigente
4	Copiapó y Tierra Amarilla					Saturado MP ₁₀	Elaboración
5	Andacollo	D.S. N° 59/2014 MMA PDA Andacollo y sectores aledaños	2014	2014	Plan de descontaminación atmosférica para la localidad de Andacollo y sectores aledaños.	Saturado MP ₁₀	Vigente
6	Concón-Quintero-Puchuncaví	D.S. N°105/2018 MMA PPDA CQP	2018	2019	Plan de prevención y descontaminación atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví	Saturado MP _{2,5} Latente MP ₁₀	Vigente
7	Catemu – Otras Comunas					Saturado MP ₁₀ – Latente SO ₂	Elaboración, aprobado por el CMS y CC.
8	Región Metropolitana	D.S. N°31/2017 del MMA	2017	2017	Plan de Prevención y Descontaminación	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5} /Ozono Latente NO ₂	En revisión

N°	Zona	Nombre	Año	Plan Publicado Diario Oficial	descripción	Declarado saturada/latente	Estado del Plan
					Atmosférica para la Región Metropolitana		
9	Valle Central O'Higgins	D.S. N°1/2021 MMA PDA para el Valle Central VI Región	2013	2013	Plan de descontaminación atmosférica para el Valle Central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Revisión
10	Curicó	D.S. N° 44/2017 MMA PDA Curico	2017	2018	Establece Plan de descontaminación para el valle central de la provincia de Curicó	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Revisión
11	Talca-Maule	D.S. N°49/2015 MMA PDA Talca y Maule	2015	2015	Plan de descontaminación atmosférica para las comunas de Talca y Maule.	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Revisión
12	Valle Central Región Maule					Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	En elaboración
13	Chillán-Chillán Viejo	D.S. N°48/2015 MMA PPDA Chillán y Chillán Viejo	2015	2015	Plan de prevención y descontaminación atmosférica para las comunas de Chillán y Chillán Viejo.	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Revisión
14	Concepción Metropolitano	D.S. N°6/2018 MMA PPDA Concepción Metropolitano	2018	2019	Plan de prevención y descontaminación atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitano	Saturado MP _{2,5} Latente MP ₁₀	Vigente

N°	Zona	Nombre	Año	Plan Publicado Diario Oficial	descripción	Declarado saturada/latente	Estado del Plan
15	Los Ángeles	D.S. N°4/2017 MMA PDA Los Ángeles	2017	2018	Establece Plan de descontaminación atmosférica para la comuna de Los Ángeles	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Vigente
16	Temuco – Padre Las Casas	D.S. N°8/2015 MMA PDA Temuco y Padres Las Casas	2015	2016	Establece Plan de Descontaminación Atmosférica por MP _{2,5} para las comunas de Temuco y Padre Las Casas y de Actualización del Plan de Descontaminación por MP ₁₀ para las mismas comunas	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Revisión. Actualmente se encuentra aprobada su revisión por el CMS y CC, DS 8/2023
17	Valdivia	D.S. N°25/2016 MMA PDA Valdivia	2016	2017	Plan de descontaminación atmosférica para la comuna de Valdivia.	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Vigente
18	Osorno	D.S. N°47/2015 MMA PDA Osorno	2015	2016	Plan de descontaminación atmosférica para la comuna de Osorno.	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Revisión
19	Macrozona Norte Región Los Lagos					Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Elaboración
20	Puerto Aysén					Saturado MP _{2,5}	Elaboración
21	Coyhaique	D.S. N°07/2018 MMA PDA Coyhaique	2018	2019	Plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante.	Saturado MP ₁₀ /MP _{2,5}	Vigente
22	Chuquicamata	D.S. N° 206/2000 MINSEGPRES PDA Fundición Chuquicamata	2000	2000	Plan de descontaminación atmosférica para la zona circundante a la Fundición Chuquicamata de la División	Saturado	Vigente

N°	Zona	Nombre	Año	Plan Publicado Diario Oficial	descripción	Declarado saturada/latente	Estado del Plan
					Chuquicamata de Codelco Chile.		
23	Maria Elena y Pedro de Valdivia	D.S. N°164/1998 MINSEGPRES PDA María Elena y Pedro de Valdivia	1998	1998	Plan de descontaminación atmosférica para las localidades de María Elena y Pedro de Valdivia.	Saturado	Vigente
24	Potrerrillos, El Salvador	D.S. N° 179/1998 MINSEGPRES PDA Fundición de Potrerillos División Salvador	1998	1998	Plan de descontaminación atmosférica para la zona circundante a la Fundición de Potrerillos de la División Salvador Codelco Chile.	Saturado	Vigente
25	Caletones	D.S. N° 81/1998 MINSEGPRES PDA Fundición Caletones División El Teniente	1998	1998	Plan de descontaminación atmosférica para el área circundante a la Fundición de Caletones de la División El Teniente de Codelco Chile.	Saturado	Vigente
26	Hernán Videla	D.S. N° 180/1994 MINSEGPRES PDA Fundición Hernán Videla	1994	1998	Plan de descontaminación de la Fundición Hernán Videla Lira de ENAMI.	Saturado	Vigente

Se han utilizado los siguientes criterios para definir diferentes escenarios normativos que pudiesen estar presentes en Chile producto de la actualización de la Norma de MP_{2,5}.

- Principio de no regresión, es decir, no se pueden establecer niveles menos exigentes que los actuales.
- Nivel de avance en la implementación de las actuales medidas de los Planes de descontaminación.
- Nivel de cumplimiento actual de la norma a nivel nacional.
- Población expuesta a valores sobre los límites predefinidos.
- Guías de la OMS publicadas el año 2022.
- Costos de cumplimiento para cada uno de los escenarios propuestos.
- Factibilidad técnica.
- Normativa utilizada en otros países con economías equivalentes.
- Para la definición de los niveles que generan episodios de contaminación atmosférica, se revisaron los valores establecidos en las respectivas normas internacionales (UE, EEUU, México, etc).

Respecto de las guías de la OMS, cabe resaltar que establece la definición de los niveles guías de calidad del aire de largo plazo en base a la exposición de largo plazo más baja encontrada en los estudios de metaanálisis. Los valores de estos niveles están elaborados en base promedios anuales para el caso de MP_{2,5}. El punto de partida es el percentil 5 de la distribución de exposición encontrada en los estudios con los niveles más bajos.

No obstante, la definición de los niveles para la exposición a corto plazo se basa a partir de los valores de largo plazo. Para el caso de MP_{2,5}, los valores de corto plazo se expresan en promedios diarios. Esto se debe a que los valores diarios y horarios varían significativamente a lo largo del año, influido principalmente por las condiciones meteorológicas. Suelen distribuirse en una forma log-normal. Por el contrario, la variación de la concentración en el largo plazo está regida por la variación espacial de la concentración y por los cambios de las fuentes emisoras predominantes.

Si los niveles guías de calidad del aire estuviesen definidos en base a la exposición de corto plazo en un procedimiento análogo a los estándares de largo plazo, entonces los valores de corto plazo serían más bajos que los valores de largo plazo. Por lo tanto, el procedimiento de la OMS es utilizar los percentiles más altos diarios de los valores diarios para establecer los valores a corto plazo. La razón por la cual seleccionar percentiles en lugar de valores máximos es que los percentiles son estadísticamente más estables que los valores máximos.

En aquellos lugares en donde las concentraciones diarias son más bajas que los niveles anuales guías, habrá muchos días en donde la concentración diaria estará bajo el estándar anual, por ende, hay pocos días en donde la población está vulnerable a efectos en salud.

En el caso de MP_{2,5}, la magnitud de los efectos en salud asociados con la variación en la exposición en el largo plazo es más significativos (mayores) que los asociados con la exposición en el corto plazo. Así, los estándares de largo plazo protegen más que los de corto plazo. Esta es la justificación para la

utilización de los niveles guías anuales para se usa determinar los niveles diarios, tomando en cuenta que los efectos en salud son los mismos.

En el año 2005 la OMS utilizó la relación $P99/annual=2,5$ para derivar la guía diaria. En la última actualización la relación es $P99/annual=3$, que está basada en nuevas bases de datos que se sometieron a revisión, mientras que la relación entre $P99/annual$ para los valores intermedios varía entre 2 y 2,5.

En Nazarenko et al., 2021 se encuentra una revisión de los estándares disponibles de $MP_{2,5}$ en el mundo entero que se encuentra actualizado hasta el año 2020. Se incluye información de 58 países que entrega un rango amplio de evaluación que van desde los 20 minutos (Rusia, $160 \mu g/m^3$), 24 horas, anual y trianual.

Para el estándar anual los valores se encuentran en el rango entre 8 (Australia) y $50 \mu g/m^3$ (Egipto). El límite actual de Chile es $20 \mu g/m^3$ y existen varios países que tienen estándares más bajos (Sudáfrica, Argentina, Bolivia, Canadá, República Dominicana, Ecuador, El Salvador, México, Paraguay, Perú, Trinidad y Tobago, Estados Unidos de América, Bangladesh, Noruega, Suiza, Pakistán, Arabia Saudita, Australia, China, Taiwán, Japón, República de Corea, Singapur), con valores más frecuentes entre 12 y $15 \mu g/m^3$ (Figura 39).

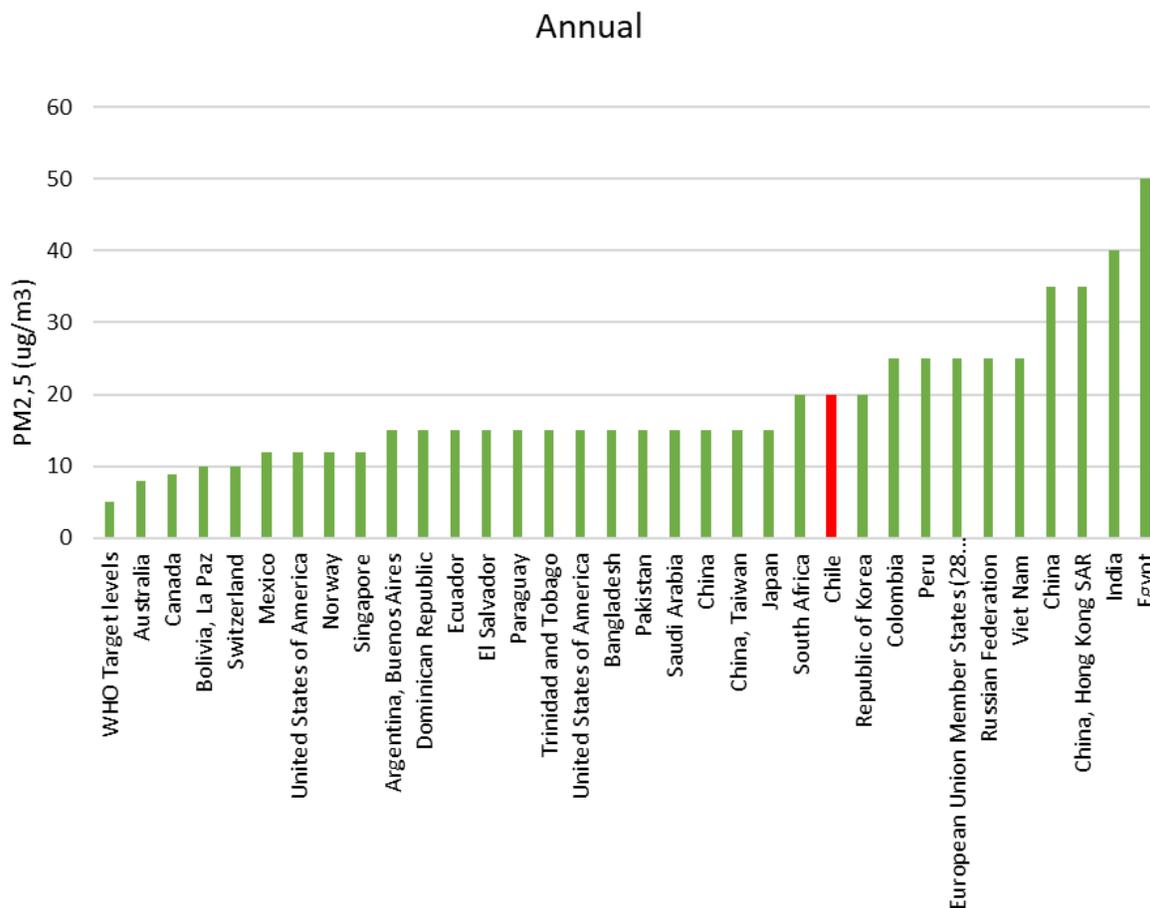


Figura 39: Valores de estándar anual en diversos países. Fuente: Nazarenko et al., 2021.

Respecto del estándar de 24 horas (o diario), los valores en el mundo varían entre 25 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; entre los países que tienen valores más estrictos que Chile (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) destacan Sudáfrica, Bolivia, Canadá, México, Paraguay, Perú. Estados Unidos de América, Estados miembros de la Unión Europea (28 países), Ucrania, Noruega, Rusia, Pakistán, Australia, China, Taiwán, Japón y Singapur. Australia, Canadá, Perú y Bolivia tienen los valores más bajos (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), en tanto que nuevamente Egipto tiene los valores más altos (80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Cabe mencionar que en Europa solamente Rusia tiene un estándar de 24 horas.

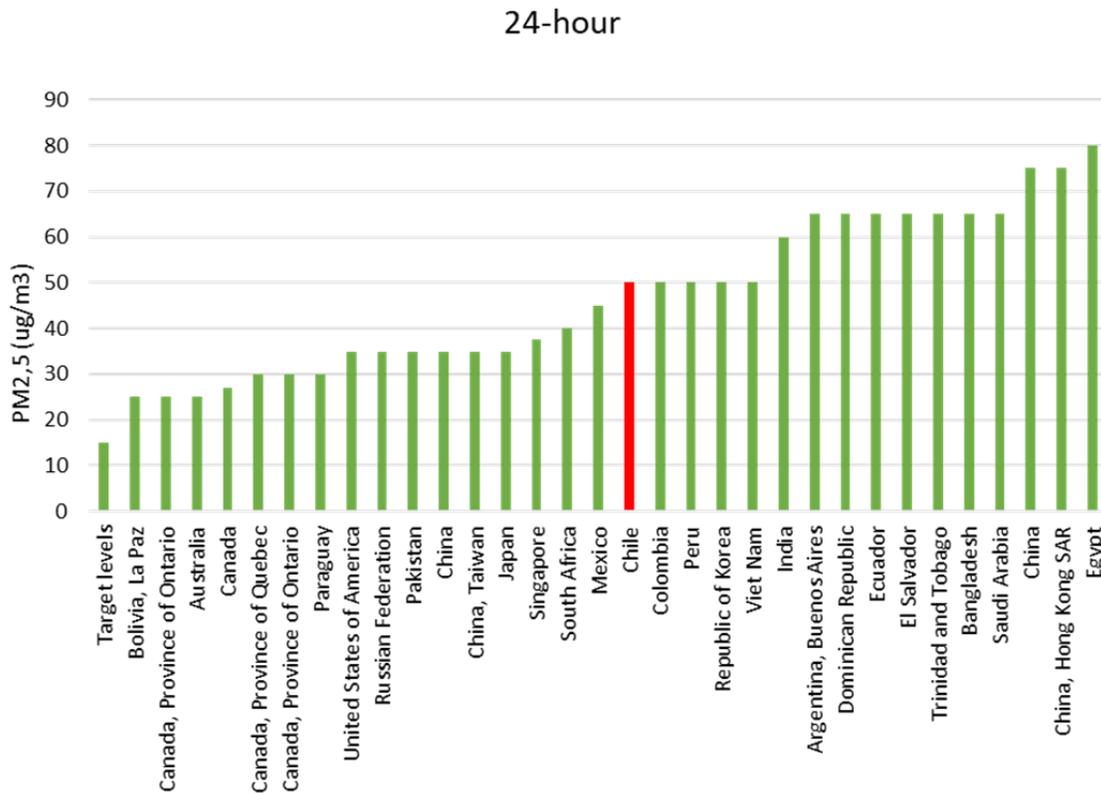


Figura 40: Valores de estándar diario de 24 horas en diversos países. Fuente: Nazarenko et al., 2021.

Basados en las referencias destacadas y en los niveles actuales de $MP_{2,5}$ en nuestro país, se definieron los siguientes escenarios:

- El **primer escenario** corresponde a la evaluación de los esfuerzos necesarios para alcanzar el cumplimiento de la **norma vigente**. No se puede perder de vista que la norma actual no se cumple en las principales ciudades desde la Región Metropolitana al sur. Por lo anterior, es importante que el primer escenario permita dimensionar los costos/beneficios de cumplir con la norma que está vigente desde 2012. Cabe recordar que tanto la norma anual y como la norma diaria actuales aún se superan ampliamente, por lo cual es relevante evaluar como primer escenario alcanzar el cumplimiento.
- El **segundo escenario** corresponde a la **meta intermedia 3 que recomienda la OMS**. Actualmente la norma vigente en Chile es más exigente que la meta intermedia 2, por lo cual avanzar hacia la meta 3 es un esfuerzo significativo en ambos parámetros (diario y anual).
- El **tercer escenario** corresponde a la **norma vigente en Estados Unidos**, revisada el 2020 sin modificaciones. Representa una reducción significativa de los parámetros diario y anual.

- El **cuarto y último escenario** representa una reducción del 50% de los valores actuales de la norma (diario y anual). Corresponde a la **meta 4 propuesta por la guía OMS** publicada el 2021. También corresponde a la propuesta que está evaluando la Unión Europea, norma en revisión que actualmente no cuenta con parámetros diario y que el límite anual es más laxo que el de Chile.

Tabla 24: Valores y escenarios de evaluación propuestos.

Tipo	UE	USEPA	OMS	Escenario
Anual	-	-	35 µg/m ³ (a)	
Anual	-	-	25 µg/m ³ (b)	
Anual	20 µg/m ³ (c)	-	-	Escenario 1
Anual	-	-	15 µg/m ³ (d)	Escenario 2
Anual	-	12 µg/m ³ (e)	-	Escenario 3
Anual	-	-	10 µg/m ³ (f)	Escenario 4
Anual	-	-	5 µg/m ³ (g)	
24 horas	-	-	75 µg/m ³ (h)	
24 horas	-	-	50 µg/m ³ (i)	Escenario 1
24 horas	-	-	37,5 µg/m ³ (j)	Escenario 2
24 horas	-	35 µg/m ³ (k)	-	Escenario 3
24 horas	-	-	25 µg/m ³ (l)	Escenario 4
24 horas	-	-	15 µg/m ³ (m)	

a): OMS anual Intermedio 1; (b): OMS anual Intermedio 2; (c): Promedio anual de 3 años con intención de avanzar hacia recomendaciones OMS al año 2030 (35 µg/m³); (d): OMS anual Intermedio 3; (e): Promedio anual 3 años, con intención de avanzar hacia un valor entre el rango 8-11 µg/m³; (f): OMS anual Intermedio 4; (g): Anual (Valor Guía); (h): OMS Percentil 99 (Intermedio 1); (i): OMS Percentil 99 (Intermedio 2); (j): OMS Percentil 99 (Intermedio 3); (k): Percentil 98, promedio en tres años. Eventualmente se puede disminuir a 25 µg/m³; (l): OMS Percentil 99 (Intermedio 4); (m): OMS Percentil 99 (Valor guía)

Al considerar estos valores, se puede observar que un aumento en el escenario actual al escenario 2 deja que algunas zonas del Norte como Tocopilla, Copiapó y Huasco entren en condición de Latencia. Aumentando la exigencia al escenario 3 queda ya todo el territorio nacional queda en condición de Latencia o Saturación. El último escenario deja a todo el país prácticamente en condición de Saturación, como se ilustra en la Tabla 25.

Tabla 25: Evaluación de escenarios. Se utilizó información de todas las estaciones disponibles, no solo las EMRP, con la finalidad de tener mayor representatividad espacial.

Nombre región	Nombre Provincia	Población 2021	Norma Anual 2021-2019	Norma Diaria 2021	Chile Anual (20)	Chile Diaria (50)	OMS 3 Anual (15)	OMS 3 Diaria (37,5)	EPA Anual (12)	EPA Diaria (35)	OMS 4 Anual (10)	OMS 4 Diario (25)
Arica y Parinacota	Arica	252.034	11	19	57%	37%	76%	50%	96%	53%	115%	74%
Tarapacá	Iquique	361.212	11	21	56%	41%	74%	55%	93%	59%	111%	83%
Antofagasta	Antofagasta	464.458	11	24	53%	47%	71%	63%	89%	68%	106%	95%
	El Loa	204.301	10	26	50%	52%	66%	69%	83%	74%	99%	103%
	Tocopilla	34.987	14	31	72%	62%	96%	83%	120%	88%	144%	124%
Atacama	Copiapó	207.239	12	26	60%	51%	80%	69%	100%	73%	119%	103%
	Huasco	82.091	15	29	76%	58%	101%	77%	126%	83%	151%	116%
Coquimbo	Elqui	567.232	12	31	59%	62%	79%	82%	99%	88%	118%	124%
	Choapa	95.474	s.i.	11	s.i.	22%	s.i.	29%	s.i.	31%	s.i.	43%
Valparaíso	Valparaíso	816.244	16	55	81%	111%	108%	148%	135%	158%	162%	222%
	Quillota	221.082	s.i.	52	s.i.	105%	s.i.	139%	s.i.	149%	s.i.	209%
Metropolitana de Santiago	Santiago	6.075.403	29	107	144%	213%	193%	284%	241%	305%	289%	427%
	Cordillera	705.084	22	60	109%	120%	145%	160%	182%	172%	218%	241%
	Talagante	343.209	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.
Libertador General Bernardo O'Higgins	Cachapoal	712.411	26	103	129%	205%	172%	273%	215%	293%	258%	410%
	Colchagua	239.520	21	82	106%	164%	141%	218%	177%	234%	212%	327%
Maule	Talca	454.238	27	124	133%	249%	178%	331%	222%	355%	267%	497%
	Curicó	316.202	24	93	121%	186%	162%	248%	202%	265%	243%	372%
	Linares	310.813	28	138	140%	276%	186%	368%	233%	394%	279%	551%
Ñuble	Diguillín	344.251	29	144	145%	289%	194%	385%	242%	413%	291%	578%
Biobío	Concepción	1.068.338	26	105	128%	211%	170%	281%	213%	301%	256%	422%
	Arauco	176.990	20	79	100%	158%	134%	210%	167%	225%	201%	315%
	Bíobío	425.262	28	179	139%	358%	185%	477%	232%	511%	278%	716%
La Araucanía	Cautín	803.872	37	161	184%	322%	245%	429%	307%	460%	368%	643%

Nombre región	Nombre Provincia	Población 2021	Norma Anual 2021-2019	Norma Diaria 2021	Chile Anual (20)	Chile Diaria (50)	OMS 3 Anual (15)	OMS 3 Diaria (37,5)	EPA Anual (12)	EPA Diaria (35)	OMS 4 Anual (10)	OMS 4 Diario (25)
Los Ríos	Valdivia	309.728	28	114	142%	228%	189%	304%	237%	326%	284%	456%
	Ranco	98.090	25	111	125%	223%	167%	297%	209%	318%	250%	446%
Los Lagos	Llanquihue	447.281	27	152	134%	303%	179%	404%	224%	433%	269%	606%
	Osorno	248.663	34	180	171%	360%	228%	480%	285%	514%	342%	720%
Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	Coyhaique	62.415	39	253	197%	506%	263%	674%	329%	723%	394%	1012%
	Aysén	32.534	23	68	116%	135%	155%	180%	194%	193%	233%	270%
Magallanes y de la Antártica Chilena	Magallanes	144.350	5	9	23%	18%	30%	24%	38%	26%	45%	36%
16	31	16.625.008										

9.2 Análisis Niveles de contingencia (Episodios)

El nivel de excedencia de $MP_{2.5}$ se refiere al umbral en el que la concentración de partículas en el aire supera los límites aceptables o regulados por los estándares de calidad del aire. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) son dos fuentes de referencia común para estos límites. En el caso de la OMS, se consideran varios criterios clave, que incluyen: estudios epidemiológicos, toxicológicos y clínicos que evalúan los impactos sobre la salud a la exposición a $MP_{2.5}$. Consideran los efectos tanto a corto como a largo plazo, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares, disminución de la función pulmonar y aumento de la mortalidad. Otros antecedentes que utiliza la OMS y otras agencias ambientales para definir valores de excedencia consideran:

- **Función exposición-respuesta:** se evalúa la relación entre las concentraciones de $MP_{2.5}$ y los efectos observados en la salud. Esto ayuda a determinar los niveles en los que es probable que se produzcan efectos adversos.
- **Escalas temporales:** Se pueden establecer valores de excedencia para diferentes periodos de tiempo, como promedios de 24 horas (exposición de corto plazo) y promedios anuales (exposición de largo plazo). Esto se debe a que los efectos sobre la salud pueden variar según la duración de la exposición.
- **Incertidumbre científica:** las instituciones incorporan márgenes de seguridad para dar cuenta de las incertidumbres en la evidencia científica, como limitaciones en los datos disponibles o lagunas en el conocimiento.
- **Factibilidad y practicidad:** al establecer valores de excedencia, las organizaciones pueden considerar la viabilidad de implementar y lograr estos estándares, teniendo en cuenta los avances tecnológicos, las consideraciones económicas y la efectividad de las medidas de control.
- **Revisión de los estándares existentes:** las organizaciones internacionales a menudo revisan y actualizan sus pautas en función de nueva evidencia científica o avances en la gestión de la calidad del aire.

A nivel internacional se observa que los niveles de excedencia se enfocan en los efectos agudos del $MP_{2.5}$, es decir por exposiciones que se relacionan a periodos cortos de tiempo. En el caso de la EPA de EE.UU., se han establecidos los índices AQI (Air Quality Index) mediante los cuales se puede evaluar la calidad del aire en general. Estos valores son utilizados para referenciar niveles que suponen riesgos en salud, especialmente en individuos que pertenecen a poblaciones sensibles, como por ejemplo recién nacidos, adultos mayores o personas con enfermedad respiratoria. De hecho, la EPA no tiene una definición formal de una persona sensible, sin embargo, se conoce por estudios científicos de que existe una variabilidad inter-individuos respecto a las distintas respuestas que pueda provocar la contaminación del aire. Por ejemplo, dos personas podrían responder de manera diferente al mismo nivel de contaminación; una persona con asma puede experimentar problemas respiratorios y ser

susceptible a un ataque de asma, mientras que otro asmático expuesto al mismo nivel puede no reaccionar en lo absoluto²⁸.

Así los niveles de excedencia, o índices de calidad del aire, se originan como una forma de advertir a las personas altamente sensibles sobre la posibilidad de tener una reacción negativa producto de un empeoramiento en la calidad del aire. Esto se evidencia en el documento “Guidance for Inhalation Exposures to Particulate Matter” [9] año 2022, de la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR), del Departamento de Salud y Servicios Humanos de Estados Unidos, en la cual se utilizan los siguientes criterios para categorizar los distintos niveles de excedencias en concentración de MP:

- Definición de grupo sensible/altamente sensible
- Evidencias de efectos sobre la salud
- Categoría AQI y rangos de MP asociados

Se considera que las personas de menores recursos económicos tienen mayor incidencia en ser un grupo sensible de la población, debido a que tienen menor acceso a la atención médica y suelen vivir en áreas proclives a mayores niveles de MP, por ejemplo, en cercanía a grandes carreteras o industrias (Pratt et al. 2015).

Cabe recalcar que el AQI es una herramienta usada por la EPA para categorizar las amenazas en salud, respecto a la calidad del aire, en tiempo real y a nivel local. Por lo mismo solicita a cada ciudad con más de 350 mil habitantes que deben mantener una plataforma en internet para indicar la calidad del aire en tiempo real, basado en este sistema de clasificación.

También es importante señalar que ni la EPA ni la OMS han desarrollado estándares o directrices para exposiciones de MP que consideren una duración inferior a 24 horas. Sin embargo, la misma EPA señala que los estándares de 24 horas son comparables con duraciones tan cortas como de 1 hora (para términos de evaluar un potencial daño en la salud).

En general, se definen estos valores para poblaciones susceptibles, es decir, el grupo de población con mayor sensibilidad de, como niños, ancianos y personas con afecciones respiratorias o cardiovasculares preexistentes.

²⁸ https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-63760-9_16

Tabla 26: Niveles de excedencia para MP_{2.5} en EEUU

Categoría	Concentración de MP _{2.5} en 24 horas (µg/m ³)	Conclusión sobre exposición en este rango	Recomendación
Bueno	0 – 12	Ninguna	Ninguna
Moderado	12.1 – 35.4	<ul style="list-style-type: none"> • Síntomas respiratorios en individuos inusualmente sensibles • Exacerbación de enfermedad cardiorrespiratoria 	Personas inusualmente sensibles debe considerar reducir ejercicio fuerte o prolongado
No saludable para grupos sensibles	35.5 – 55.4	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de síntomas respiratorios en grupos sensibles • Exacerbación de síntomas o muerte por enfermedad cardiorrespiratoria preexistente 	Personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, adultos mayores, niños y personas de menor nivel socioeconómico deberían reducir el ejercicio intenso.
No saludable	55.5 – 150.4	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor probabilidad de síntomas respiratorios en grupos sensibles • Exacerbación de síntomas o muerte por síntomas preexistentes • Mayor probabilidad de efectos respiratorios en el público en general. 	Personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, adultos mayores, niños y personas de menor nivel socioeconómico deben evitar esfuerzo físico pesado; todos los demás deberían reducir el esfuerzo prolongado o pesado
Muy no saludable	150.5 – 250.4	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor probabilidad de síntomas respiratorios en grupos sensibles • Exacerbación significativa de los síntomas o muerte por enfermedad cardiopulmonar preexistente • Aumento significativo de los efectos respiratorios en la población general 	Personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, adultos mayores, niños y personas de menor nivel socioeconómico deben evitar todo tipo de actividad física al aire libre. Todos los demás deben evitar el esfuerzo prolongado o intenso.
Peligroso	250.5– 500.4	<ul style="list-style-type: none"> • Empeoramiento grave de los síntomas respiratorios en grupos sensibles • Exacerbación grave de los síntomas o muerte por síntomas preexistentes. • Riesgo grave de efectos respiratorios en la población general. 	Todos deben evitar toda actividad física. Personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, adultos mayores, niños y personas de menor nivel socioeconómico deben permanecer en el interior de los hogares y mantener bajos los niveles de actividad física

Tabla 27: Niveles de excedencia para $MP_{2,5}$ en Chile. *Cada Plan de Descontaminación en Chile puede tener medidas adicionales.

Nivel	Norma Actual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Recomendaciones*
Bueno	0	50	No se requieren acciones o recomendaciones específicas. El aire se considera limpio y seguro para la población en general.
Regular	51	79	Se recomienda a las personas sensibles, como aquellas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares, limitar las actividades al aire libre y evitar la exposición prolongada en áreas con alta concentración de contaminantes. También se aconseja a la población en general estar atenta a posibles cambios en la calidad del aire y seguir las recomendaciones de las autoridades locales.
Alerta	80	109	Se aconseja a la población en general, y especialmente a grupos sensibles, reducir la exposición al aire libre, evitar realizar actividades físicas intensas al aire libre y protegerse utilizando mascarillas adecuadas si es necesario.
Preemergencia	110	169	Se aconseja a la población en general, y especialmente a grupos sensibles, reducir la exposición al aire libre, evitar realizar actividades físicas intensas al aire libre y protegerse utilizando mascarillas adecuadas si es necesario.
Emergencia	170	500	Se pueden tomar medidas más estrictas, como la suspensión de actividades escolares, restricciones de movilidad o evacuaciones. Se recomienda a la población permanecer en interiores, cerrar ventanas y puertas, utilizar purificadores de aire si es posible y seguir las instrucciones y recomendaciones de las autoridades de manera estricta.

La Figura 41 compara los niveles de excedencia vigentes en Chile y EEUU. La mayor diferencia está relacionada con las categorías definidas: en el caso de EEUU hay 6 que se denominan i) bueno, ii) moderado, iii) no saludable para grupos sensibles, iv) No saludable, v) muy no saludable y vi) peligroso. En el caso de Chile, el ICAP define 5 niveles i) Bueno, ii) Regular, iii) Alerta, iv) Preemergencia y v) Emergencia. La mayor diferencia es que el nivel “Bueno en Chile incorpora los casi tres primeros niveles de la USEPA. Los niveles “Regular”, “Alerta” y “Preemergencia” de Chile se ubican prácticamente en el rango “No Saludable” de la USEPA, y en tanto que el nivel de “Emergencia” se ubica en los dos últimos

rangos de la USEPA. Al respecto se podría incorporar una corrección en el proceso de revisión de la norma, de forma tal de corregir estas categorías.

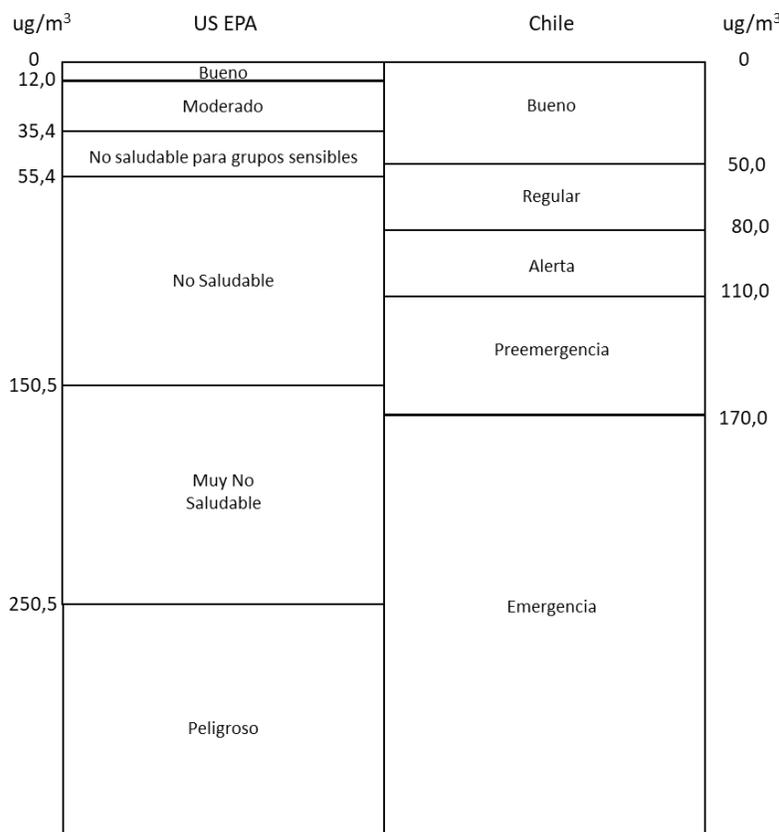


Figura 41: Comparación de niveles de excedencia para MP_{2,5} US EPA con Chile.

Se hizo una simulación comparativa entre los niveles de excedencia entre Chile y Estados Unidos (indicados por la USEPA) que resultarían si se aplica al año 2021 (último año analizado en la base de datos). Se categorizó el análisis por zonas de Interés indicadas en la Tabla 28, y los resultados se entregan gráficamente en la Figura 42 y Figura 43 para la simulación con los niveles de Chile y de la USEPA, respectivamente. Los resultados se muestran como porcentaje del tiempo con un determinado nivel de calidad del aire. Considerando el escenario nacional actual los resultados indican que prácticamente todo el año se encuentran niveles de concentración de MP_{2,5} que están en la categoría bueno para todas las zonas del Norte (desde Arica hasta Cuncumén). Ya desde la Zona de PQC, Viña hacia el sur muestran que el porcentaje de tiempo con índice “Bueno” se reduce hasta un 68% (caso de Los Ángeles, Figura 44). Sin embargo, cuando se hace la misma simulación, pero ahora considerando los niveles de la USEPA, se encuentra una reducción significativa en el % del tiempo con niveles categorizados como “Bueno”, pasando a ser “Moderado”. Basado en las recomendaciones la Tabla 26

y Tabla 27, ya habría recomendaciones que realizar a las “Personas inusualmente sensibles”, y en algunos casos para grupos sensibles en el caso de las zonas del norte.

Tabla 28: Zonas de interés.

Zona de interés	N° de estaciones	Estaciones
Arica	1	Arica
Tarapacá	1	Alto Hospicio
Calama	4	Club deportivo 23 de marzo, Colegio Pedro Vergara Keller, Estación centro (Calama), Hospital del Cobre
Sierra Gorda	1	Sierra Gorda SCM
Tocopilla	2	Bomberos, Tres Marías
Antofagasta	1	Antofagasta
Huasco	4	Huasco- población 21 de mayo, SM10 -EME F, SM9 -EME M, Huasco
Copiapó y Tierra amarilla	1	Copiapó
La Serena-Coquimbo	2	La Serena, Coquimbo
Cuncumén	1	Cuncumén
Valparaíso-Viña del Mar	3	Viña del Mar, Valparaíso, Quilpué
PCQ	8	Concón, Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes, Ventanas, Centro Quintero, Loncura, Quintero
Quillota	2	Cuerpo de Bomberos, San Pedro
RM	11	Independencia, la Florida, Las Condes, Santiago, Pudahuel, Cerrillos, El Bosque, Cerro Navia, Puente Alto, Talagante, Quilicura
Rancagua	4	Rancagua I, Rancagua II, Rengo, San Fernando
Valle central de Curicó y Maule	5	Curicó, U. Talca, UC Maule, Talca La Florida, Linares
Chillán y Chillan Viejo	2	INIA, Purén
Concepción Metropolitano	13	Consultorio, Kingston College, Punteras, Cerro Merquín, Polivalente, Hualqui, Coronel Norte, ENAP Price, Junji, Indura, Laja, Inpesca, Nueva Libertad
Curanilahue	1	Balneario
Los Ángeles	3	Los Ángeles Oriente, 21 de Mayo, Lautaro
Temuco	4	Ñielol, Las Encinas, Padre las Casas, M. Ferroviario
Valdivia	2	Valdivia, Valdivia I
Osorno y La Unión	2	La Unión, Osorno
Puerto Montt y Puerto Varas	3	Alerce, Mirasol, Puerto Varas

Zona de interés	N° de estaciones	Estaciones
Coyhaique	3	Coyhaique I, Coyhaique II, Vialidad / Puerto Aysén
Punta Arenas	1	Punta Arenas

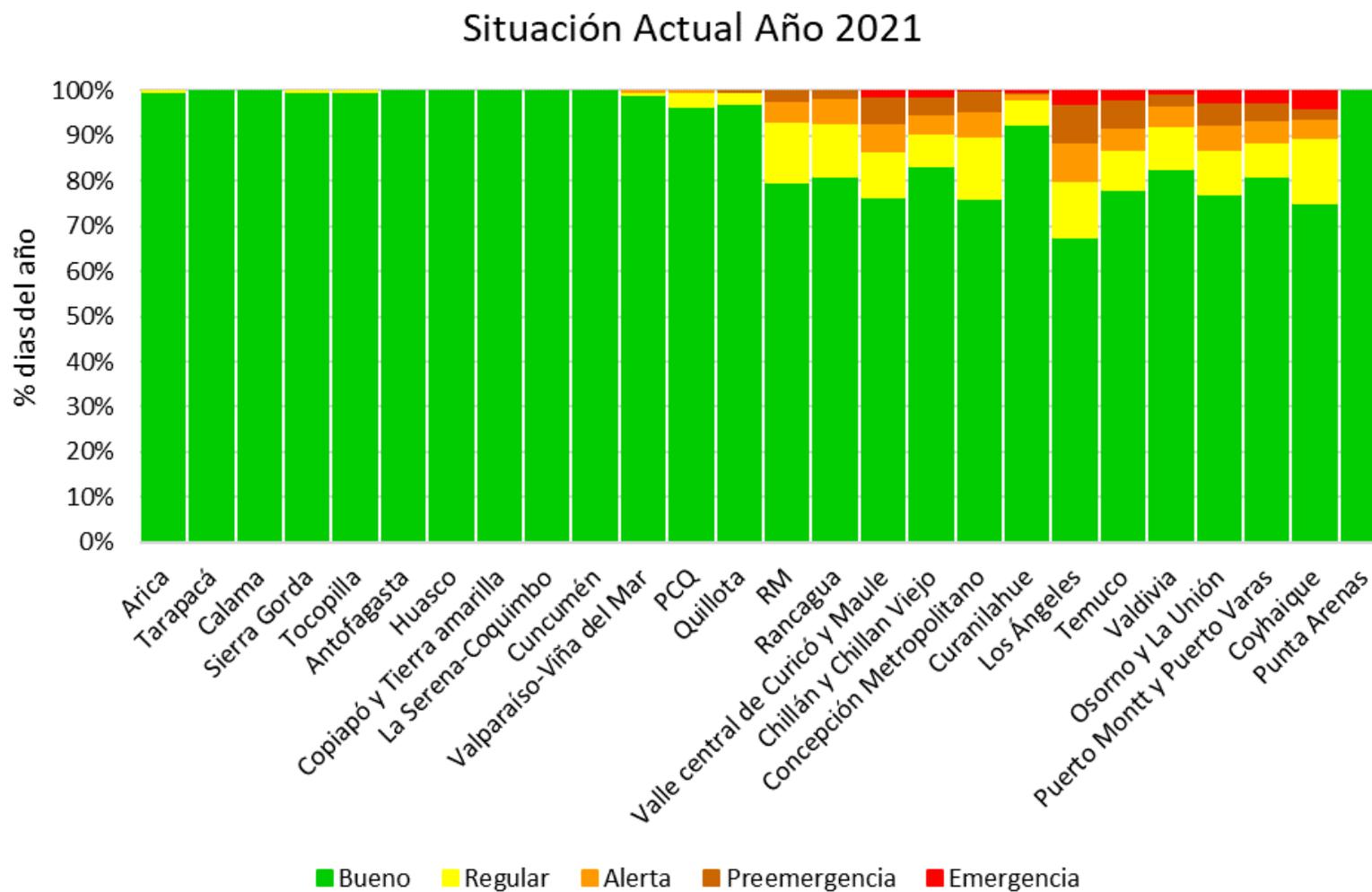


Figura 42: Simulación utilizando niveles de excedencia de Chile.

Situación Niveles USEPA año 2021

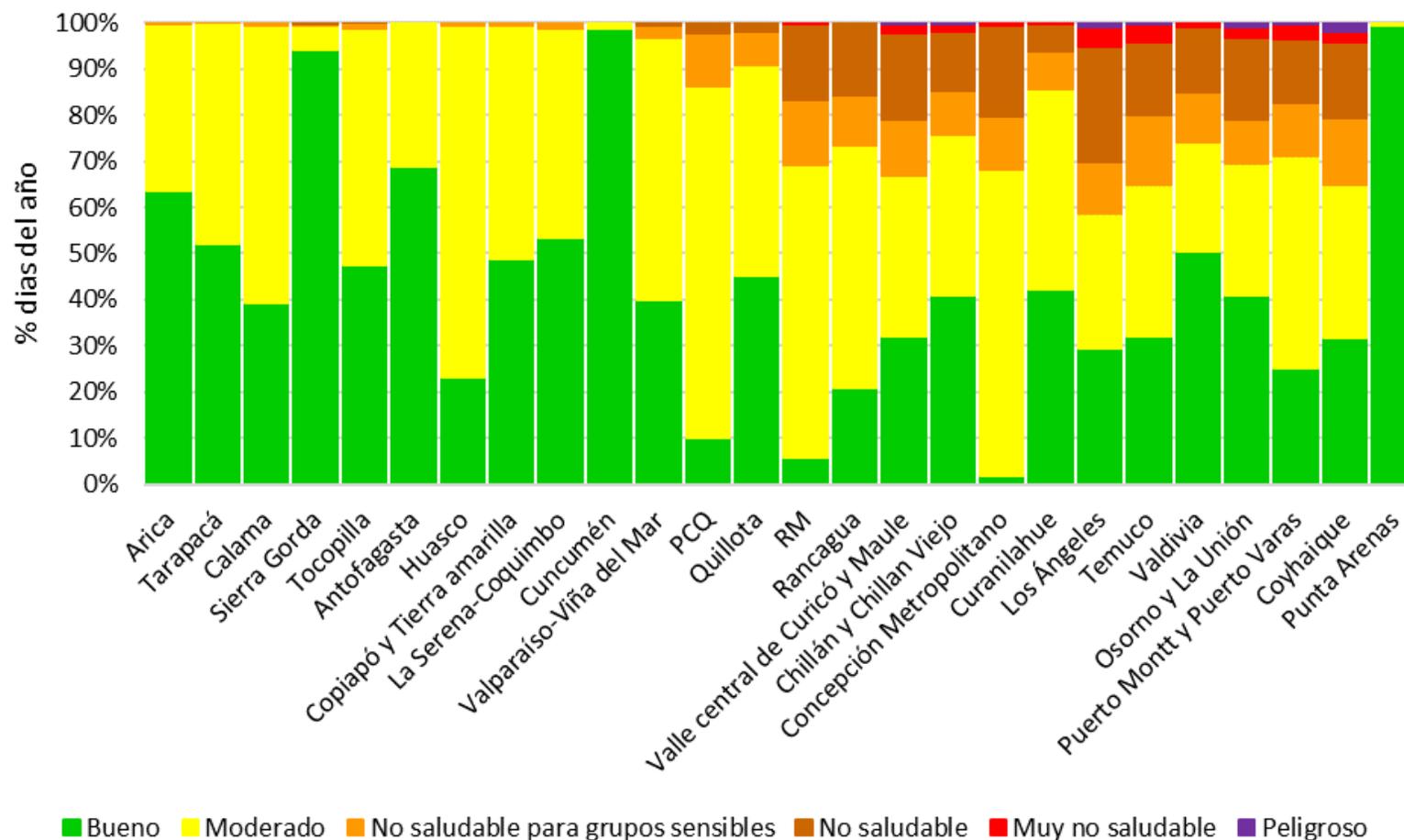


Figura 43: Simulación utilizando niveles de excedencia de USEPA.

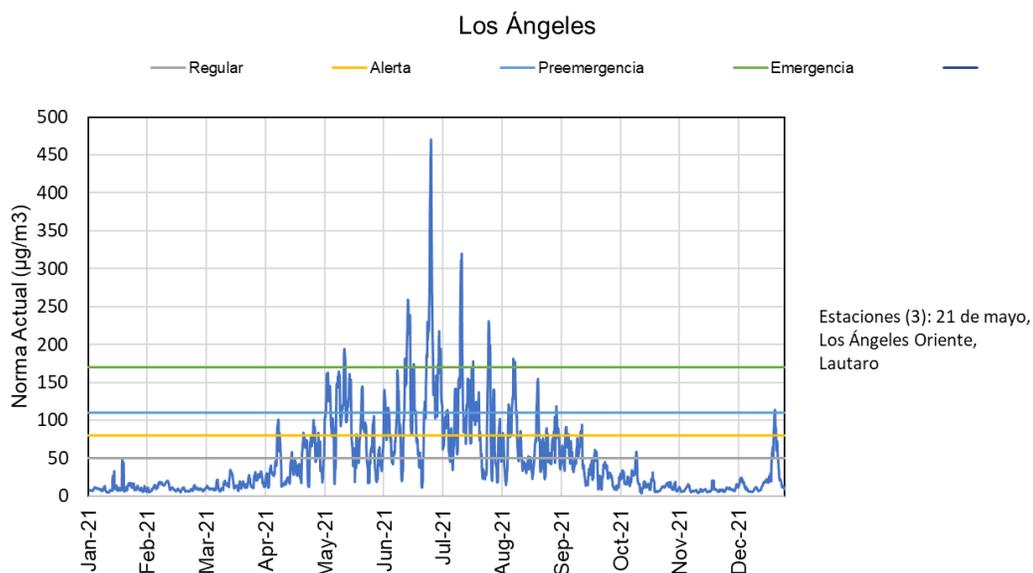


Figura 44: Promedio Movil de 24 hrs Zona de Los Ángeles.

Un posible ajuste del nivel de emergencia a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ implicaría que se aplicarían las mismas medidas restrictivas que actualmente se usan para el nivel de preemergencia, según la normativa vigente en Chile. Esto significa que se prohibiría la circulación de algunos vehículos catalíticos y no catalíticos, se limitaría el uso de calefactores a leña y se recomendaría evitar actividades físicas al aire libre (medidas relacionadas a PPDA específicos). El objetivo de este ajuste sería homologar el criterio de calidad del aire con el estándar internacional que considera el nivel de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como “no saludable”. Sin embargo, este ajuste no modificaría el número total de días episodios, sino que solo cambiaría la distribución de los días según su nivel de gravedad, como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29: Estimación del número de días episodios para cada zona de interés comparados con la situación actual y con la modificación de reducir el nivel de Emergencia a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Año 2021.

Zona	Nueva designación				Designación actual			
	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Total	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Total
Arica	0	0	0	0	0	0	0	0
Tarapacá	0	0	0	0	0	0	0	0
Calama	0	0	0	0	0	0	0	0
Sierra Gorda	0	0	0	0	0	0	0	0

	Nueva designación				Designación actual				
Tocopilla	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Antofagasta	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Huasco	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Copiapó y Tierra amarilla	0	0	0	0	0	0	0	0	0
La Serena-Coquimbo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuncumén	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valparaíso-Viña del Mar	3	0	0	3	3	0	0	0	3
PCQ	1	0	0	1	1	0	0	0	1
Quillota	0	1	0	1	0	1	0	0	1
RM	22	13	1	36	22	14	0	0	36
Rancagua	25	13	0	38	25	13	0	0	38
Valle central de Curicó y Maule	28	24	12	64	28	28	8	0	64
Chillán y Chillan Viejo	17	20	12	49	17	25	7	0	49
Concepción Metropolitano	26	24	5	55	26	28	1	0	55
Curanilahue	9	3	2	14	9	3	2	0	14
Los Ángeles	37	31	31	99	37	44	18	0	99
Temuco	21	17	25	63	21	28	14	0	63
Valdivia	24	15	7	46	24	16	6	0	46
Osorno y La Unión	25	18	24	67	25	25	17	0	67
Puerto Montt y Puerto Varas	25	19	20	64	25	26	13	0	64
Coyhaique	23	9	23	55	23	11	21	0	55
Punta Arenas	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Se realizó una simulación modificando los valores normativos de la norma diaria, asumiendo la misma proporción de reducción de la normativa (Figura 45). Esto es establecer intervalos separados por 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por cada 100 puntos de ICAP. Con el escenario actual, lo que hay es un cambio de pendiente al momento del nivel de la norma ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ICAP 100). Sin embargo, al hacer el paso a los Escenarios 4 a 4 implica una reducción de igual magnitud de los niveles utilizados para dictar episodios, y lo que va ocurriendo es que las pendientes antes y después del ICAP 100 se van igualando. Es razonable considerar que una reducción en los niveles normativos implique también una reducción en los niveles de contingencia ya que se busca ser más estrictos en el nivel de mortalidad que se está dispuesto aceptar. No obstante, cabe mencionar que un cambio en la reducción de los niveles de contaminación podría generar una falsa percepción en la ciudadanía que ha aumentado el nivel de contaminación en el país, ya que los días episodios aumentarán. El incremento de ellos puede llegar a 140 días al año en el caso del escenario 4 (Más de cuatro meses de días episodios en los Ángeles, Tabla 31, Figura 48). Por otro lado, el mantenimiento de los niveles de contingencia actuales generaría un escenario muy

estricto a nivel de norma de calidad, pero bien permisible/laxo respecto de la definición de los niveles de contingencia, situación muy similar a la actual que tiene la USEPA.

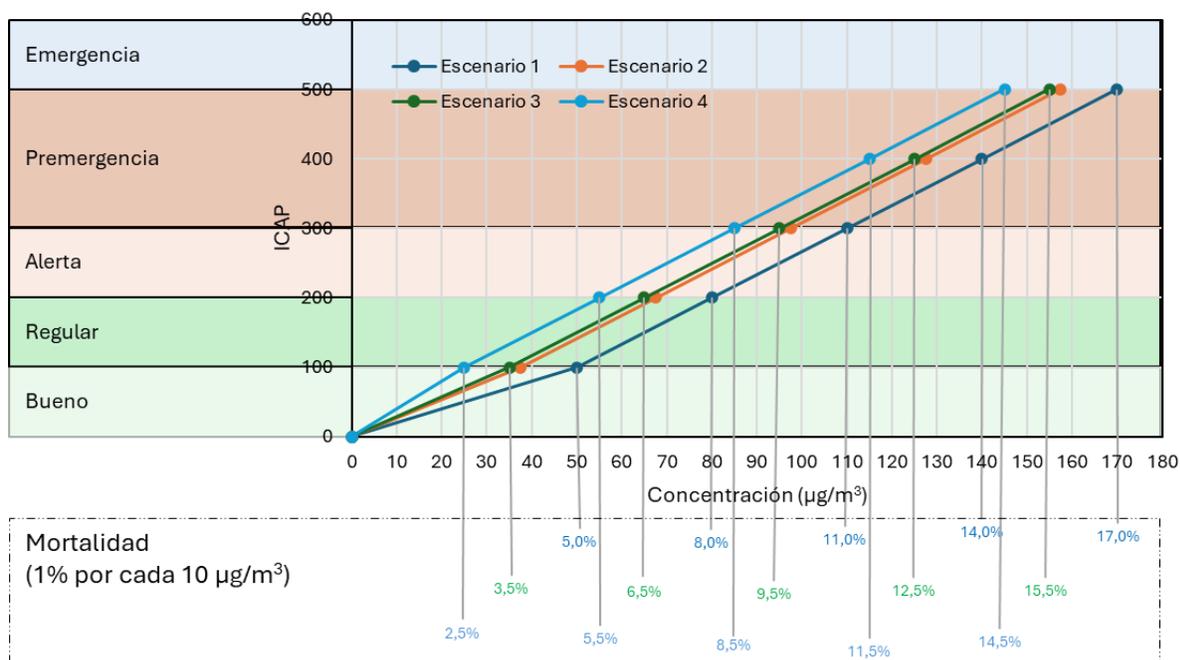


Figura 45: Simulación de nuevos niveles de contingencia manteniendo el mismo nivel de reducción normativo.

Tabla 30: Propuesta de valores de episodios por $MP_{2,5}$ ($\mu g/m^3$) considerando escenarios de evaluación.

	ICAP	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Norma	100	50	37,5	35	25
Alerta	200	80	67,5	65	55
Preemergencia	300	110	97,5	95	85
	400	140	127,5	125	115
Emergencia	500	170	157,5	155	145

Tabla 31: Numero de episodios año 2021 para cada escenario considerando niveles de reducción indicados en la tabla anterior.

Zona	N° de episodios año 2021			
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Arica	-	-	-	-
Tarapacá	-	-	-	-
Calama	-	-	-	-
Sierra Gorda	-	-	-	2
Tocopilla	-	-	-	2
Antofagasta	-	-	-	-

Zona	N° de episodios año 2021			
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Huasco	-	-	-	-
Copiapó y Tierra amarilla	-	-	-	-
La Serena-Coquimbo	-	-	-	-
Cuncumén	-	-	-	-
Valparaíso-Viña del Mar	3	4	4	4
PCQ	1	6	8	16
Quillota	1	5	6	13
RM	36	56	62	80
Rancagua	38	51	53	77
Valle central de Curicó y Maule	64	80	85	98
Chillán y Chillan Viejo	49	67	70	85
Concepción Metropolitano	55	73	80	100
Curanilahue	14	31	31	44
Los Ángeles	99	117	121	140
Temuco	63	75	77	94
Valdivia	46	64	69	84
Osorno y La Unión	67	87	92	113
Puerto Montt y Puerto Varas	64	74	77	90
Coyhaique	55	77	80	110
Punta Arenas	-	-	-	-

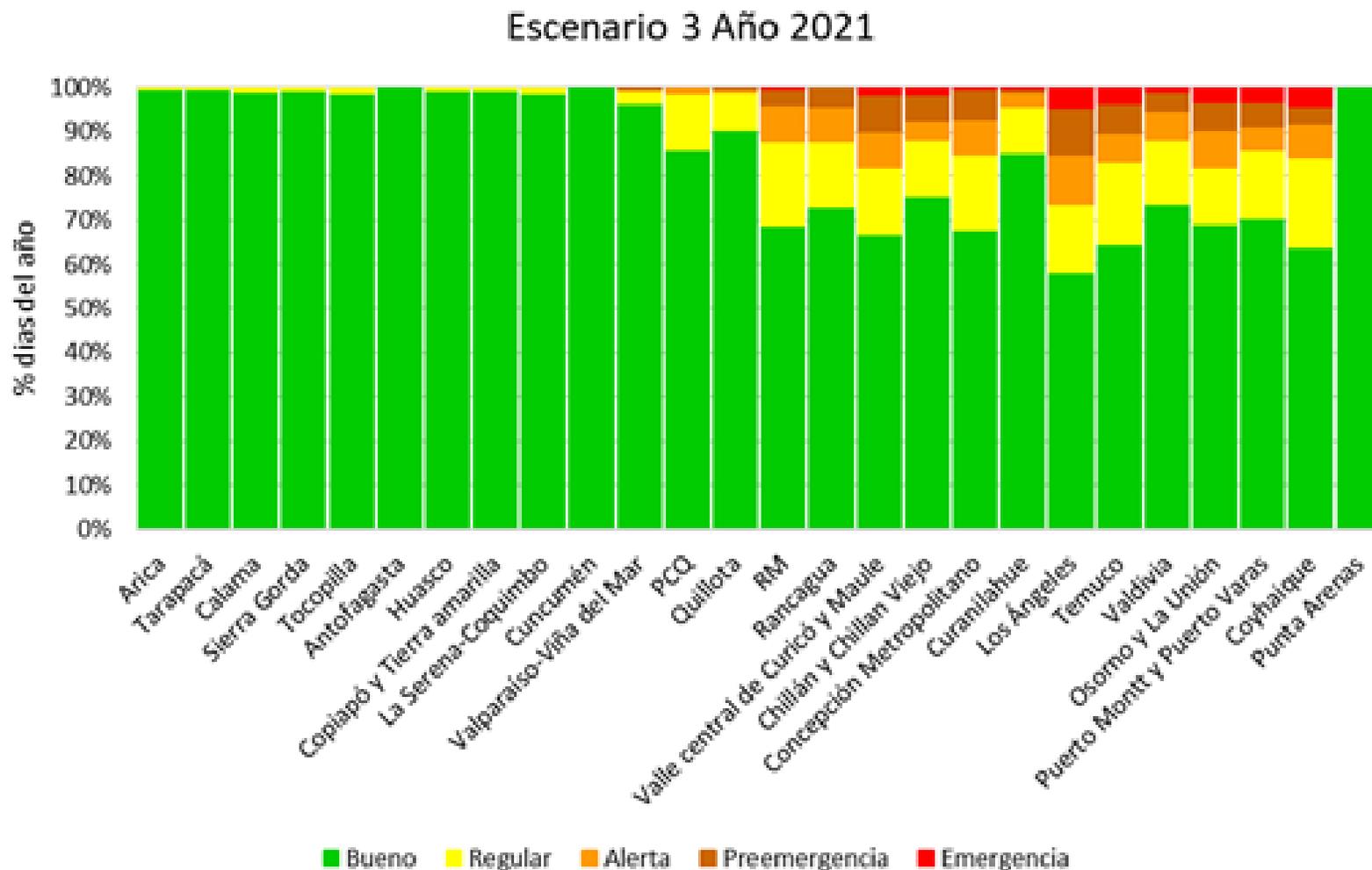


Figura 46: Simulación de estados de calidad del aire utilizando niveles de excedencia de los escenarios 2.

Escenario 2 Año 2021

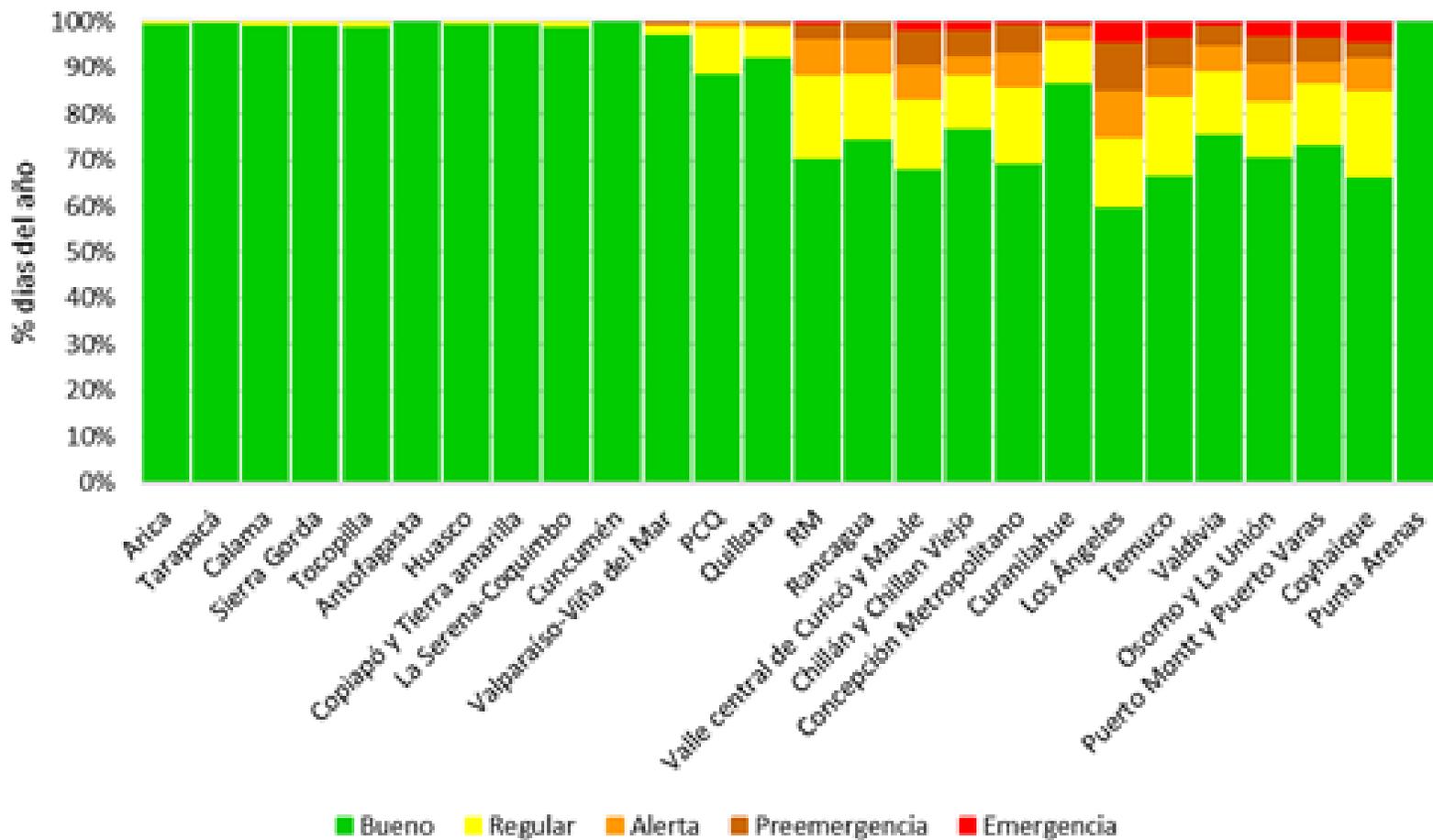


Figura 47: Simulación de estados de calidad del aire utilizando niveles de excedencia de los escenarios 3.

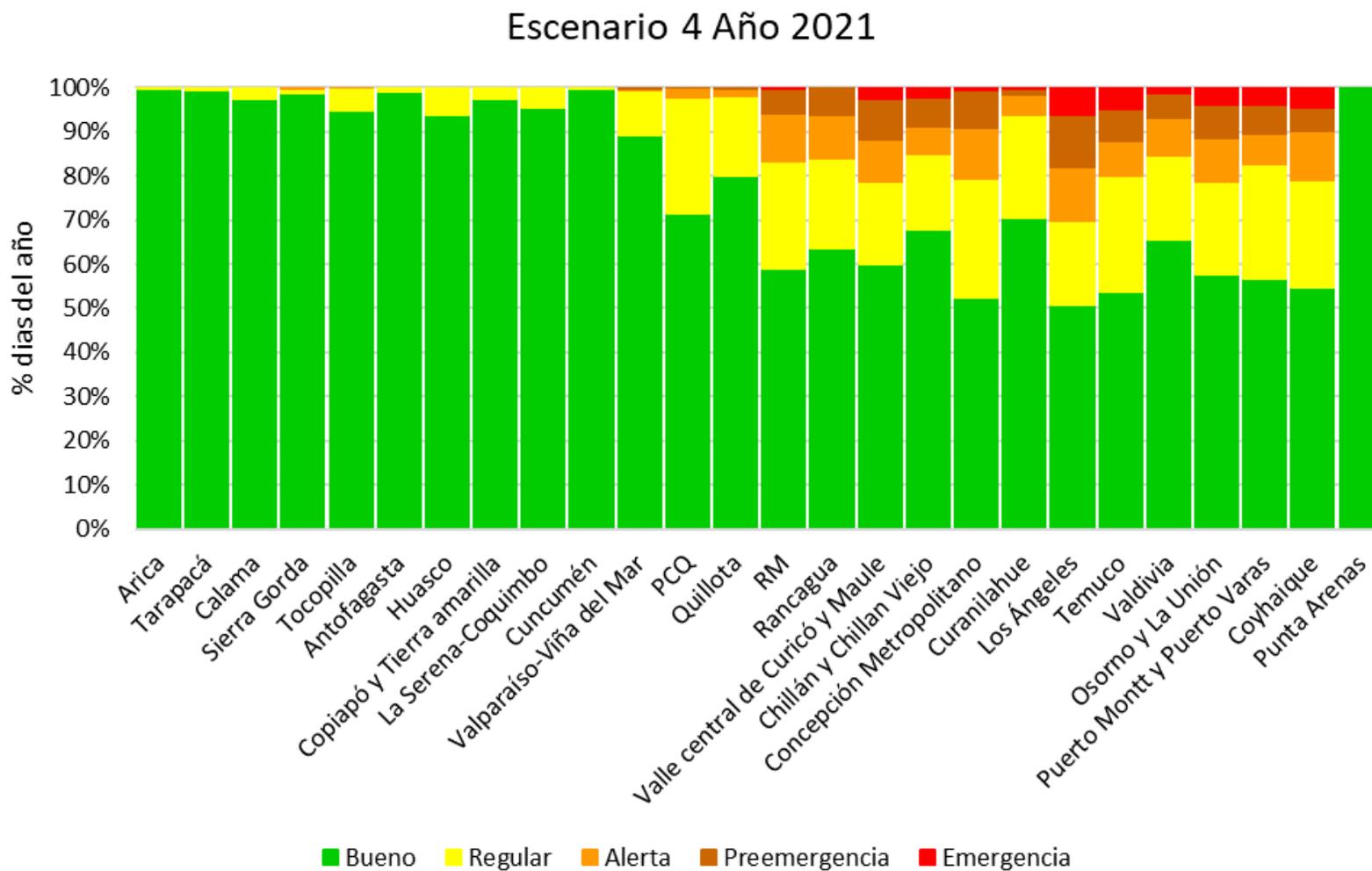


Figura 48: Simulación de estados de calidad del aire utilizando niveles de excedencia de los escenarios 4.

10 Análisis de la convergencia entre la propuesta de norma y otros instrumentos regulatorios vigentes y proyectados, con Planes de Descontaminación Atmosférica, Normas de emisión y cualquier iniciativa que esté disminuyendo MP_{2,5} en las fuentes reguladas.

La norma de calidad primaria de MP_{2,5} entró en vigor el 1° de enero del año 2012, de acuerdo al Decreto Supremo N°12 del 2011, del Ministerio del Medio Ambiente que “Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable MP_{2,5}” (en adelante, DS 12/2011), por lo cual a la fecha cuenta con una década de implementación, constituyéndose así en la principal norma de calidad atmosférica de nuestro país.

Si bien la norma a nivel nacional es de implementación relativamente reciente, este contaminante se viene controlando en Chile desde el año 1990, en el marco del Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana, registrando a la fecha una reducción del 70% del promedio anual de este contaminante. Tales resultados se explican porque desde su inicio, el PPDA R.M. siempre se ha focalizado en la fracción fina del material particulado, que representa los mayores impactos en la salud. Cabe mencionar que, si bien el PPDA RM se publicó el año 1998, las acciones de descontaminación atmosféricas se iniciaron en 1990 con la creación de la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM).

El MP_{2,5} es el contaminante atmosférico más importante de nuestro país, por esta razón para avanzar en su control, el Estado de Chile, liderado por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y otros organismos públicos, han implementado acciones directas e indirectas desde el año 2012, en diversos ejes, los cuales se han traducido en resultados favorables a la fecha. Un resumen de las acciones implementadas desde la publicación de la norma de MP_{2,5} se presenta a continuación:

- **Dictación de la Norma Primaria MP_{2,5}** (2011) – Entra en vigencia a partir de enero de 2012.
- Implementación de **redes de monitoreo** continuo de MP_{2,5} (2012 en adelante)
- Implementación de una plataforma de **acceso a la información en línea** www.sinca.mma.gob.cl (2012)
- Declaración de **zonas saturadas/latentes** por MP_{2,5} (2012 en adelante) (https://planesynormas.mma.gob.cl/normas/mostrarCategoria.php?tipo_norma=planes).
- Elaboración de Planes de Descontaminación Atmosférica por MP_{2,5} (2012 en adelante) (<https://ppda.mma.gob.cl/>).
- Elaboración de **normas de emisión** para reducir emisiones de MP y gases precursores. Estas normas se han enfocado en calidad de combustibles, transporte, industria y calefactores a leña y pellets.

- **Cronograma de Descarbonización:** Compromete el cierre de todas las centrales a carbón al 2040, 20 de la cuales se cierran al 2025. (2 unidades cerradas el 2019).
- Publicación de la **Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC)** el año 2020, que incluye metas de reducción de carbono negro para el 2030.
- **Publicación de la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) el 2021.** Que establece lineamientos de largo plazo para mitigación y adaptación al cambio climático, las cuales tienen relación con la reducción de contaminantes locales.
- **Publicación de la Ley Marco de Cambio Climático** (Ley 21.455, publicada 13 de junio de 2022) que establece una serie de instrumentos de mitigación de cambio climático, con una meta de carbono neutralidad al 2050.
- **Publicación de la Ley de Eficiencia Energética del Ministerio de Energía** (Ley 21.305 – febrero 2021) Que establece diversas exigencias de reducción de consumo energético en ámbitos de la industria, minera, edificaciones y transporte. En febrero de 2022 se publicó el primer estándar obligatorio de eficiencia energética para vehículos livianos nuevos.
- **Ley de Biocombustibles Sólidos del Ministerio de Energía (Ley 21.499 de noviembre de 2022)** que entrega atribuciones a la SEC para fiscalización de leña y otros biocombustibles

El diagrama que se presenta en la Figura 49 integra acciones que tienen efectos en la gestión del MP_{2,5} en la atmósfera. Estas acciones han tenido efectos en los años previos o podrían tenerlo en el futuro. Son acciones de alcance nacional (normas de emisión) y de alcance local (planes de descontaminación). Hay acciones específicas, directamente orientadas a reducir contaminación atmosférica como medidas de alcance local, y otras acciones de mayor alcance, que pueden ser vistas como medidas complementarias, como son las relacionadas con la mitigación de cambio climático y eficiencia energética, por mencionar dos ejemplos. También hay medidas de carácter permanente y otras de carácter temporal (gestión de episodios y las restricciones asociadas). Hay acciones relacionadas con el acceso a la información e instrumentos económicos (impuestos a las emisiones y subsidios al recambio de calefactores).

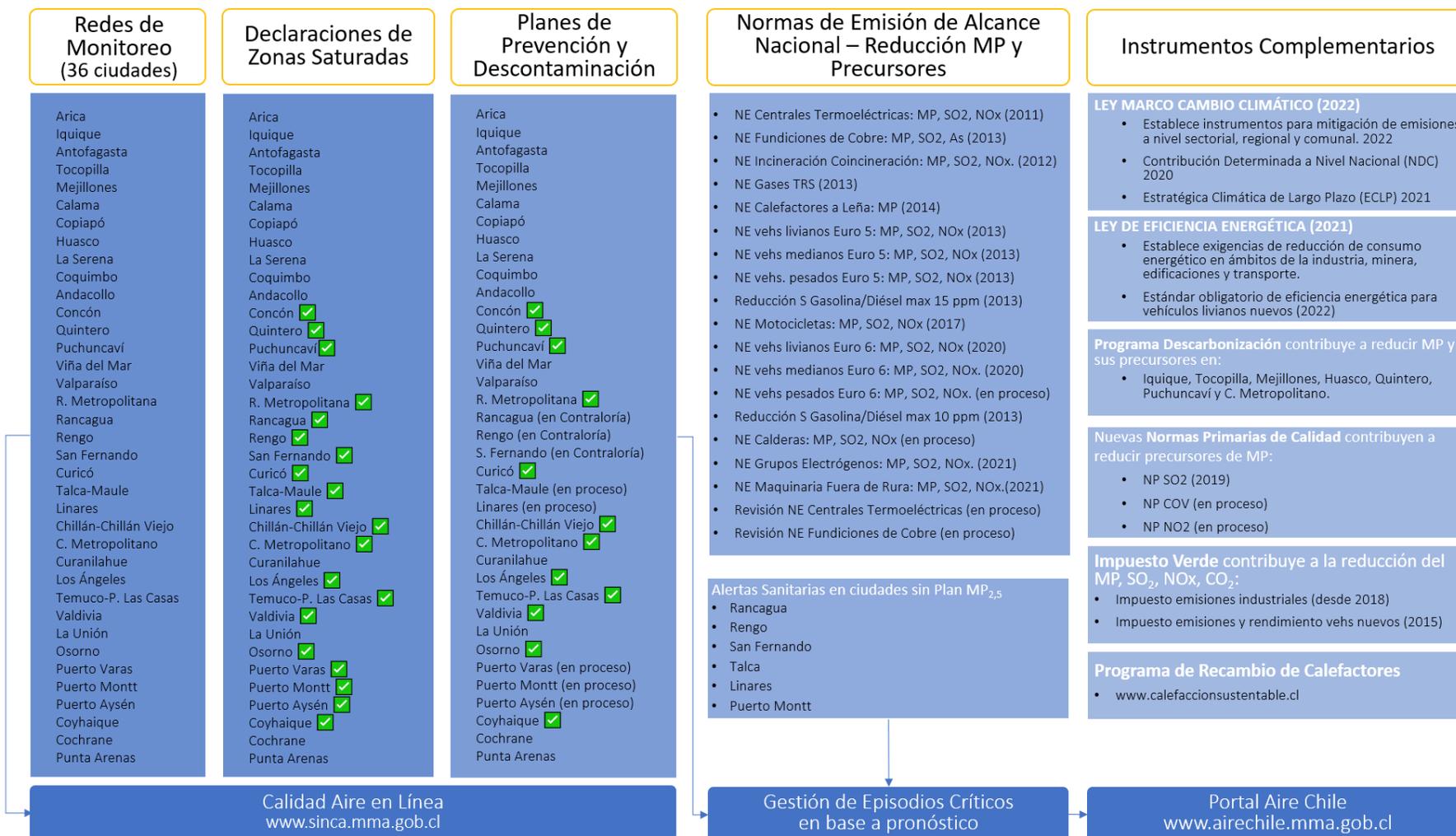


Figura 49: Diagrama que resume acciones con efectos en la reducción del MP_{2,5} a Nivel Nacional.

Una vez que han sido definidos los diversos escenarios de modificación de la norma $MP_{2,5}$, es necesario realizar la evaluación de los costos y beneficios asociados con cada uno de los escenarios propuestos. Lo anterior requiere proyectar mecanismos que podrían permitir seguir reduciendo las emisiones de MP y sus precursores en las próximas décadas. Este análisis es de carácter estratégico, por lo cual se centra en las principales fuentes emisoras identificadas:

- Control de Emisiones Residenciales (leña).
- Control de Emisiones del Transporte.
- Control de Emisiones Industriales.
- Control de Emisiones desde Maquinaria Fuera de Ruta.
- Control de Emisiones desde Quemados Agrícolas.

En cada uno de estos sectores se han identificado las principales acciones que se han implementado desde el 2012 a la fecha y se han proyectado para las próximas dos décadas, basados en las estrategias que están actualmente en curso, las cuales tienen que ver con:

- Promover la eficiencia energética a nivel residencial, en el transporte y la industria.
- Promover el cambio de la matriz energética hacia energías renovables (cierre de centrales a carbón)
- Promover la electromovilidad
- Restringir la quema de leña y biomasa (en calefacción residencial y quemados agrícolas)
- Implementar normas de emisión más exigentes (Euro 7 está en plena discusión en Unión Europea)
- Revisión de normas industriales y publicación de normas pendientes (calderas)
- Implementación de los planes de mitigación de emisiones que establece la Ley de Cambio Climático.
- Implementación de normas de emisión en sectores que no habían sido regulados (maquinaria fuera de ruta)

Con todo lo anterior, se identifican las siguientes estrategias de reducción de emisiones de MP y sus precursores, las cuales pueden ser implementadas mediante diversos mecanismos (normas de emisión, estándares de eficiencia energética, programas de recambio tecnológico, planes de descontaminación, planes de mitigación de cambio climático, programas de retiro de centrales termoeléctricas a carbón, impuestos/incentivos, etc.) Sin embargo, lo relevante para este análisis es la posibilidad de identificar que es posible reducir tales emisiones.

Tabla 32: Medidas de reducción de emisiones de MP y sus precursores que pueden ser utilizadas para seguir reduciendo los niveles de MP_{2,5}.

	Medidas	Situación actual	Plazo 1	Plazo 2
1. Control de Emisiones Residenciales (leña)	Recambio tecnológico	Recambios comprometidos por el MMA en zonas con PDA: 200 mil al 2030.	Al 2030 deben haberse recambiado 200 mil calefactores comprometidos en PDAs publicados a la fecha	
	Prohibir leña en zonas urbanas	<ul style="list-style-type: none"> • Prohibida en 34 comunas de la RM • Prohibida en comunas de Rancagua-Machalí 	<ul style="list-style-type: none"> • 2025 agregar a la prohibición 18 comunas para completar toda la RM • 2025 prohibición en viviendas nuevas construidas en zonas urbanas 	Prohibición de uso de leña en zonas urbanas de ciudades <ul style="list-style-type: none"> • 2030: Ciudades de más de 100 mil hab. • 2035: Todas las ciudades.
	Acondicionamiento Térmico de Viviendas Existentes	Subsidios de AT comprometidos por el MMA en zonas con PDA: 200 mil al 2030.	Al 2030 deben haberse implementado 200 mil subsidios de AT comprometidos en PDAs.	
	Acondicionamiento Térmico de Viviendas Nuevas	Mejores estándares de AT aplican a viviendas nuevas en zonas con PDA	Publicación OGUC (2024) que aumenta exigencias a nivel nacional (30% menos dda energética)	Publicación Nueva OGUC (2030) que vuelve a aumentar exigencias a nivel nacional (50% menos dda energética)
2. Control de Emisiones del Transporte	Norma Euro 6 Completa	a) Livianos publicada b) Medianos publicada c) Pesados aprobada CMS	a) Euro 6 b (2023)/ Euro 6 c (2025) b) Euro 6 b (2023)/ Euro 6 c (2025) c) Euro VI (2025)	2030: a) Euro 7 b) Euro 7 c) Euro VII
	Estándar de Eficiencia Energética Livianos desde 2024.	Livianos: publicado 2022 /vigencia 2024 Medianos: a publicar 2024/vigencia 2026		2035

Medidas	Situación actual	Plazo 1	Plazo 2	
	Pesados: a publicar 2026/vigencia 2028		Livianos y medianos Nuevos: 100% eléctricos	
Buses Transporte Público		Euro VI en RM desde 2017 Euro VI en todo el país desde 2025	2035: Nuevos transporte público urbano 100% eléctricos	
Camiones			2045: 100% eléctricos	
Motocicletas	Actualmente aplica norma Euro 3	2030: Motocicletas nuevas 100% eléctricas.		
3. Control de Emisiones Industriales	Centrales Termoeléctricas	DS 13/2011 MMA Vigente	Revisión de DS 13	
		Cierre de Centrales	Ver cronograma	
	Fundiciones de Cobre	DS 28/2013 MMA Vigente	Revisión del DS28 (ver detalle)	
		Cierre de Fundiciones	2023: Cierre Fundición de Ventanas	
	Calderas	Reguladas en PDA (límites de MP principalmente)		
		Norma de Calderas (Nacional) en elaboración	2026: Vigencia norma calderas (ver detalle)	
	Otras Regulaciones		2035: Calderas nuevas en la RM y Concepción Metropolitano 100% eléctricas.	
4. Control de Emisiones desde Maquinaria Fuera de Ruta	Norma de emisión de entrada 19 a 560 kw	Norma actual aplica a maquinaria. Plazos diferenciados (2023/2024) (ver detalle más adelante)	2030: Entra en vigencia revisión de la norma de Maquinaria Off Road.	2040: 100% eléctricos
	Maquinaria > 560 kw	Ninguna regulación actualmente	2035: 100% eléctricos	

	Medidas	Situación actual	Plazo 1	Plazo 2
5. Control de Emisiones desde Quemas Agrícolas.	Restricciones	Actualmente hay periodos de prohibición en zonas con PDA (principalmente durante la Gestión de Episodios Críticos) En el PPDA RM la prohibición es total y en PDA del Valle Central de la región de O'Higgins la prohibición será total a partir de 2028	2030: Prohibición total (tiene beneficios en contaminación atmosférica, CC y reducción de incendios)	

11 Inventario de Emisiones y Proyección

11.1 Estructura del inventario de emisiones

El inventario de emisiones fue estructurado en grupos, subgrupos, actividades y subactividades para cuatro grupos de fuentes emisoras (Fuentes Fijas, Fuentes Areales, Fuentes Móviles y Polvo Fugitivo).

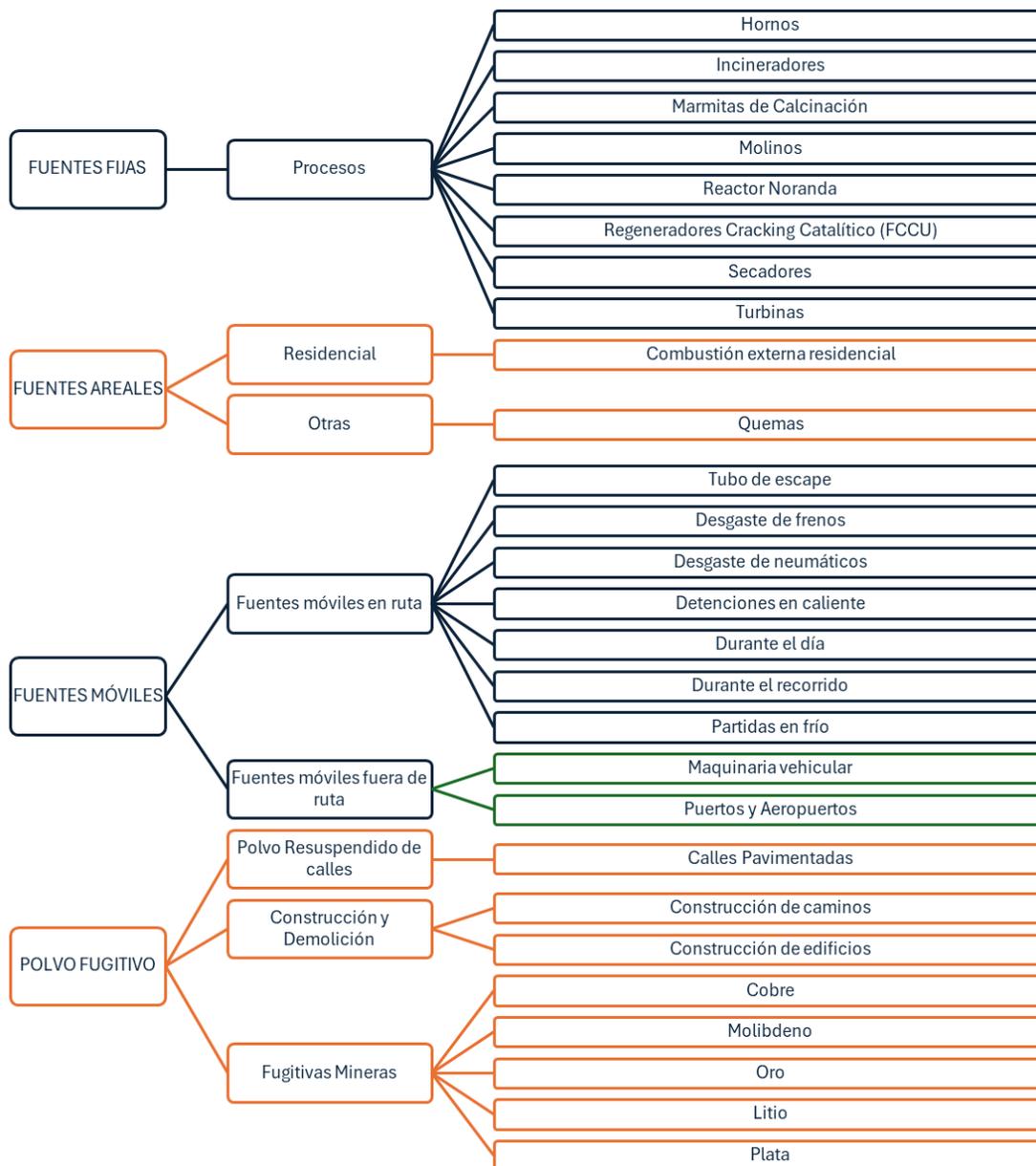


Figura 50: Estructuración del inventario.

11.2 Metodología de cálculo de emisiones y factores de emisión

Respecto a las metodologías de cálculo y factores de emisión utilizados para estimar las emisiones de MP₁₀, MP_{2.5}, CO, NO_x, SO₂, Black Carbon, COV, NH₃ y CO_{2eq} (N₂O, CO₂, CH₄) se utilizaron los siguientes documentos metodológicos según tipo de fuente, todos ellos contienen las metodologías y criterios de cálculo de emisiones utilizados en el presente estudio. En algunos casos se realizó algunos ajustes y/o modificaciones, así como también se complementó con información de mejor calidad.

Cabe destacar que en su mayoría los factores de emisión provienen de fuentes de información internacionales tales como AP-42 EPA y EMEP/EEA.

Tabla 33: Resumen de la principal fuente de información y nivel de actividad utilizado para la elaboración del inventario de emisiones.

Fuente	Fuente de información	Nivel de actividad
Fuentes Estacionarias Puntuales	Base de datos RUEA 2021 SNIFA de la SMA (link: https://snifa.sma.gob.cl/). Mediciones discretas del sistema RUEA.	Consumos de combustibles y materias primas de los distintos tipos de fuentes (Decreto Supremo 138/2005 MINSAL).
Combustión residencial de leña	Informe “Estimación de Emisiones de Fuentes Difusas para la Generación del Décimo Sexto Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes del RETC”, año 2022, DICTUC. <hr/> Estudio “Medición del Consumo Nacional de Leña y otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera” año 2015, Ministerio de Energía (CDT 2015),	Consumo de leña 2021 urbano -rural. Estos consumos fueron distribuidos a nivel comunal con información de consumos urbanos y rurales por región y comuna año 2020 proporcionada por el MMA, en base a INFOR.
Combustión Residencial de Gas licuado, Gas natural y kerosene	“Manual para desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas”, año 2017, Ministerio del Medio Ambiente.	Consumos de cada uno de los combustibles en cuestión. Estos consumos fueron extraídos de los reportes estadísticos anuales que reporta la SEC en su página web.
Incendios Forestales y Quemadas Agrícolas	informe “Estimación de Emisiones de Fuentes Difusas para la Generación del Décimo Sexto Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de	Incendios Forestales: Masa quemada por tipo de bosque, la cual se obtiene en base a la superficie quemada en el incendio, (expresada en hectáreas afectadas por tipo

Fuente	Fuente de información	Nivel de actividad
	Contaminantes del RETC”, año 2022, DICTUC.	de bosque: vegetación natural y plantaciones forestales) multiplicada por la carga orgánica de esta misma (expresada en ton/ha). Quemadas agrícolas: masa quemada por tipo de especie, la cual se obtiene en base a la superficie quemada (expresada en hectáreas por tipo de cultivo y/o vegetación) multiplicada por la carga orgánica de esta misma (expresada en ton/ha). CONAF
Fuentes Móviles en Ruta	“Estimación de Emisiones de Fuentes Difusas para la Generación del Décimo Sexto Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes del RETC”, año 2022, DICTUC, Estudio de “Actualización de las Plataformas Computacionales de los Modelos Ambientales y de Evaluación”, año 2019, SISTAM, Informe “Estimación de Emisiones de Fuentes Difusas para la Generación del Décimo Sexto Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes del RETC”, año 2022, DICTUC	Kilómetros recorridos totales de las distintas categorías vehiculares
Fuentes Móviles Fuera de Ruta (Maquinarias)	Estudio “Análisis técnico-económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país”, año 2014, GEASUR.	Horas de operación anual
Fuentes Móviles Fuera de Ruta (Puertos y Aeropuertos)	Estudio “Actualización Metodológica del Modelo de Consumo Energético y Emisiones para el Sector Transporte (STEP) Etapa II”, año 2022, SECTRA.	Puertos: las cargas totales (ton) consideradas en el tráfico nacional e internacional considerando de salidas y entradas a los puertos.

Fuente	Fuente de información	Nivel de actividad
		Aeropuertos: los ciclos LTO consideradas en el tráfico nacional e internacional considerando de salidas y llegadas a los aeropuertos.
Polvo Resuspendido desde Calles	Informe “Estimación de Emisiones de Fuentes Difusas para la Generación del Décimo Sexto Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes del RETC”, año 2022, DICTUC.	Peso promedio del parque vehicular, también es necesario cuantificar el flujo, tipo de vehículos, longitud del arco, velocidad y el tipo de carpeta donde se realiza dicha actividad, además de algunas variables físicas de la superficie de tránsito tales como la humedad y contenido de silt.
Construcción de Caminos y Edificios	“Manual para desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas”, año 2017, Ministerio del Medio Ambiente.	Superficie construida (expresada en m2)
Fuentes Fugitivas de Mineras	<p>“Estudio de Calidad del Aire en la Localidad de Sierra Gorda”, año 2018, CMM.</p> <p>“Antecedentes para elaborar el Plan de Descontaminación Atmosférica de la ciudad de Calama y su área circundante”, año 2019, DICTUC.</p> <p>“Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas de Contaminantes de la ciudad de Andacollo”, año 2021, GEOAIRE.</p> <p>“Anuario de la Minería de Chile”, año 2021, SERNAGEOMIN.</p> <p>“Mercado Internacional del Litio y su Potencial en Chile”, año 2018, COCHILCO.</p> <p>“Estadísticas Precio de los Metales”, COCHILCO.</p>	Producción 2021 como nivel de actividad.

11.3 Emisiones, año base 2021

El inventario de emisiones es entregado resumido en formato Excel a nivel comunal y regional para todos los tipos de fuentes según la estructura definida para el inventario en la sección **11.1 Estructura del inventario de emisiones**. También se entregan las planillas Excel trazables para cada tipo de fuente indicando los niveles de actividad, factores de emisión y parámetros utilizados. Estas planillas se presentan en el **Anexo 2: Planillas Excel Calculo de Emisiones**.

A continuación, se presentan algunos de los principales resultados del inventario de emisiones Año 2021, según la estructura del inventario definida en la sección **11.1 Estructura del inventario de emisiones**.

11.3.1 Resultados de emisiones

En la siguiente tabla se presenta las emisiones totales por Grupo y contaminante.

Tabla 34: Emisiones totales por Grupo, año 2021 en t/año.

GRUPO	MP	MP ₁₀	MP _{2,5}	BC	SOx	NOx	CO	COV	NH3	CO2	CH4	N2O	CO2eq
FUENTES AREALES	190.774	176.057	164.712	15.660	1.832	29.919	3.173.749	1.786.850	1.902	3.473.695	8.459	425	3.811.669
FUENTES FIJAS	147.106	72.045	50.243	9.928	234.916	182.290	175.024	5.409	638	111.163.906	3.227	2.873	112.100.668
FUENTES MÓVILES	11.992	11.458	10.766	4.569	846	141.502	227.194	32.551	637	32.067.163	1.330	971	34.527.995
POLVO FUGITIVO	868.090	261.975	34.360										
Total general	1.217.963	521.535	260.081	30.157	237.594	353.711	3.575.967	1.824.811	3.177	146.704.764	13.015	4.268	150.440.331

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 35: Emisiones totales por Grupo y Zona, año 2021 en miles de t/año.

Zona	GRUPO	MP	MP ₁₀	MP _{2,5}	BC	SOx	NOx	CO	COV	NH3	CO2	CH4	N2O	CO2eq
Zona Norte	FUENTES AREALES	4,3	4,0	3,8	0,4	0,0	1,7	62,0	29,9	0,0	48	0,1	0,0	53
	FUENTES FIJAS	2,5	2,0	1,6	0,1	12,1	16,8	15,9	1,1	0,2	23.003	0,4	0,3	23.113
	FUENTES MÓVILES	4,2	4,0	3,7	1,7	0,2	44,3	97,5	15,1	0,2	10.546	0,5	0,3	10.848
	POLVO FUGITIVO	48,6	13,3	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RM	FUENTES AREALES	8,9	8,5	8,2	0,8	0,1	1,3	160,4	95,2	0,0	16	0,0	0,0	17
	FUENTES FIJAS	12,1	5,6	3,9	0,9	47,5	21,8	45,3	1,9	0,2	11.147	0,1	0,1	11.166
	FUENTES MÓVILES	1,1	1,0	0,9	0,5	0,1	9,0	15,8	2,1	0,1	2.034	0,1	0,1	2.055
	POLVO FUGITIVO	3,0	0,6	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Concepción Metropolitano	FUENTES AREALES	9,7	8,3	7,2	0,6	0,1	1,8	101,5	41,2	0,2	354	0,9	0,1	393

Zona	GRUPO	MP	MP ₁₀	MP _{2,5}	BC	SO _x	NO _x	CO	COV	NH ₃	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
	FUENTES FIJAS	74,1	48,8	38,1	7,4	129,6	61,5	58,2	0,8	0,2	45.635	0,7	1,4	46.062
	FUENTES MÓVILES	3,0	2,9	2,8	1,1	0,4	38,7	55,0	7,5	0,2	8.551	0,4	0,3	9.192
	POLVO FUGITIVO	730,3	224,5	28,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zona Sur	FUENTES AREALES	167,8	155,3	145,6	13,9	1,6	25,1	2.849,9	1.620,6	1,7	3.057	7,4	0,4	3.348
	FUENTES FIJAS	58,4	15,7	6,7	1,6	45,7	82,2	55,6	1,6	0,1	31.379	2,0	1,1	31.759
	FUENTES MÓVILES	3,7	3,5	3,4	1,3	0,2	49,5	58,9	7,8	0,2	10.936	0,4	0,3	12.433
	POLVO FUGITIVO	86,2	23,6	3,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		1.218,0	521,5	260,1	30,2	237,6	353,7	3.576,0	1.824,8	3,2	146.705	13,0	4,3	150.440

Fuente: Elaboración Propia.

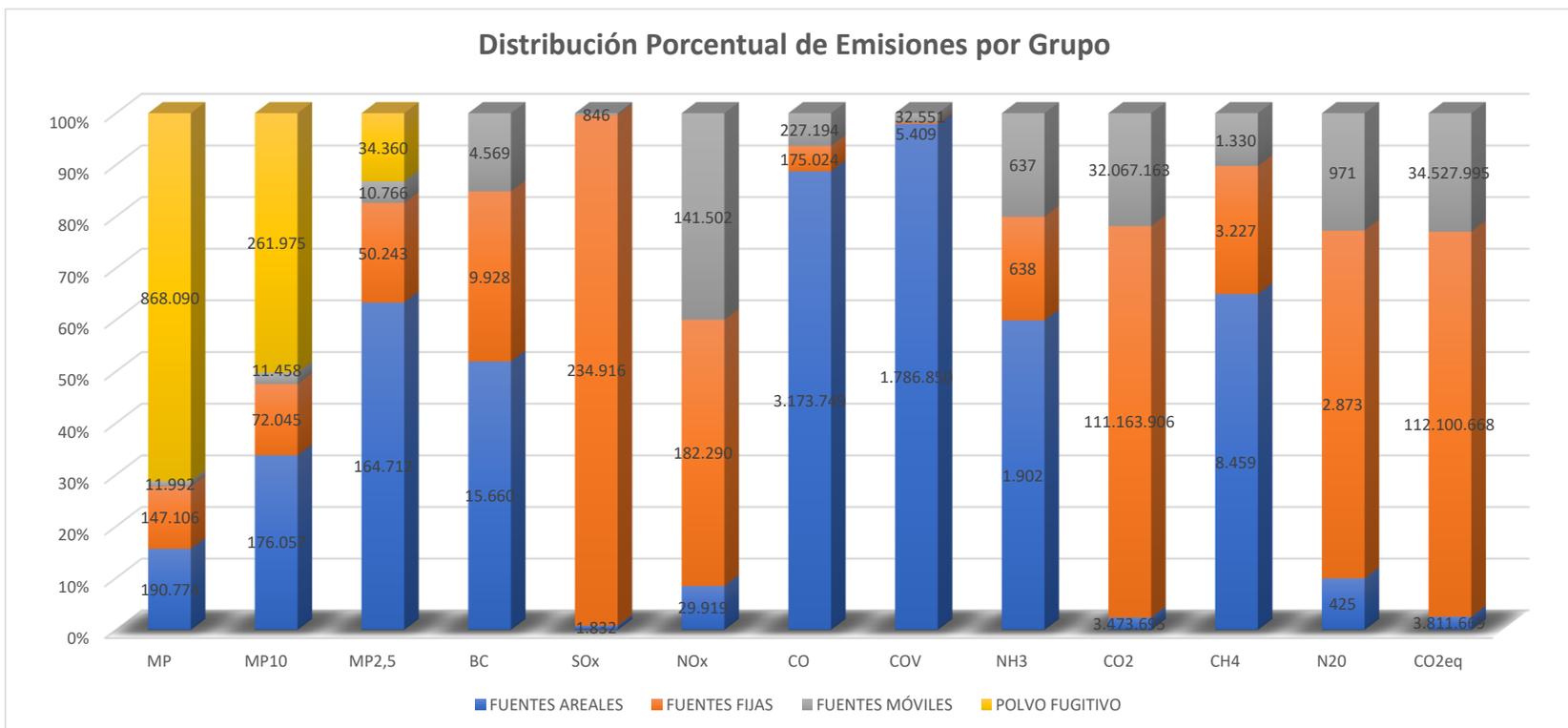


Figura 51: Distribución Porcentual de Emisiones por Grupo, Año 202. Fuente: Elaboración Propia.

En la siguiente tabla se presenta las emisiones totales por Grupo, Sub-Grupo y contaminante.

Tabla 36: Emisiones totales por Grupo y Sub-Grupo, año 2021 en t/año.

GRUPO	SUB-GRUPO	MP	MP ₁₀	MP _{2,5}	BC	SO _x	NO _x	CO	COV	NH ₃	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
FUENTES AREALES	Otras	38.558	30.230	23.021	1.502	1.000	6.674	199.453	3.403	1.894	3.460.330	8.312	423	3.794.253
FUENTES AREALES	Residencial	152.216	145.828	141.691	14.157	832	23.245	2.974.296	1.783.448	8	13.365	146	1	17.416
Total FUENTES AREALES		190.774	176.057	164.712	15.660	1.832	29.919	3.173.749	1.786.850	1.902	3.473.695	8.459	425	3.811.669
FUENTES FIJAS	Combustión	29.357	8.668	7.150	1.405	47.830	139.336	81.576	2.615	261	90.164.393	2.719	2.838	91.077.988
FUENTES FIJAS	Procesos	117.749	63.377	43.093	8.523	187.085	42.954	93.448	2.794	377	20.999.514	509	35	21.022.680
Total FUENTES FIJAS		147.106	72.045	50.243	9.928	234.916	182.290	175.024	5.409	638	111.163.906	3.227	2.873	112.100.668
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles en ruta	6.269	5.952	5.425	3.027	242	94.404	178.406	25.143	626	25.413.113	940	710	27.786.648
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	5.724	5.506	5.340	1.543	605	47.099	48.788	7.408	11	6.654.050	389	260	6.741.347
Total FUENTES MÓVILES		11.992	11.458	10.766	4.569	846	141.502	227.194	32.551	637	32.067.163	1.330	971	34.527.995
POLVO FUGITIVO	Construcción y Demolición	880	439	51										
POLVO FUGITIVO	Polvo Resuspendido de calles	62.071	11.914	2.883										
POLVO FUGITIVO	Fugitivas Mineras	805.140	249.621	31.427										
Total POLVO FUGITIVO		868.090	261.975	34.360										
Total general		1.217.963	521.535	260.081	30.157	237.594	353.711	3.575.967	1.824.811	3.177	146.704.764	13.015	4.268	150.440.331

Fuente: Elaboración Propia.

En la siguiente tabla se presenta las emisiones totales por región y contaminante.

Tabla 37: Emisiones Totales por Región, año 2021 en t/año

Región	MP	MP ₁₀	MP _{2,5}	BC	SO _x	NO _x	CO	COV	NH ₃	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
Arica y Parinacota	2.059	643	212	53	20	1.342	3.088	703	8	257.158	14	8	268.158
Tarapacá	96.998	30.195	4.145	136	121	5.307	5.692	890	15	967.004	34	28	1.009.835
Antofagasta	461.849	140.977	20.300	1.257	59.908	40.031	22.442	1.811	38	27.093.564	387	1.315	27.534.497
Atacama	69.305	24.935	5.826	592	39.984	15.681	6.350	1.125	15	9.220.155	117	90	9.325.906

Región	MP	MP10	MP _{2,5}	BC	SO _x	NO _x	CO	COV	NH ₃	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
Coquimbo	93.165	29.567	5.007	234	140	8.155	23.832	6.087	70	2.384.718	262	55	2.493.027
Valparaíso	93.821	58.098	41.102	6.765	29.904	31.467	153.270	38.924	378	14.616.701	1.155	201	15.015.635
Metropolitana de Santiago	59.549	23.219	11.109	2.086	12.344	62.749	175.448	46.128	454	33.597.286	974	659	34.014.480
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	90.380	37.594	12.249	1.251	36.833	14.415	125.336	63.693	122	3.717.448	593	95	4.017.134
Maule	38.897	18.540	16.587	1.827	1.412	19.740	293.880	152.544	175	6.646.051	942	222	7.021.742
Ñuble	24.419	14.472	13.249	1.517	1.643	11.469	239.149	125.785	233	6.573.690	1.025	269	6.884.764
Biobío	56.678	38.816	33.903	4.484	49.774	48.099	599.847	296.711	491	23.953.187	2.007	645	24.335.805
Araucanía	60.291	50.521	45.564	4.450	815	24.523	791.640	412.410	1.022	6.275.405	4.368	386	6.710.669
Los Ríos	25.286	16.702	15.848	1.752	175	9.752	380.373	240.546	43	5.115.984	407	204	5.275.568
Los Lagos	35.617	29.396	27.745	2.966	3.885	43.204	599.054	349.341	83	3.787.147	611	61	3.969.313
Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	5.505	4.673	4.418	443	60	2.024	108.810	65.994	12	403.635	57	11	444.936
Magallanes y de la Antártica Chilena	4.145	3.187	2.815	343	575	15.754	47.756	22.119	18	2.095.631	61	19	2.118.863
Total	1.217.963	521.535	260.081	30.157	237.594	353.711	3.575.967	1.824.811	3.177	146.704.764	13.015	4.268	150.440.331

Fuente: Elaboración Propia.

11.4 Proyección inventario año base 2021

La proyección de emisiones del inventario base requiere la proyección de niveles de actividad y de factores de emisión. En el primer caso, para realizar una estimación en un horizonte distante de la situación actual, se debe proyectar el nivel de actividad para cada tipo de emisión. Ello implica considerar el crecimiento demográfico²⁹, la capacidad económica de los agentes involucrados, ente otros. Estas variables determinan en gran medida la demanda por bienes y servicios los que, a su vez, inciden en las emisiones de las actividades asociadas.

A ello, se debiera agregar el efecto que las políticas públicas pueden tener en las emisiones contaminantes. Así, para efectos de la proyección de emisiones se debería considerar medidas incluidas en políticas públicas vigentes, bajo el supuesto que éstas cumplen sus metas y objetivos. A su vez, se deberían considerar cambios tecnológicos impulsados por el mercado que pueden llevar a modificaciones de las emisiones del escenario actual.

Sin embargo, en el caso de medidas de política pública, el deterioro de sistemas de control de emisiones en el tiempo actúa en sentido contrario, reduciendo los beneficios del recambio tecnológico. A su vez, el efecto de políticas públicas en curso podría ser de penetración marginal. Por ejemplo, el programa de recambio de calefactores ha logrado sustituir una cantidad levemente superior al 1% de los equipos en el cuatrienio 2015-2018, lo que implica un impacto despreciable en la reducción de emisiones en ese período.

En base a esto, para cada tipo de fuente emisora considerada se procedió a proyectar sus emisiones para el periodo 2021-2051. Por simplicidad, se asume que, ante la ausencia de nueva regulación, el factor de emisión promedio por tipo de fuente permanece constante en el tiempo. No obstante, se consideró que el nivel de actividad varía, dependiendo del crecimiento de la fuerza motriz correspondiente a cada sector socioeconómico, según corresponda.

²⁹ La Los datos de evolución de población se toman de las estimaciones que hace el INE.

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 73 y 74. En el caso de fuentes móviles, se consideró que el transporte privado, en particular motocicletas, vehículos livianos y medianos de pasajeros, aumenta sus emisiones en función del crecimiento de la tasa de motorización.

Dargay et al (1999)³⁰ propone que el crecimiento de la tasa de motorización a nivel global en el periodo t depende del crecimiento del ingreso per cápita, y sigue una función de Gompertz de acuerdo con la siguiente expresión:

$$TasaMotorización_t = \gamma \cdot e^{\alpha e^{\beta \cdot IPC_t}}$$

Donde,

$$\alpha = -0.59$$

$$\beta = -0.25$$

$$\gamma = 0.85$$

Necesariamente, se procedió a proyectar el crecimiento del ingreso per cápita, asumiendo una tasa de crecimiento λ constante de un 1.5% anual, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$IPC_t = IPC_0 \cdot (1 + \lambda)^t$$

En tanto, en el caso del transporte público se asumió que, sin nuevas inversiones, el parque buses urbanos, rurales e interurbanos se mantiene congelado, y por ende los pasajeros transportados x kilómetro recorrido, permanecen constantes en el tiempo. Los mismo se asume para taxis y taxis colectivos, que en general corresponde a un mercado donde el parque vehicular total se encuentra mayormente regulado, limitando el acceso de nuevos oferentes.

En el caso del transporte de carga, se asume que la proyección de emisiones para el periodo t depende completamente al crecimiento de la economía. De acuerdo con esto, se procedió a proyectar el producto interno bruto, asumiendo una tasa de crecimiento r constante de un 2% anual, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$PIB_t = PIB_0 \cdot (1 + r)^t$$

La misma tendencia se observa para fuentes fijas, ya que en general la actividad macroeconómica refleja de buena forma lo que ocurre en la actividad industrial. De esta forma, la proyección de emisiones de fuentes fijas de combustión, procesos industriales, y fuentes fugitivas en los

³⁰ Dargay, J., & Gately, D. (1999). Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960–2015. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(2), 101-138.

sectores del transporte, construcción y minería, se asocia del mismo modo al crecimiento en el producto interno bruto.

En el caso de fuentes areales, se consideró que las emisiones de quemas agrícolas permanecen constantes en el tiempo de no mediar mayores exigencias y mayores recursos en fiscalización. Por otra parte, fuentes de combustión residenciales dependen del crecimiento de la población. Para su proyección, se asumió una tasa de crecimiento ρ de constante de un 1% anual, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$POB_t = POB_0 \cdot (1 + \rho)^t$$

Para proyectar las emisiones, se tomó como base demográfica la proyección que realiza el INE de población³¹. Ésta consiste en la proyección de la población nacional total por región, sexo y edad y considera factores como las tasas de reproducción y la migración. La siguiente figura muestra el crecimiento de las variables de interés.

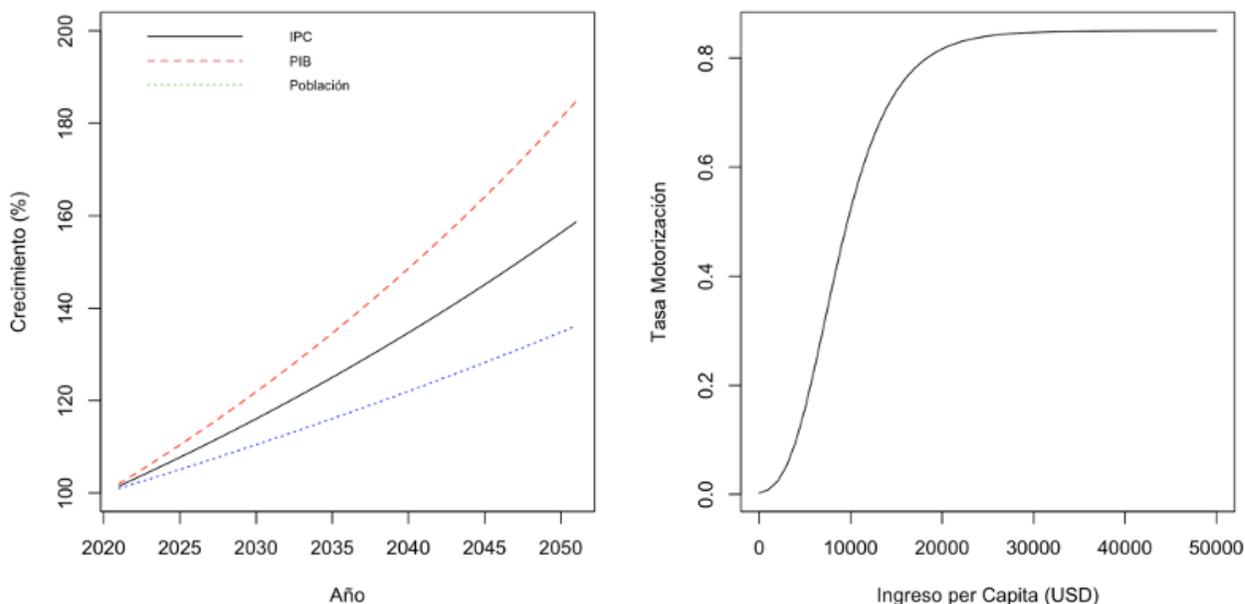


Figura 52: Crecimiento (%) variables socioeconómicas de interés. Fuente: Elaboración propia en base a Dargay et al (1999)

Las tablas a continuación presentan la información del inventario base y su proyección de emisiones, para cada tipo de fuente.

³¹ Disponible en: <https://ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>

Tabla 38: Resultados proyección de emisiones 2021-2031

Inventario Nacional de Emisiones 2021 (Ton/año)														
Fuente	Tipo	BC	CH4	CO	CO2	C02eq	COV	MP	MP10	MP25	N2O	NH3	NOX	SOX
Fijas	Combustión	1.405	2.719	81.576	90.164.393	91.977.988	2.615	29.357	8.668	7.150	2.838	261	139.336	47.830
Fijas	Procesos	8.523	509	93	20.999.514	21.925.580	3	117.749	63.377	43.993	35	377	42.954	187.985
Areales	Residencial	14.157	146	2.97.2296		17.416	1.783.448	152.216	145.828	141.691		8	23.245	832
Areales	Quemas	1.502	8.312	199.453	3.46.3330	3.794.253	3.403	38.558	30.230	23.921	423	1.894	6.574	
Fugitivas	Construcción	0	0	0	0	0	0	880	439	51	0	0	0	0
Fugitivas	Minería	0	0	0	0	0	0	805.140	249.621	31.427	0	0	0	0
Fugitivas	Transporte	0	0	0	0	0	0	62.071	11.914	2.883	0	0	0	0
Móviles	Buses interurbanos	5	2	122	41.473	41.671	17	9	9	8	1	0	433	0
Móviles	Buses rurales	24	15	622	238.873	240.548	77	53	50	42	4	2	2.167	2
Móviles	Buses urbanos	279	170	11.737	3.598.874	3.631.094	1.494	587	547	461	95	31	27.332	34
Móviles	Camiones livianos	115	64	1.751	892.146	903.318	363	199	192	181	32	20	6.196	8
Móviles	Camiones medianos	32		587	233.146	235.147	118	62	59	53	6	2	2.138	2
Móviles	Camiones pesados	147	85	2.871	1.20.2274	1.217.075	488	247	243	230	29	10	11.967	11
Móviles	Motocicletas	4	151	8.305	259.658	264.331	1.529	29	26	22	3	3	193	2
Móviles	Taxis colectivos	15	10	4.331	1.085.228	1.990.966	605	135	115	82	18	14	1.408	10
Móviles	Vehículos livianos	527	315	109.951	10.674.901	10.765.990	16.845	1.910	1.744	1	282	470	16.930	101
Móviles	Vehículos medianos	1.870	114	38.624	7.183.841	7.258.065	3.572	3.025	2.955	2.848	240	71	26.675	68
Móviles	Fuera de ruta	1.543	389	48.788	6.654.950	6.741.347	7.408	5.724	5.506	5.340	260	11	47.999	605
Todas	Todas	30.149	13.915	3.57.5562	146.704.764	148.301.988	1.824.775	1.217.951	521.523	260.069	4.268	3.174	352.947	237.593
Inventario Nacional de Emisiones 2031 (Ton/año)														
Fuente	Tipo	BC	CH4	CO	CO2	C02eq	COV	MP	MP10	MP25	N2O	NH3	NOX	SOX
Fijas	Combustión	1.747	3.380	101.330	112.108.089	113.244.031	3.252	36.502	10.778	8.890	3.528	324	173.246	59.471
Fijas	Procesos	10.597	632	116.190	26.110.256	26.139.060	3.374	146	78.801	53.581	44	469	53.308	232.617
Areales	Residencial	15.795	163	3.318.328	14.911	19.430	1.989.736	169.822	162.695	158.080	1	9	25.934	928

Areales	Quemas	1.502	8.312	199.453	380.330	3.794.253	3.403	38.558	30.230	23.021	423	1.894	6.574	1.000
Fugitivas	Construcción	0	0	0	0	0	0	1.994	546	63	0	0	0	0
Fugitivas	Minería	0	0	0	0	0	0	1.001.991	310.372	39.075	0	0	0	0
Fugitivas	Transporte	0	0	0	0	0	0	77.177		3.584	0	0	0	0
Móviles	Buses interurbanos	5	2	122	41.347	41.671	17	9	9	8	1	0	433	0
Móviles	Buses rurales	24	15	622	238.873	240.548	77	53	50	42	0	2	2.167	2
Móviles	Buses urbanos	279	170	11.737	3.598	3h31194	1.494	587	547	461	95	31	27.332	34
Móviles	Camiones livianos	143	79	2.178	1.109.271	1.123.286	452	248	239	225	40	25	7.704	10
Móviles	Camiones medianos	40	17	729	289.888	292.376	147	78	73	66	7	3	44.965	3
Móviles	Camiones pesados	183	106	3.569	1.499.850	1.513.280	607	308	92	286	36	13	13.710	14
Móviles	Motocicletas	4	152	8.331	260.349	265.135	1.534	29	26	22	3	3	193	2
Móviles	Taxis colectivos	15	10	4.331	1.085.228	1.090.966	605	135	115	82	18		1.308	10
Móviles	Vehículos livianos	529	316	109.383	10.706.393	10.798.763	16.896	1.916	1.750	1.492	283	471	16.979	101
Móviles	Vehículos medianos	1.876	114	38.742	720.579	7.280.159	3.583	3.034	2.964	2.856	240	71	26.757	68
Móviles	Fuera de ruta	1.918	482	60.662	8.273.374	8.382.917	9.211	7.116	6.846	7	324	13	58.562	752
Todas	Todas	34.557	13.984	3.975.806	176.002.768	177.856.070	298.148.6	1.384.162	621.157	298.374	5.090	3.343	416.315	295.915

Tabla 39: Resultados proyección de emisiones 2041-2051

Inventario Nacional de Emisiones 2041 (Ton/año)														
Fuente	Tipo	BC	CH4	CO	CO2	C02eq	COV	MP	MP10	MP25	N2O	NH3	NOX	SOX
Fijas	Combustión	2.129	4	123.642	136.659.135	138.043.841	3.964	44.469	13.138	10.837	4.301	395	211.186	72.745
Fijas	Procesos	12.918	771	141.635	31.828.256	31.863.368	4.234	178.468	96.958	65.315	53	572	65.104	283.559
Areales	Residencial	17.347	180	366.498	16.471	21.463	2.197.617	187.589	179.717	174.618	2	10	28.647	1.026
Areales	Quemas	1.502	8.312	199.453	3.460.330	3.792.253	3.403	38.558	30.230	23.021	423	1.894	6.674	1.000
Fugitivas	Construcción	0	0	0	0	0	0	1.333	666	77	0	0	0	0
Fugitivas	Minería	0	0	0	0	0	0	1.220.324	378.342	47.632	0	0	0	0
Fugitivas	Transporte	0	0	0	0	0	0	94.078	18.958	4.369	0	0	0	0
Móviles	Buses interurbanos	5	2	122	41.773	41.671	17	9	9	8	1	0	433	0
Móviles	Buses rurales	24	15	622	238.873	240.548	77	53	50	42	4	2	2.167	2
Móviles	Buses urbanos	279	170	11.737	3.598.374	3.631.094	1.494	587	547	461	95	31	27.332	34
Móviles	Camiones livianos	175	97	2.654	1.352.195	1.369.280	551	302	291	274	49	31	9.392	13
Móviles	Camiones medianos	48	21	889	359.372	356.280	179	94	89	81	8	3	3.240	3
Móviles	Camiones pesados	223	129	4.351	1.828.309	1.844.680	740	375	368	348	44	16	16.773	17
Móviles	Motocicletas	4	152	8.338	260.684	265.376	1.535	29	26	22	3	3	16.773	2
Móviles	Taxis colectivos	15	10	4.331	1.085.228	1.090.966	605	135	115	82	18	14	1.408	10
Móviles	Vehículos livianos	529	316	109.482	10.716.189	10.808.542	16.911	1.917	1.751	1.494	283	472	16.093	101
Móviles	Vehículos medianos	1.878	114	38.777	7.21.2235	7.286.752	3.586	3.036	2.967	2.859	240	71	26.781	68
Móviles	Fera de ruta	2.338	590	73.947	10.085.319	10.217.632	11.229	8.675	8.345	8.094	394	16	71.386	916
Todas	Todas	93.515	15.001	4.385.479	208.736.543	210.875.872	2.246.430	1.780.961	730.767	339.634	5.921	3.530	486.810	359.248
Inventario Nacional de Emisiones 2051 (Ton/año)														
Fuente	Tipo	BC	CH4	CO	CO2	C02eq	COV	MP	MP10	MP25	N2O	NH3	NOX	SOX
Fijas	Combustión	2.595	5.123	150.719	166.587.323	1.681.742	4.832	54.240	16.015	13.210	5.243	481	257.435	88.371
Fijas	Procesos	15.747	940	172.653	387.981.167	38.841.168	5.162	217.551	117.094	79.618	65	697	79.362	345.556
Areales	Residencial	19.273	199	4.048.991	18.194	23.708	2.427.856	207.215	198.519	192.887	2	11	31.644	1.133

Areales	Quemas	1.502	8.312	199.453	3.360.330	3.794.253	3.403	38.558	30.230	23.021	423	1.894	6.674	1.000
Fugitivas	Construcción	0	0	0	0	0	0	1.125	812	94	0	0	0	0
Fugitivas	Minería	0	0	0	0	0	0	1.487.568	461.197	58.163	0	0	0	0
Fugitivas	Transporte	0	0	0	0	0	0	114.861	22.013	5.326	0	0	0	0
Móviles	Buses interurbanos	5	2	122	41.473	41.671	17	9	9	8	1	0	433	0
Móviles	Buses rurales	24	15	622	238.873	240.548	77	53	50	42	4	2	2.167	2
Móviles	Buses urbanos	279	170	11.731	3.598.474	3.631.094	11.404	587	547	461	95	31	27.332	34
Móviles	Camiones livianos	213	118	3.236	1.648.319	1.669.145	671	368	355	334	60	37	11.448	16
Móviles	Camiones medianos	59	26	1.084	430.758	434.155	218	115	108	98	10	4	3.950	4
Móviles	Camiones pesados	272	157	5.304	2.228.698	2.248.155	902	457	448	424	54	19	20.446	21
Móviles	Motocicletas	4	152	8.341	260.790	265.483	1.536	29	26	22	3	3	194	2
Móviles	Taxis colectivos	15	10	46.331	1.085.228	1.090.966	605	135	115	82	18	14	1.408	10
Móviles	Vehículos livianos	529	316	109.527	10.720.538	10.812.928	16.918	1.918	1.752	1.194	283	472	16.100	101
Móviles	Vehículos medianos	1.878	114	38.793	7.215.361	7.289.701	3.587	3.038	2.968	2.860	241	71	26.792	68
Móviles	Fera de ruta	2.850	719	485.052	248.625.974	25.111.794	13.688	10.575	10.173	9.867	481	20	87.919	1.117
Todas	Todas	45.246	16.274	4.845.052	248.625.974	251.113.794	248.965	238.724	862.432	387.913	6.983	3.757	572.404	437.537

12 Análisis de Beneficios de escenario actual y de nuevos escenarios normativos.

12.1 Glosario

Para mayor claridad, a continuación, se presenta un glosario de términos a utilizar.

Tabla 40. Glosario de términos.

Efectos	Definición
MLT	Mortalidad Prematura Exposición de Largo Plazo
MST	Mortalidad Prematura Exposición de Corto Plazo
HA	Admisiones Hospitalarias
ERV	Visitas salas de urgencia
SLD	Días Escolares Perdidos
WLD	Días Laborales Perdidos
RAD	Días con Actividad Restringida
MRAD	Días con Actividad Restringida Leve
ALL	Todas Las Causas
ASTH	Asma
CVD	Enfermedades Cardiovascular
CPM	Enfermedades cardiopulmonares
DYS	Disritmia
CLD	Enfermedad Respiratoria Crónica
COPD	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
PNEU	Neumonía
RSP	Enfermedades Respiratorias
CHF	Enfermedad Cardio congestiva
IHD	Enfermedad Cardio isquémica
BRO	Bronquitis Aguda

Fuente: Elaboración propia

12.2 Metodología

La metodología de estimación de beneficios corresponde al **método de la función de daño** propuesto por EPA (1991). Esta aproximación recomienda, para la evaluación de impactos ambientales, encadenar una serie de modelos incluyendo la modelación de emisiones y de dispersión de contaminantes, modelos epidemiológicos que determinan reducciones en riesgos

a la salud, y modelos que valorizan económicamente el impacto en calidad de vida de la población expuesta.

Esta misma lógica es la que propone el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) en su Guía para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico (AGIES) y Social para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire (MMA, 2013), en línea con lo que se ha aplicado a nivel nacional históricamente. La siguiente expresión resume cómo se evaluó el **beneficio económico** derivado de la reducción de impactos a la salud j , asociado al contaminante p (MP_{2,5} en este caso), en la población expuesta de la comuna k y el grupo de edad m :

$$BE = \sum_m \sum_j \sum_k g_{j,k,m}(C_{p,k}, P_{k,m}) \times Valor\ unitario_{j,m}$$

Donde:

- BE: Beneficio económico derivado de la reducción de impactos en salud.
- $g_{j,k,m}$: función de impacto a la salud j para la población de la comuna k y perteneciente al grupo de edad m , dependiente de las concentraciones del contaminante p en la comuna k , y la población expuesta en la comuna k , perteneciente al grupo de edad m .
- Valor Unitario _{j,m} : valoración social por reducción en una unidad del impacto a la salud j en la población perteneciente al grupo de edad m .

El **impacto más relevante** en el caso de las medidas evaluadas corresponde a la reducción de **riesgos para la salud**, debido a que las partículas y compuestos emitidos al aire en exceso pueden producir efectos nocivos en la salud de las personas, por ejemplo, dañando el sistema cardio-respiratorio. Este tipo de impacto de la contaminación atmosférica constituye el foco de este estudio.

Para el análisis de beneficios se utilizaron como referencia los impactos cuantificados y monetizados por aumentos de riesgo de mortalidad prematura y morbilidad identificados por la contraparte técnica en diversos estudios. Los **efectos en la salud** asociados a la contaminación del aire (función $g_{j,k,m}$), se estiman usando funciones dosis-respuesta que relacionan niveles de concentración ambiental de contaminantes atmosféricos (MP_{2,5} en este caso) con aumentos en riesgos a la salud, mediante modelos log-lineales como el siguiente:

$$E_{j,p,m,k} = TI_{j,k,m} \times \exp(\beta_{j,p,m} \times C_{p,k}) \times P_{p,k,m}$$

- $E_{j,p,m,k}$: efecto a la salud j en la población expuesta en la comuna k , perteneciente al grupo de edad m , derivado de la concentración ambiental del contaminante p .
- $TI_{j,k,m}$: tasa de incidencia asociada al efecto a la salud j y a la población en la comuna k , perteneciente al grupo de edad m .
- $\beta_{j,p,m}$: coeficiente de riesgo efecto a la salud j para la población del grupo de edad m , por unidad de concentración del contaminante p .
- $C_{p,k}$: concentración ambiental contaminante p en la comuna k .

- $P_{p,k,m}$: población de la comuna k , perteneciente al grupo de edad m , expuesta al contaminante p .

Para un **cambio marginal en la concentración ambiental** (ΔC) es posible estimar cambios en efectos en salud (ΔE) de acuerdo con el siguiente modelo lineal:

$$\Delta E_{j,p,m,k} = TI_{j,k,m} \times (\exp(\beta_{j,p,m} \times C_{p,k}) - 1) \times P_{p,k,m} \approx TI_{j,k,m} \times \beta_{j,p,m} \times \Delta C_{p,k} \times P_{p,k,m}$$

Por otro lado, se calcularon indicadores de **beneficios económicos unitarios**, expresado en USD por $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$, por habitante, para cada comuna (k), aplicando la ecuación propuesta por MMA (2013):

$$BEU_{k,j,p} = \sum_m \sum_j \beta_{j,p,m} \times TI_{j,k,m} \times Valor\ Unitario_{j,m}$$

Finalmente, y en línea con lo planteado por MMA (2013), la **proyección de beneficios económicos** durante el periodo de análisis (2030 – 2050) se realizó utilizando la ecuación presentada a continuación:

$$\begin{aligned} & \text{Beneficio económico}_{\text{Año proyectado}} \\ &= \sum_j \sum_k g_j(C_{p,k,\text{Año proyectado}}, P_{k,\text{Año proyectado}}) \times Valor\ unitario_{j,\text{Año proyectado}} \end{aligned}$$

Donde:

- $\text{Beneficio económico}_{\text{Año proyectado}}$: Beneficio de un año determinado producto de la reducción de impactos a la salud.
- $g_j, \text{Año proyectado}$: Para un determinado año, función de impacto a la salud de la población j , dependiente de las concentraciones del contaminante p en la comuna k , y la población expuesta en la comuna k .
- $\text{Valor Unitario}_{j, \text{Año proyectado}}$: valoración social por reducción del impacto a la salud de la población j en una unidad (o caso), para un año determinado.

Para calcular la fórmula anterior se **proyectaron dos parámetros**: (i) **población expuesta**, la cual afecta la cuantificación del cambio de efectos producto del cambio en la concentración ambiental; y (ii) los **valores unitarios** asociados a cada uno de los efectos cuantificados. Este último parámetro se asume depende directamente de la tasa de crecimiento del ingreso per cápita, según la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \text{Valor unitario}_{\text{Año proyectado}} \\ &= \text{Valor unitario}_{\text{Año original}} \times (1 + TC_{IPC})^{\text{Año proyectado} - \text{Año Original}} \end{aligned}$$

Donde:

- Valor unitario_{Año proyectado}: Valor que se le otorga al efecto en salud para cierto año del periodo de análisis.
- Valor unitario_{Año original}: Valor que se le otorga al efecto en salud calculado originalmente. En este caso corresponde al año 2023.
- TC_{IPC}: Tasa de crecimiento del ingreso per cápita.

A su vez, la **tasa de crecimiento del ingreso per cápita** se estima según la siguiente ecuación:

$$TC_{IPC} = \frac{(1 + TC_{PIB})}{(1 + TC_{Pob})}$$

Donde:

- TC_{PIB}: Tasa de crecimiento del PIB.
- TC_{Pob}: Tasa de crecimiento de la población.

A partir de la aplicación de la metodología expuesta, en las siguientes secciones se presentan los **resultados** y **valores utilizados** para el análisis de los beneficios en salud, derivados de diversos niveles de concentración anual de MP_{2,5}.

12.3 Valores utilizados

A continuación, se describen los valores de los parámetros utilizados para estimar los efectos en salud y beneficios económicos presentados en la sección anterior. Estos parámetros corresponden a: (i) coeficientes de riesgo efecto a la salud; (ii) concentraciones de MP_{2,5}; (iii) tasas de incidencia; (iv) población expuesta; y (v) costos económicos de efectos a la salud. Cabe mencionar que la información de tasas de incidencia, población y concentraciones de MP_{2,5} se trabajó a nivel comunal, sin perjuicio de que las tablas contenidas en este informe se presenten a nivel agregado.

12.3.1 Coeficientes de riesgo

En primer lugar, la Tabla 41 presenta los coeficientes de riesgo vinculados a los efectos a la salud por µg-m³ de MP_{2,5}. Estos valores varían según efecto a la salud, causa y grupo de edad.

Tabla 41. Coeficientes de riesgo asociados a efectos a la salud por $\mu\text{g-m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ por grupo de edad (Media).

Tipo de efecto	Efecto	Causa	<18	18–29	30–64	65+	Fuente
Mortalidad prematura	MLT	CPM	-	-	0,006	0,006	Busch, Cifuentes & Cabrera (2023)
Acciones médicas	HA	COPD	-	0,0022	0,0022	0,001169	Moolgavkar (2000) & Ito (2003)
		ASTH	0,003324	0,003324	0,003324	0	Sheppard et al. (2003)
		CVD	-	0,0014	0,0014	0,00158	Moolgavkar (2000, 2003)
		PNEU	-	-	-	0,003979	Ito (2003)
	ERV	ASTH	0,016527	-	-	-	Norris et al. (1999)
		BRO	0,0044	-	-	-	Dockery et al. (1989)
Restricción actividad	RAD		-	0,0048	0,0048	-	Ostro (1987)
	WLD		-	0,0046	0,0046	-	Ostro (1987)

Fuente: Elaboración propia.

12.3.2 Concentraciones

Para el análisis se procedió a estimar concentraciones de material particulado fino por comuna, para esto se consideró información de redes de monitoreo disponible e información satelital de disponible³² y simulaciones para material particulado fino realizadas con la misma data³³. Mediante el algoritmo *Random Forest*³⁴, se calibró la información satelital con la información de monitoreo continuo disponible y se completó la información faltante para el periodo 2010-2021 a nivel diario. Finalmente se procedió a estimar la concentración anual para la situación actual. A continuación, se presentan los resultados obtenidos ordenados por latitud.

³² <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>

³³ <https://sites.wustl.edu/acag/datasets/surface-pm2-5/>

³⁴ Breiman, Leo. "Random Forests." *Machine Learning* 45 (2001): 5-32.

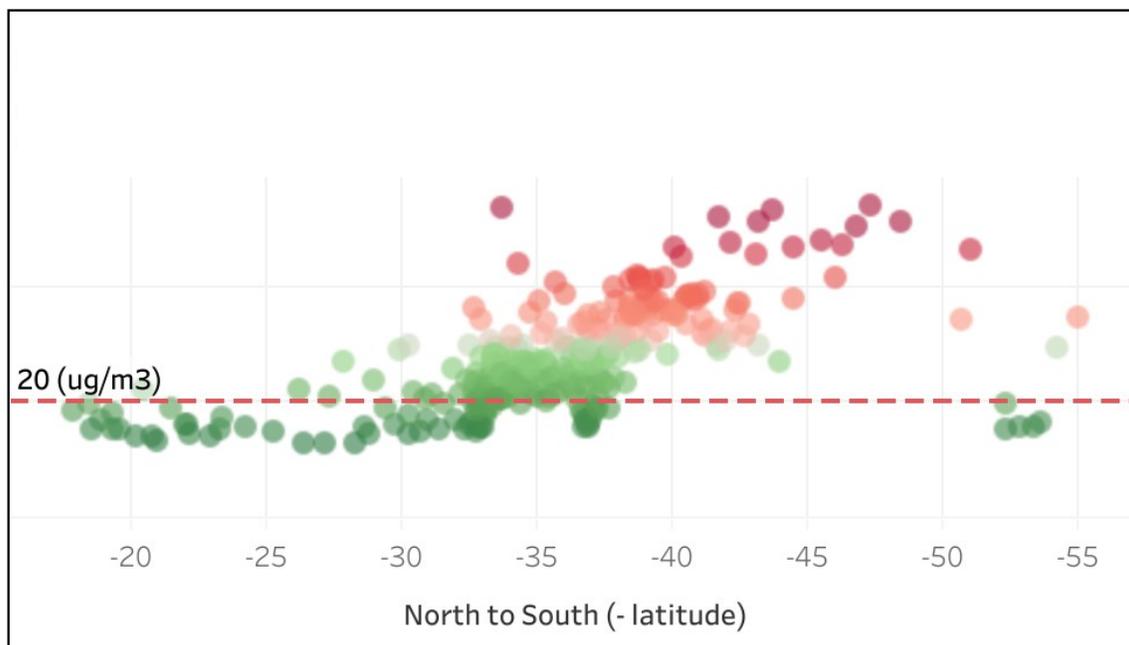


Figura 53. Concentración $MP_{2,5}$ simulada por comuna de Norte a Sur. Fuente: Elaboración propia.

La exposición promedio del habitante nacional es de 22 $mg\cdot m^{-3}$ de $MP_{2,5}$. A continuación se presenta el detalle de las concentraciones a nivel comunal.

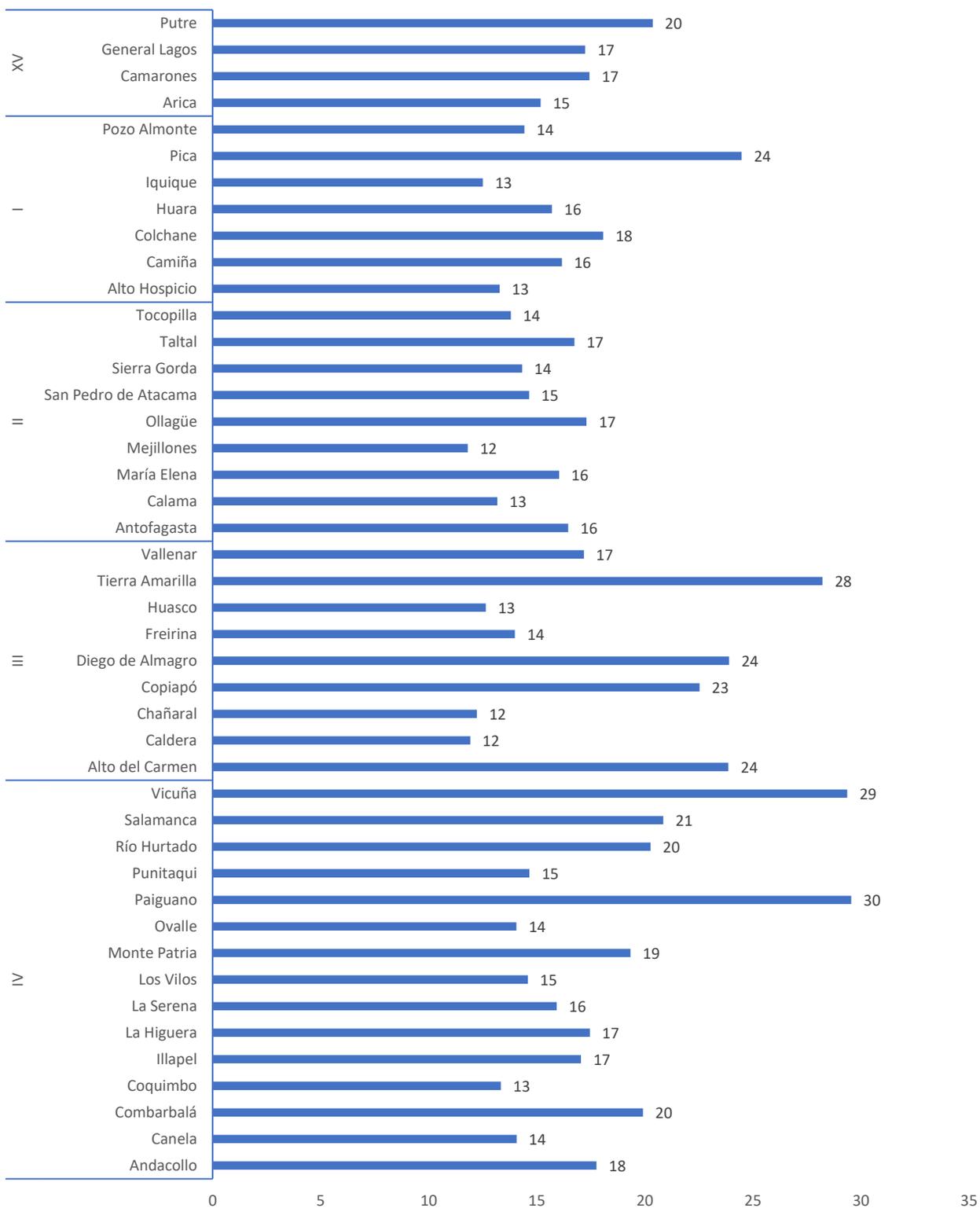


Figura 54: Concentración anual de MP_{2,5} (µg-m³). Zona Norte. Fuente: Elaboración propia.

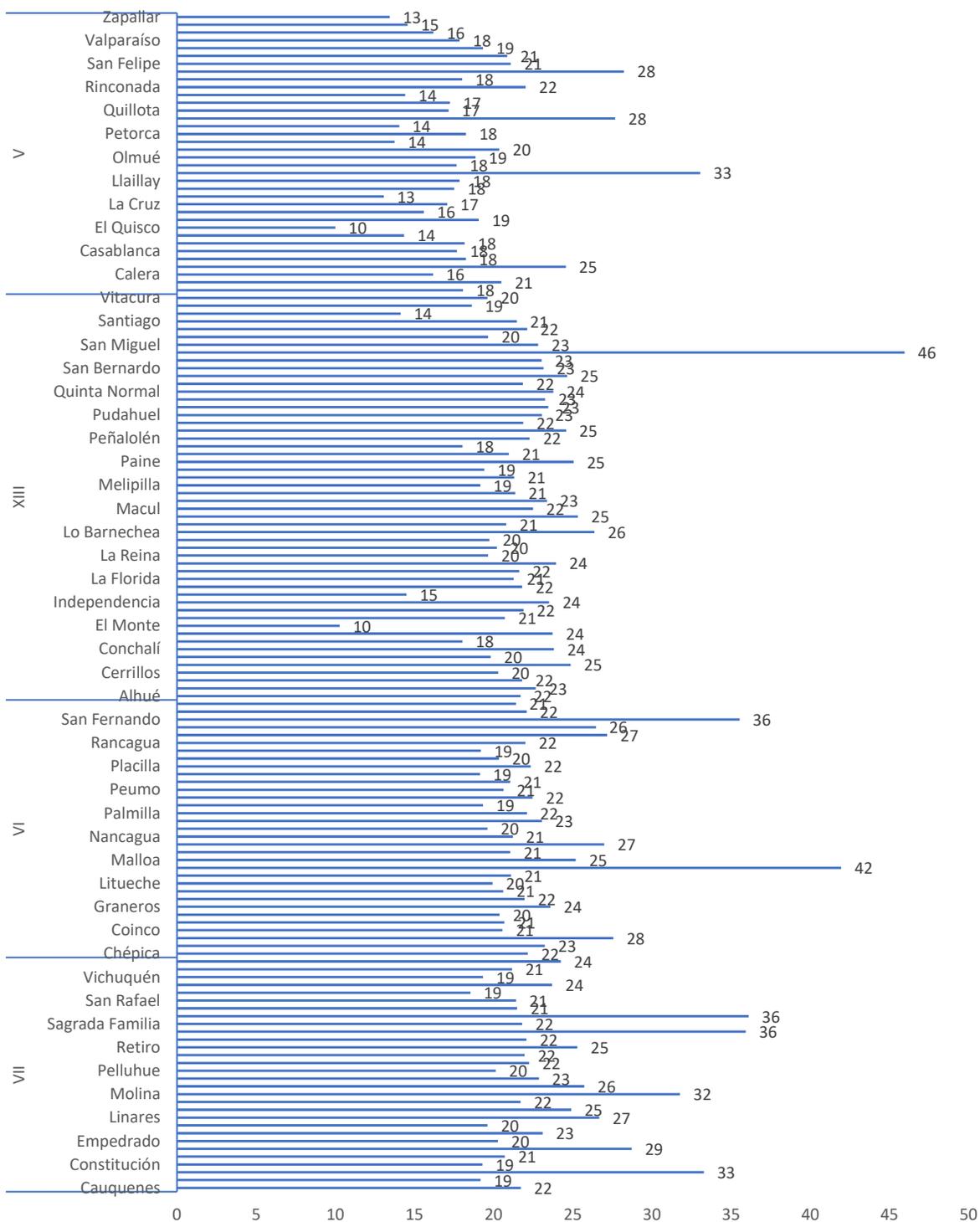


Figura 55: Concentración anual de MP_{2,5} (µg-m³). Zona Centro. Fuente: Elaboración propia.

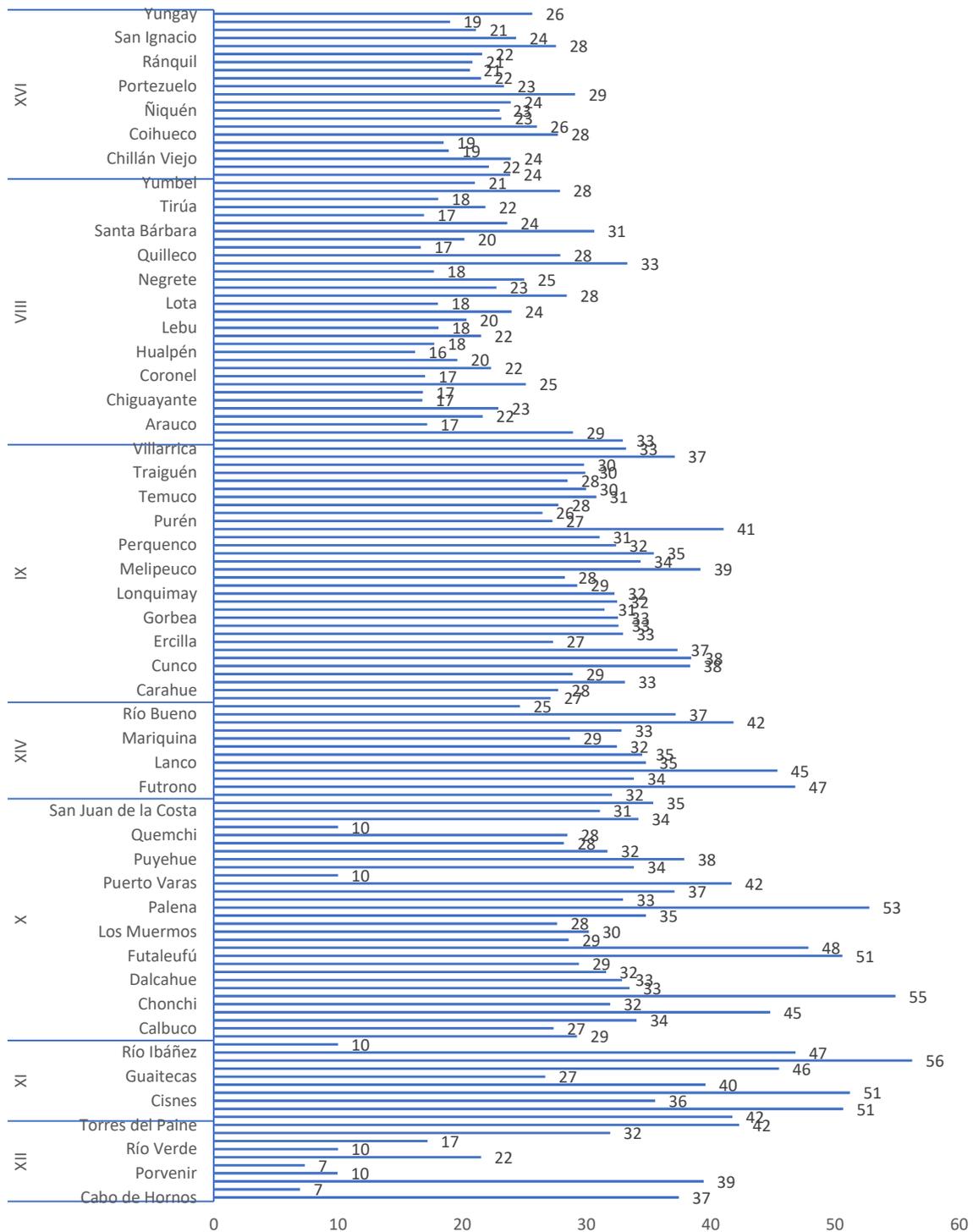


Figura 56: Concentración anual de MP_{2,5} (µg-m³). Zona Sur. Fuente: Elaboración propia.

12.3.3 Tasas de incidencia

Por otra parte, la Tabla 42 sintetiza las tasas de incidencia a nivel nacional utilizadas por el presente estudio, a partir de lo desarrollado por DICTUC (2022). Destacar que para el caso de mortalidad prematura se recurrió, a modo conservador, a una al año 2018 dado que representa uno de los valores de tasas de incidencia más bajos de los últimos años. Debido a su relevancia en impactos en salud, la Tabla 43 presenta las tasas de incidencia asociadas a mortalidad prematura (CPM) a nivel regional por grupo de edad.

Tabla 42. Tasas de incidencia a nivel nacional por grupo de edad (Casos cada 100 mil habitantes). Fuente: Elaboración propia a partir de DICTUC (2022).

Tipo de Efecto	Efecto	Causa	<18	18–29	30–64	65+
Mortalidad prematura	MLT	CPM	2	4	72	1.556
Acciones médicas	HA	ASTH	64	10	19	61
		CLD	192	19	71	716
		CVD	30	62	528	3.510
		PNEU	771	61	164	1.811
	ERV	BRO	51.262	0	0	0
Restricción actividad	MRAD	-	772.496	773.498	772.670	772.278
	RAD	-	0	640.660	639.975	0
	WLD	-	0	150.370	146.695	0

Tabla 43. Tasas de incidencia asociadas a mortalidad prematura (CPM) a nivel regional (Casos cada 100 mil habitantes).

Región	<18	18–29	30–64	65+
Arica y Parinacota	5	0	62	1.440
Tarapacá	1	4	72	1.201
Antofagasta	3	8	79	1.532
Atacama	1	7	75	1.560
Coquimbo	1	5	64	1.448
Valparaíso	4	4	81	1.629
Metropolitana de Santiago	2	5	68	1.554
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	3	4	67	1.486
Maule	2	3	73	1.575
Ñuble	3	4	78	1.577
Biobío	3	3	80	1.561
Araucanía	5	4	81	1.568
Los Ríos	1	1	70	1.650
Los Lagos	3	5	76	1.624
Aysén del Gral. Carlos Ibañez del Campo	0	6	68	1.189
Magallanes y de la Antártica Chilena	3	3	81	1.675

Fuente: Elaboración propia a partir de DICTUC (2022).

Finalmente, la Figura 57 grafica, para cada comuna, la relación entre las tasas de incidencia asociadas a mortalidad prematura (CPM) para mayores de 65 años, y las concentraciones anuales de MP_{2,5}.

TI MLT CPM +65
(casos por 100 mil habitantes)

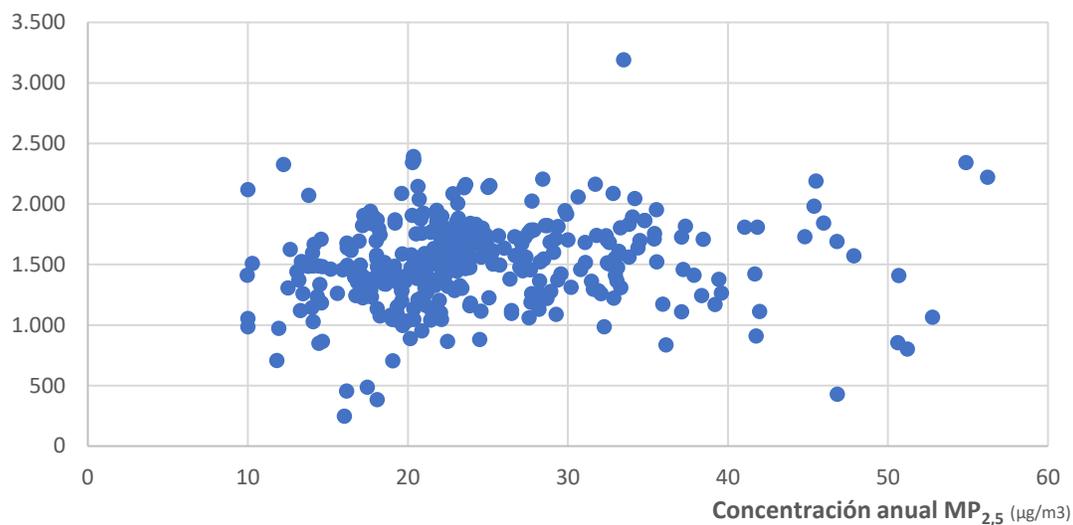


Figura 57: Tasas de incidencia por comuna para mortalidad prematura (cardiopulmonar) para mayores de 65 años.
Fuente: Elaboración propia a partir de DICTUC (2022).

12.3.4 Población expuesta

La Tabla 44 resume la información de población expuesta utilizada como insumo para el análisis. Esta corresponde al año 2023 y fue entregada por el Ministerio del Medio Ambiente.

Tabla 44. Población para el año 2023 según grupo de edad.

Región	<18	18–29	30–64	65+	Total
Arica y Parinacota	62.720	47.645	116.978	32.459	259.802
Tarapacá	105.907	76.040	183.075	36.566	401.588
Antofagasta	173.902	138.127	340.353	61.760	714.142
Atacama	82.117	50.952	147.648	38.331	319.048
Coquimbo	205.425	142.620	398.215	122.843	869.103
Valparaíso	432.167	340.649	914.750	323.283	2.010.849
Metropolitana de Santiago	1.822.946	1.491.972	4.036.981	1.015.891	8.367.790
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	231.477	145.619	489.568	151.037	1.017.701
Maule	264.560	179.188	542.827	176.066	1.162.641
Ñuble	113.186	76.245	243.167	86.839	519.437
Biobío	374.002	279.794	785.725	241.909	1.681.430
Araucanía	239.208	164.202	470.203	154.588	1.028.201
Los Ríos	90.811	67.500	191.108	61.786	411.205
Los Lagos	204.638	140.248	439.854	122.689	907.429
Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	26.838	14.770	53.735	12.963	108.306
Magallanes y de la Antártica Chilena	38.379	30.229	88.491	25.118	182.217
Total	4.468.283	3.385.800	9.442.678	2.664.128	19.960.889

Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por el MMA.

Para efectos de la proyección de beneficios, se utilizaron las estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050 publicadas por el Instituto Nacional de Estadísticas el año 2018 (Figura 58).

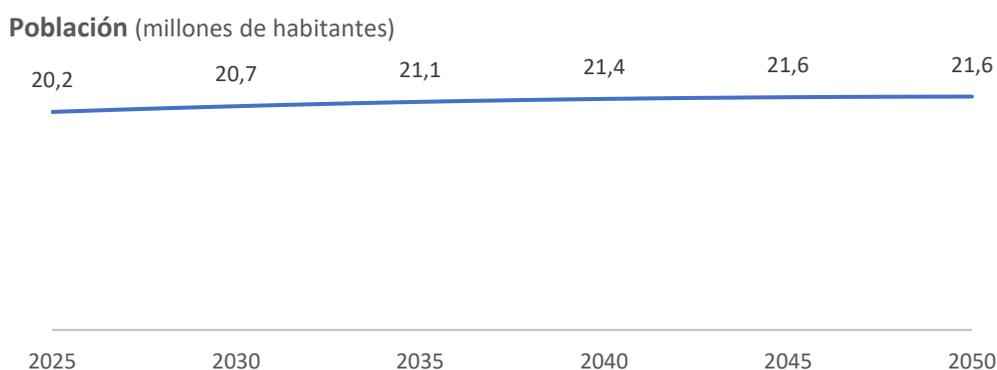


Figura 58: Población nacional al 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de INE (2018).

12.3.5 Valor unitario

Finalmente, la Tabla 45 contiene los valores económicos asociados a los efectos en salud (y causas) según grupo de edad, utilizados para el presente estudio. Estos valores fueron obtenidos desde Rizzi y De La Maza (2017) y actualizados a la fecha.

Tabla 45. Valores económicos asociados a los efectos en salud (y causas) según grupo de edad (USD por caso).

Tipo de efecto	Efectos	Causa	<18	18–29	30–64	65+
Mortalidad prematura	MLT	CPM	1.343.653	1.343.653	1.343.653	1.343.653
Acciones médicas	HA	ASTH	880	880	880	964
		COPD	1.131	1.131	1.131	1.131
		CVD	-	1.886	1.886	1.844
		PNEU	1.216	1.216	1.216	1.216
		RSP	754	1.006	1.006	1.216
	ERV	ASTH	42	42	42	42
Restricción actividad	WLD	-	-	29	29	-
	RAD	-	-	8	8	-

Fuente: Elaboración propia en base a Rizzi y De La Maza (2017)

12.4 Resultados

Los resultados se presentan en términos de casos evitados y beneficios económicos. Este último en términos anuales (USD por año), unitarios (USD por mg-m³ de MP_{2,5} por habitante) y en valor presente (USD).

12.4.1 Beneficios anuales

El análisis se realizó en función de diversos escenarios de concentración anual de calidad de MP_{2,5}, asumiendo el total cumplimiento de dichos valores de referencia. Dichos escenarios van desde 0 a 30 mg-m³ de MP_{2,5}, con beneficios anuales a nivel nacional de entre 225 millones de USD³⁵ y cerca de 9 mil millones de USD respectivamente (ver Figura 59). Este último escenario se incorpora dado que es asimilable al daño total para la salud de la población de las concentraciones actuales (modeladas) de MP_{2,5}.

³⁵ Un escenario hipotético de norma de 30 µg-m³ representa beneficios aun cuando la norma de calidad de MP_{2,5} es de 20 µg-m³. Esto se debe a que existen localidades que superan la norma actual, con concentraciones anuales mayores a 30 µg-m³, lo que explica que existan reducciones de concentraciones y por ende beneficios en salud.

Beneficio (Miles de millones de USD)

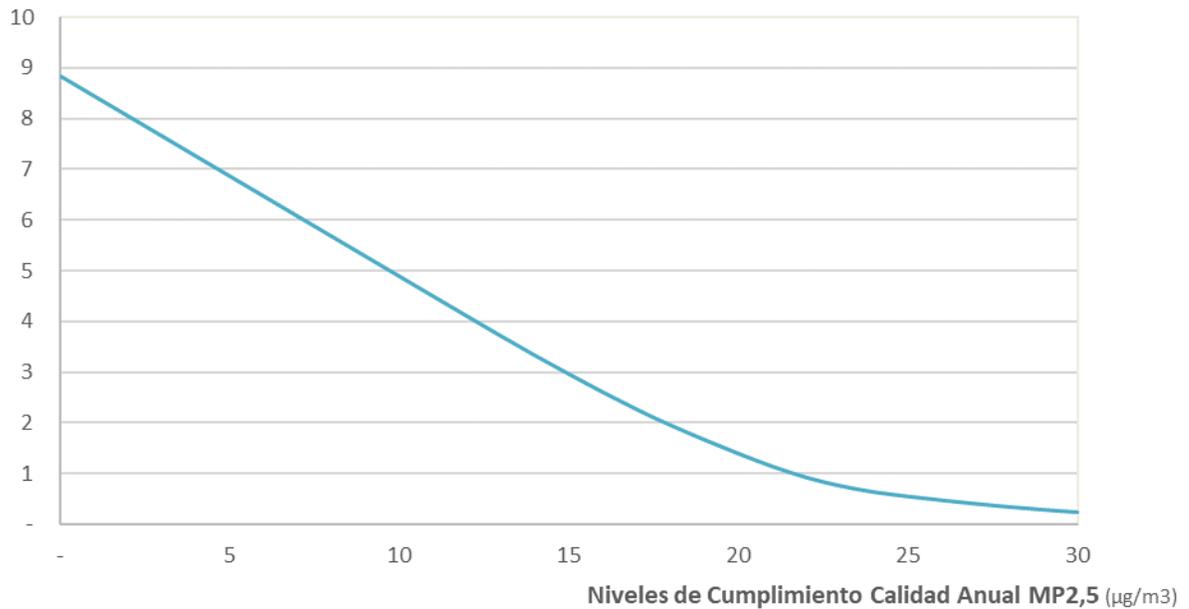


Figura 59. Beneficios económicos en salud a nivel nacional diferentes niveles de cumplimiento de valores anuales de calidad de MP_{2,5}.

Los beneficios se calcularon con valores al 2023. Más adelante se presentan resultados que asumen plazos de implementación de los escenarios de norma. Por otra parte, cabe destacar que los escenarios asociados a niveles sobre 20 µg-m³ de MP_{2,5} deben ser descartados del cómputo final, ya que corresponden a beneficios de alcanzar la normativa vigente.

En términos unitarios, el promedio ponderado a nivel nacional es de 680 USD anuales por µg-m³ de MP_{2,5}, por habitante. La siguiente tabla presenta dicho valor a nivel regional.

Tabla 46. Beneficios económicos en salud unitarios por región (USD anuales por $\mu\text{g-m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$, por habitante).

Región	Beneficio unitario (USD anuales por $\mu\text{g-m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$, por habitante)
Arica y Parinacota	259
Tarapacá	402
Antofagasta	403
Atacama	1.073
Coquimbo	635
Valparaíso	719
Metropolitana de Santiago	258
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	1.222
Maule	1.084
Ñuble	1.667
Biobío	858
Araucanía	1.354
Los Ríos	1.316
Los Lagos	1.410
Aysén del Gral. Carlos Ibañez del Campo	3.452
Magallanes y de la Antártica Chilena	827
Total	680

Fuente: Elaboración propia.

12.4.2 Valor presente

Por otra parte, se estimó el valor presente de los beneficios económicos anuales, considerando una tasa de descuento del 6 % (“Informe Precios Sociales 2023”, Ministerio de Desarrollo Social), y un periodo de implementación de norma desde 2030 hasta 2050. Asimismo, se ajustó la población y los valores unitarios según las ecuaciones presentadas en la sección precedente, utilizando una tasa de crecimiento del PIB del 2% anual y la proyección poblacional del INE (2018)³⁶.

³⁶ “Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050”. Instituto Nacional de Estadísticas, 2018.

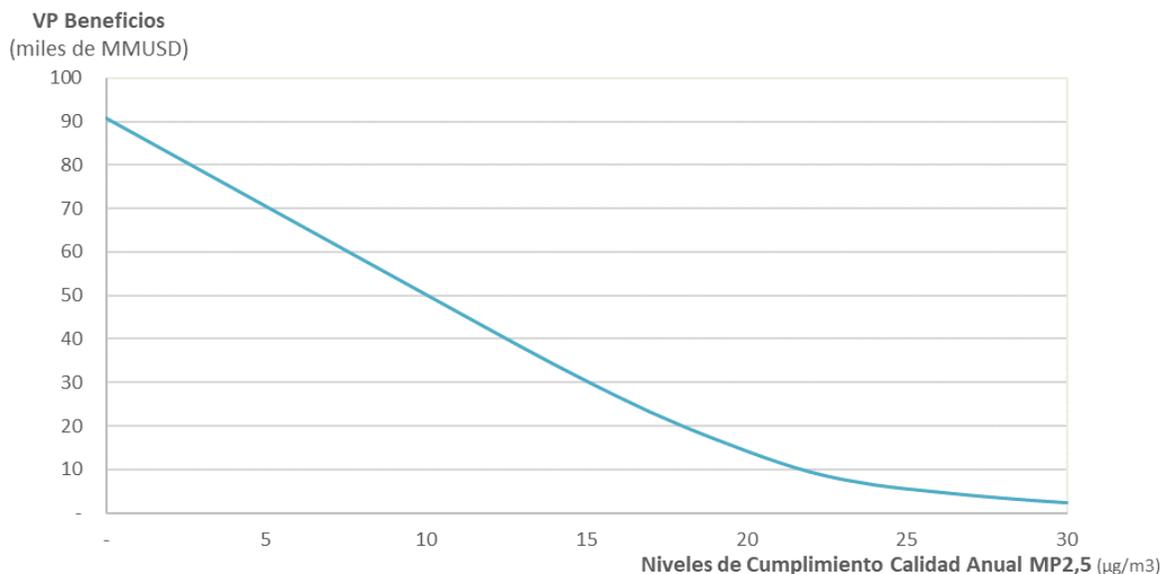


Figura 60: Valor presente beneficios económicos en salud a nivel nacional diferentes niveles de cumplimiento de valores anuales de calidad de MP_{2,5}. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 47 entrega el detalle del valor presente de los beneficios económicos en salud a nivel nacional, en función del cumplimiento de diferentes escenarios de Norma de Calidad Anual de MP_{2,5}. El análisis de incertidumbre se realizó en función de la distribución de probabilidades del coeficiente de riesgo de mortalidad prematura (CPM).

Tabla 47. Valor presente beneficios económicos en salud a nivel nacional de diferentes escenarios de Norma de Calidad Anual de MP_{2,5}.

Escenario (µg/m ³)	Valor presente (Miles de millones de USD)		
	Media	p5	p95
5	70.400	-	138.000
10	50.100	-	98.000
12	42.000	-	82.000
15	30.300	-	59.000

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 48 presenta la participación de los diversos efectos (y causas) en salud respecto del total de beneficios económicos de la implementación de los diversos escenarios de norma.

Tabla 48. Participación de los diversos efectos en salud (y causas) en el total de beneficios económicos.

Tipo de efecto	Efecto	Causa	Participación	
Mortalidad Prematura	MLT	CPM	97,3%	
Acciones médicas	HA	ASTH	0,0%	
		CVD	0,2%	
		PNEU	0,1%	
		RAD	-	1,4%
		WLD	-	1,1%

Fuente: Elaboración propia.

Según se desprende de la tabla anterior, el grueso de los beneficios corresponde a casos evitados de mortalidad prematura (CPM), los que representan el 97% del total.

12.4.3 Casos evitados

En virtud de su importancia, la Figura 61 presenta el mismo análisis de la figura anterior, pero para este tipo de efecto (mortalidad prematura) y causa (CPM). Dichos valores van desde 160 hasta cerca de 5 mil casos evitados para los escenarios de 30 y 5 $\mu\text{g}-\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$, respectivamente.

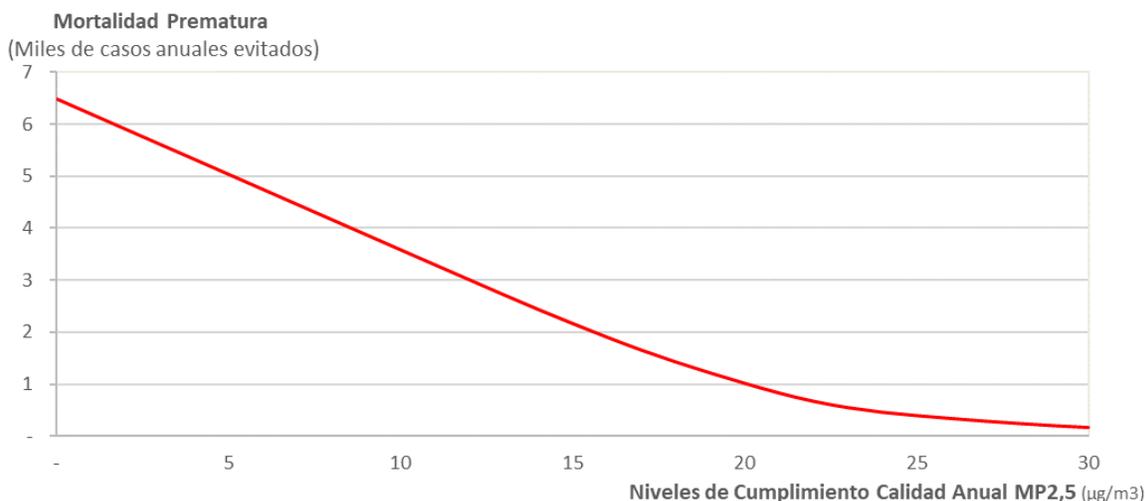


Figura 61: Casos evitados de mortalidad prematura (CPM) a nivel nacional diferentes niveles de cumplimiento de Norma Anual $\text{MP}_{2,5}$. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, y a modo ilustrativo, la Tabla 49 presenta los casos evitados a nivel nacional asociados a alcanzar diferentes escenarios de norma anual de $\mu\text{g}-\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$.

Tabla 49. Casos evitados a nivel nacional relativos a un nivel de concentración anual de 5 mg-m3 de MP_{2.5}.

Escenario	Tipo de efecto	Efecto	Causa	<18	18–29	30–64	65+	Total
0	Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	913	5.562	6.475
	Acciones médicas	HA	ASTH	206	24	134	0	363
			CVD	0	63	1.548	3.291	4.902
	Restricción actividad	ERV	PNEU	0	0	0	4.437	4.437
			BRO	223.229	0	0	0	223.229
	Restricción actividad	WLD	-	0	509.124	1.400.006	0	1.909.130
-			0	2.277.046	6.425.369	0	8.702.415	
5	Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	708	4.318	5.026
	Acciones médicas	HA	ASTH	159	18	104	0	281
			CVD	0	48	1.198	2.552	3.799
	Restricción actividad	ERV	PNEU	0	0	0	3.477	3.477
			BRO	172.838	0	0	0	172.838
	Restricción actividad	WLD	-	0	392.025	1.081.411	0	1.473.437
-			0	1.756.451	4.975.030	0	6.731.481	
10	Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	503	3.075	3.578
	Acciones médicas	HA	ASTH	111	13	75	0	199
			CVD	0	34	849	1.814	2.697
	Restricción actividad	ERV	PNEU	0	0	0	2.517	2.517
			BRO	122.447	0	0	0	122.447
	Restricción actividad	WLD	-	0	274.927	762.817	0	1.037.745
-			0	1.235.858	3.524.696	0	4.760.554	
12	Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	422	2.579	3.001
	Acciones médicas	HA	ASTH	93	11	63	0	166
			CVD	0	28	710	1.519	2.257
	Restricción actividad	ERV	PNEU	0	0	0	2.134	2.134
			BRO	102.366	0	0	0	102.366
	Restricción actividad	WLD	-	0	228.234	635.768	0	864.002
-			0	1.028.309	2.946.645	0	3.974.954	
15	Mortalidad Prematura	MLT	CPM	0	0	304	1.860	2.163
	Acciones médicas	HA	ASTH	66	8	46	0	119
			CVD	0	20	510	1.092	1.622
	Restricción actividad	ERV	PNEU	0	0	0	1.577	1.577
			BRO	73.595	0	0	0	73.595
	Restricción actividad	WLD	-	0	161.153	453.078	0	614.230
-			0	730.243	2.114.438	0	2.844.681	

Fuente: Elaboración propia.

13 Costos totales de los escenarios normativos propuestos

13.1 Metodología cálculo de costos

A continuación, se evaluaron los costos totales de los escenarios normativos propuestos. Para esto, se realizó un análisis de costo-eficiencia determinando la costo-efectividad de cada medida, esto es, según el costo de reducir en una unidad la concentración de $MP_{2,5}$ (USD por $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$ reducido). El análisis se realizó para cada comuna del país a nivel de fuente emisora, lo que requirió relacionar reducciones en emisiones de material particulado directo o de sus precursores, con variaciones en la concentración ambiental de $MP_{2,5}$ en base a factores emisión-concentración (FEC).

Los costos consideraron la inversión, operación y mantenimiento de diferentes medidas de control. Se utilizó costos medios recopilados para estas medidas de estudios previos, que consideran costos de inversión en base anualizada según su vida útil. Con esta información se evaluaron los escenarios normativos en análisis, para comparar con sus beneficios, y determinar su eficiencia económica. Para fuentes fijas se detalló costos a nivel de fuente emisora. Para los escenarios normativos se asume que la norma diaria $MP_{2,5}$ se selecciona de tal manera que la norma anual represente siempre la condición más estricta. Tomando un enfoque conservador, se consideró que irrogan costo cero medidas que generen ahorros económicos cuando su implementación representa mejoras operacionales superiores a los costos de inversión requeridos.

Los costos para el Estado se consideran despreciables en comparación a los costos de cumplimiento de la normativa que deba incurrir el sector privado y la población en general. Se asume que los costos asociados a programas de fiscalización realizados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), no sufrirán variaciones de modificarse la norma de calidad actual. Para llegar a esta conclusión, se revisó resoluciones que fijan programas y subprogramas de fiscalización de planes de prevención y/o descontaminación o normas de emisión. A su vez, se recabó información de costos de fiscalización de leyes de presupuesto y juicio experto en base a la experiencia del consultor en el diseño de estos programas.

En síntesis, para la estimación de costos de control de emisiones asociado a diversos niveles de referencia de calidad ambiental de $MP_{2,5}$ se utilizó, en lo fundamental, información sobre: (i) emisiones según fuente emisora, comuna y contaminante; y (ii) eficiencias de reducción según medida de control y contaminante; (iii) costos medios (USD por tonelada de contaminante reducido) según medida de control; y (iv) fracción de componentes elementales de $MP_{2,5}$. A partir de la información anterior, la estimación de costos siguió los siguientes pasos:

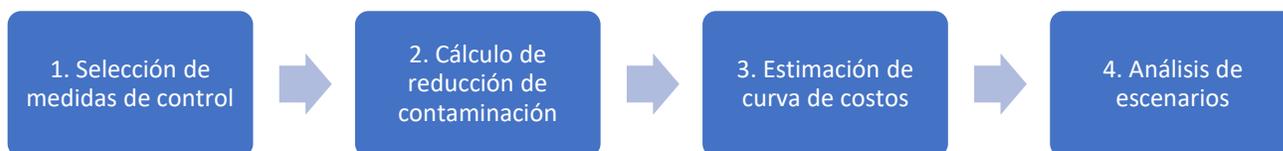


Figura 62: Estimación de costos de control de emisiones. Fuente: Elaboración propia en base a DICTUC (2022).

13.1.1 Selección de medidas de control

Para la estimación de costos unitarios se identificaron alternativas de mitigación según tipos de fuente emisora. Para esto se recabó información en la experiencia nacional en distintos instrumentos de gestión ambiental vigentes y detallada en análisis generales de impacto económico y social (AGIES) desarrollados por el Ministerio del Medio Ambiente, y en la evaluación económica de la meta de carbono neutralidad desarrollada por el Ministerio de Energía³⁷. A nivel internacional, se revisó la información recopilada en el programa CoST de la agencia de protección ambiental de EE. UU³⁸³⁹. Todas las medidas identificadas fueron descritas según su eficiencia en reducción de contaminantes, vida útil, costos medios, y otra información relevante. Se construyó una base de datos parametrizada que sistematizó la información recopilada.

La selección de medidas incluye un conjunto de 450 medidas de control de diversas fuentes de información (ver ANEXO IX: Medidas de control de emisiones), tales como las modeladas para el estudio de los costos de la carbono neutralidad (MEN, 2019), medidas de control de la Agencia de Protección Ambiental de USA, así como las seleccionadas para el sector residencial en Análisis Generales de Impacto Económico y Social de Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica seleccionados (e.g. Maule, Quillota y Valdivia). Se identificó la eficiencia de cada medida en la reducción de material particulado fino (MP_{2,5}), y precursores secundarios de su formación como amoníaco (NH₃), óxidos de nitrógeno (NO_x) o dióxido de azufre (SO₂).

Para cada fuente emisora a nivel comunal se seleccionó una medida de control desde una perspectiva conservadora. Esto es, para alternativas similares se escogió la de mayor costo y/o menor reducción. Para dicha selección se analizó el origen de la fuente emisora (e.g. móviles en ruta, fuera de ruta, residenciales, fijas, polvo resuspendido construcción edificios, caminos y operación faenas mineras, quemas agrícolas, incendios forestales, puertos y aeropuertos), sector (e.g. comercial, público y residencial, construcción, electricidad, industria, minería, residuos, silvoagropecuario, transporte, uso de la tierra), categoría (e.g. pasajeros o carga), energético (e.g. diesel o gas), entre otros. El código de clasificación de fuente (CCF8) representó el vínculo entre fuente emisora y medida de control. En anexos se entrega mayor detalle respecto de las medidas de control recopiladas.

³⁷ [informe resumen cn 2019 v07.pdf \(energia.gob.cl\)](https://www.energia.gob.cl/informe-resumen-cn-2019-v07.pdf).

³⁸ <https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/cost-analysis-modelstools-air-pollution>

³⁹ https://www.epa.gov/system/files/other-files/2023-02/CMDB_2022-05-25%20-%20DEV.zip.

13.1.2 Reducción de emisiones y concentración de $MP_{2,5}$

Para cada fuente emisora se estimó la reducción de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de $MP_{2,5}$ en promedio anual a partir de la implementación de medidas de control de emisiones. Para ello fue necesario relacionar concentración de $MP_{2,5}$ con emisiones reducidas de material particulado fino ($MP_{2,5}$), amoníaco (NH_3), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2). Esto considerando las eficiencias de reducción de las medidas de control según cada contaminante. Con este objetivo, se consideró estimó utilizar la metodología rollback que asume una relación lineal entre emisión y concentración, debido a la complejidad de realizar una modelación de calidad del aire en base a modelos de transporte o fotoquímicos a nivel nacional, y considerando que la unidad de análisis territorial del presente estudio corresponde a cada comuna del país.

Se estimaron factores emisión-concentración (FEC) para establecer las relaciones entre emisiones de contaminantes criterio y concentración de $MP_{2,5}$. Para ello se utilizó información sobre la fracción de componentes elementales de $MP_{2,5}$, tal como se describe en la Guía para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico (AGIES) y Social para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire (MMA, 2013). Se dispone de esta información sólo para las ciudades de Santiago, Temuco y Tocopilla. Para Santiago se utilizó lo reportado por Rizzi y De La Maza (2017) (Figura 63). Se asignó esta composición a otras comunas según la similitud en la composición de fuentes emisoras presentes.

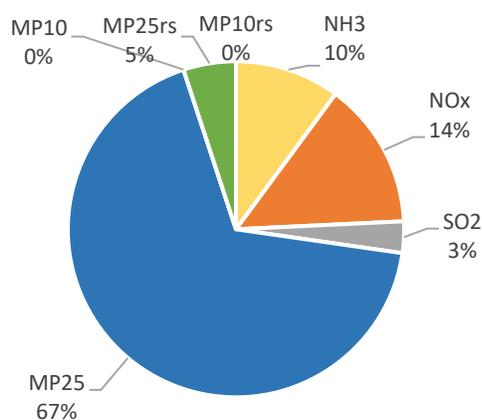


Figura 63. Fracción de componentes elementales para $MP_{2,5}$. Fuente: Elaboración propia en base a Rizzi y De La Maza (2017) ⁴⁰.

Se utilizó como base para la estimación FEC inventarios de emisión a nivel comunal. La Tabla 50 resume el inventario de emisiones a nivel nacional para el año 2020. Se ajustó el inventario de

⁴⁰ Centro Mario Molina, 2014. "Propuesta de regulaciones para la reducción del $MP_{2,5}$, sus precursores y contaminantes que afecten al cambio climático, para las distintas fuentes estacionarias de la región Metropolitana". Informe para el Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile.

emisiones estimado, utilizando la mejor información disponible, que incluye emisiones reportadas para el pago del impuesto verde a fuentes fijas, y dejando fuera del análisis datos atípicos, como los de 256 calderas para calefacción en el sector residencial con emisiones mayores a 1.000 toneladas anuales de CO₂. Se aprecia que el inventario de emisiones estimado se asemeja a otras estimaciones realizadas en el cálculo del inventario de gases de efecto invernadero a nivel nacional por el Ministerio del Medio Ambiente⁴¹, que utiliza como referencia datos más agregados, aunque de mayor precisión, como reportes de consumo de combustible a nivel regional.

Tabla 50. Inventario de emisiones al 2020 a nivel nacional (ton/año).

Sector	CH4	CO2	N2O	MP25	MP25rs	NH3	MP10	NOx	SO2
Calefacción residencial	139	422,694	9	103,566	0	9	17,558	536	139
Edificaciones	184	8,371,845	105	1,217	0	41	15,769	578	184
Construcción	176	2,784,220	115	2,286	0	4	18,649	85	176
Electricidad	460	29,093,342	1,338	616	0	5	46,956	24,674	460
Industria	1,371	38,088,989	919	40,502	439	486	57,239	110,598	1,371
Minería	168	6,335,210	76	5,012	31,427	25	24,231	93,170	168
Residuos	2	113,401	1	17	0	1	266	2	2
Silvoagropecuario	2,116	2,909,032	114	7,418	0	800	16,738	832	2,116
Transporte	1,042	28,276,963	769	5,715	2,893	643	118,223	680	1,042
Uso de la tierra	6,302	2,332,017	371	17,388	0	1,098	4,778	642	6,302
Total	11,959	118,727,714	3,816	183,737	34,759	3,111	320,407	231,797	11,959

Fuente: Elaboración propia.

Para la estimación de FEC también se utilizó concentraciones de material particulado fino por comuna, de redes de monitoreo públicas e información satelital de disponible⁴², incluyendo simulaciones para MP_{2,5} realizadas con la misma data⁴³. La información satelital se extrajo de Donkelaar et al (2021) que la estimó a nivel mundial⁴⁴. Esto permite obtener información de la calidad del aire en zonas donde aún no se dispone de mediciones, con series de tiempo por mes, año, latitud y longitud desde 1998 a 2021. Se calibró información satelital con monitoreos continuos y se completó la faltante para el periodo 2010-2021 a nivel mensual mediante el algoritmo *Random Forest*⁴⁵. Finalmente, se procedió a estimar la concentración anual para la situación actual por comuna. El detalle de las concentraciones a nivel comunal se presentó en la sección anterior.

⁴¹ Información disponible en el Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero de Chile (snichile.mma.gob.cl).

⁴² <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>.

⁴³ <https://sites.wustl.edu/acag/datasets/surface-pm2-5/>.

⁴⁴ Van Donkelaar, A., Hammer, M.S., Bindle, L., Brauer, M., Brook, J.R., Garay, M.J., Hsu, N.C., Kalashnikova, O.V., Kahn, R.A., Lee, C. and Levy, R.C., 2021. Monthly global estimates fine particulate matter. *Environmental Science & Technology*, 55(22), pp.15287-15300.

⁴⁵ Breiman, Leo. "Random Forests." *Machine Learning* 45 (2001): 5-32.

13.1.3 Proyección de costos y concentraciones ambientales de MP_{2,5}

Como criterio conservador se descartó la reducción futura de costos de cada tecnología. Si las referencias disponibles correspondían a costos medios estimados en años previos se realizaron los ajustes necesarios para considerar inflación. A su vez, se consideraron interacciones con otras normativas como obligaciones establecidas en otras normas de emisión o planes de prevención y/o descontaminación, entre otras, en las que ya se hayan considerado inversiones, evitando la posibilidad de doble conteo, y a modo de situación base optimizada. Como referencia principal para la proyección de costos de cumplir la normativa se consideró la meta de carbono neutralidad establecida en la ley marco de cambio climático.

Las emisiones fueron proyectadas según contaminante criterio, en base a tendencias al 2050 en emisiones de CO₂ estimadas por el Ministerio de Energía, como aproximación de nivel de actividad. La Figura 64 ilustra la proyección del inventario de emisiones relacionadas con combustión (NO_x, MP_{2,5} y SO₂). A modo ilustrativo, la Figura 65 presenta la proyección de emisiones para material particulado fino en función de los diferentes sectores aportantes a nivel nacional. Se aprecia como la generación de electricidad reduce sus emisiones drásticamente, al incluirse el compromiso de retirar centrales a carbón. Lo mismo sucede en la industria, minería y el transporte de carga y pasajeros, al ser necesaria su electrificación acelerada y el uso a escala de hidrogeno verde para alcanzar las metas climáticas comprometidas a nivel internacional.

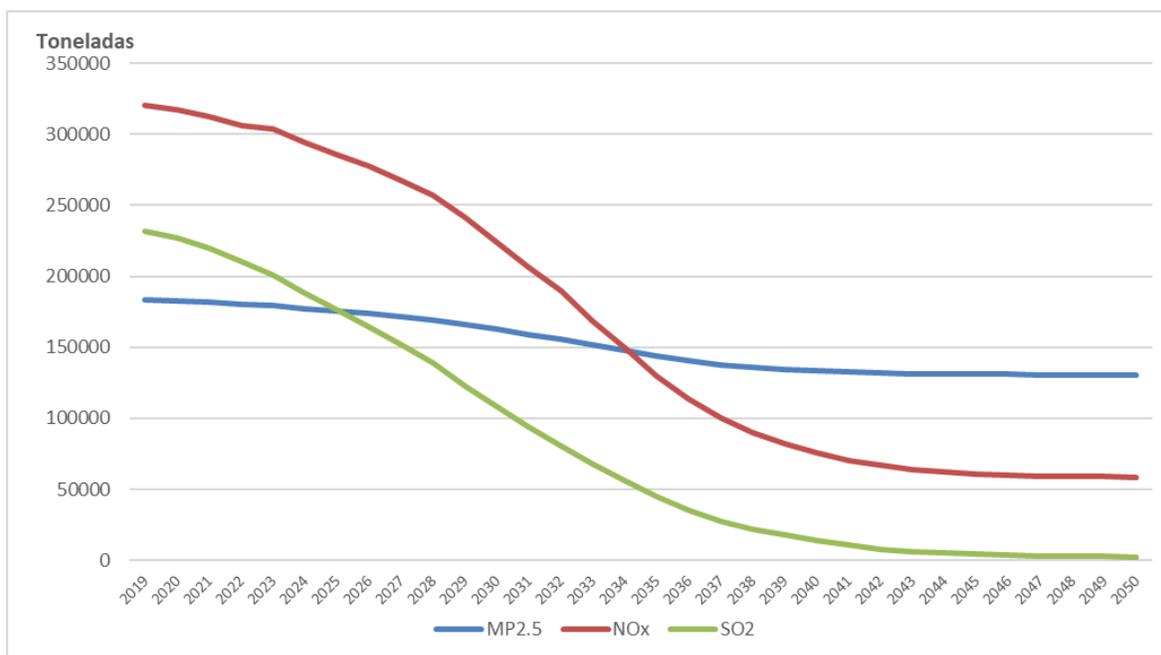


Figura 64. Proyección inventario de emisiones al 2050 para diferentes contaminantes a nivel nacional. Fuente: Elaboración propia.

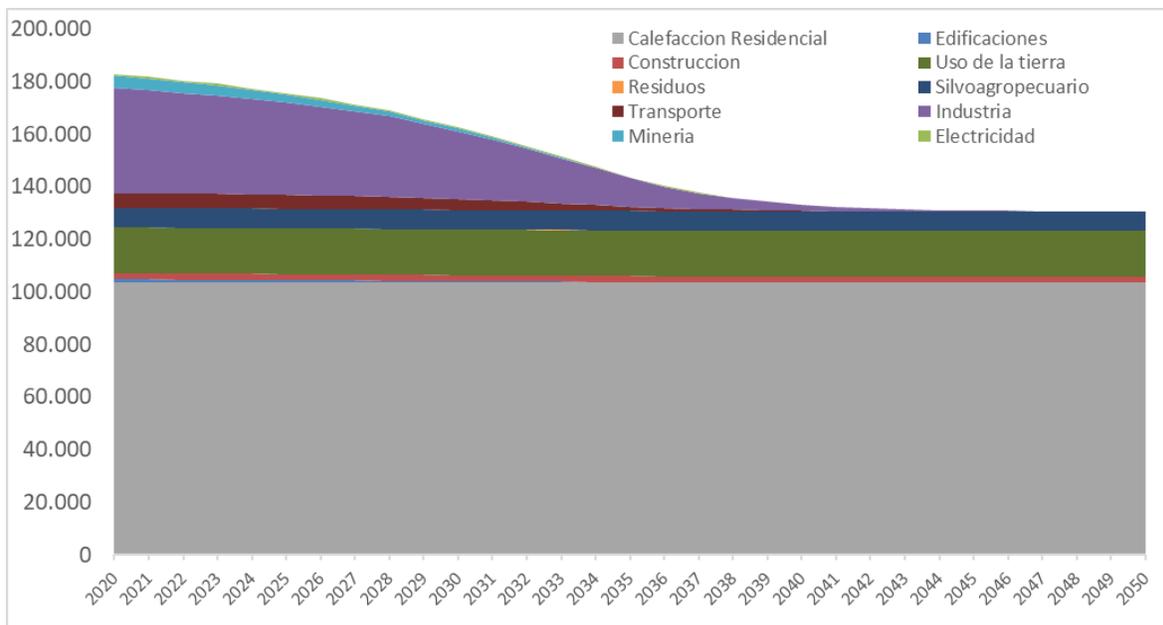


Figura 65. Proyección inventario de emisiones al 2050 para material particulado fino a nivel nacional en toneladas por año. Fuente: Elaboración propia.

Con las estimaciones de emisiones de contaminantes disponibles se procedió a proyectar la concentración de $MP_{2,5}$ a nivel comunal. La Figura 66 presenta la exposición de la población a nivel nacional, ponderando el número de habitantes por comuna en el tiempo. Se aprecia que la exposición se reduciría en el futuro como co-beneficio de la acción climática. Se destaca que, de cumplirse con los objetivos previstos en los distintos planes de descontaminación vigentes, debiera obtenerse un resultado similar incluso de manera más acelerada. Esto debe ser considerado para la evaluación de los costos de la revisión de normativa de calidad del aire como parte de la situación base. Mayores costos provendrán sólo de medidas adicionales destinadas a alcanzar niveles mayores de protección ambiental, al aumentarse el nivel de exigencia de la norma.

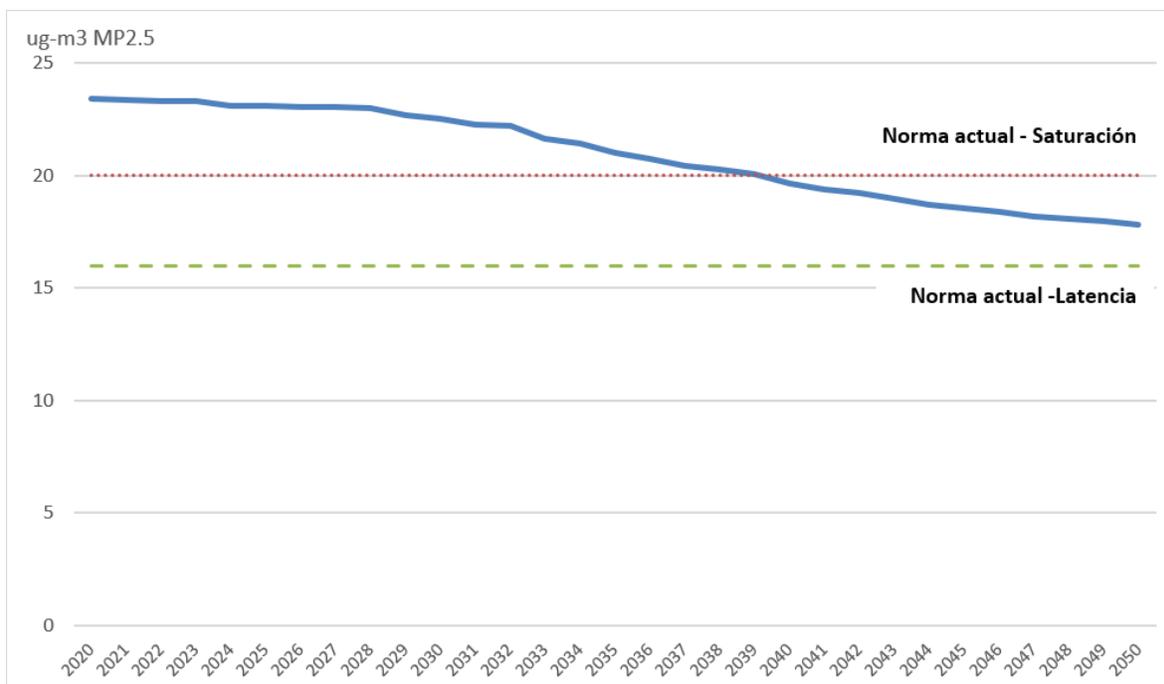


Figura 66. Proyección exposición de la población a MP_{2.5} a nivel nacional. Fuente: Elaboración propia.

13.1.4 Curva de costos

Para calcular las curvas de costo de abatimiento se calculó en primer lugar el costo total de implementación de medidas de control de emisiones para cada fuente emisora a nivel comunal, en función del costo medio reportado (USD por tonelada reducida), la eficiencia de remoción del contaminante principal que tiene como objetivo la medida, y las respectivas toneladas de contaminante reducidas. Esto último se estimó según las emisiones calculadas para cada fuente emisora y la eficiencia de la medida de control reportada. A continuación, se calcularon los $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de MP_{2.5} reducidos por la misma medida, integrando factores emisión-concentración, eficiencia de remoción de cada contaminante criterio y las emisiones correspondientes.

Con esta información se procedió a calcular costos medios de abatimiento de las medidas seleccionadas según su costo-efectividad en unidades de concentración de MP_{2.5} (USD por $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de MP_{2.5} reducido). Para cada comuna se procedió a ordenar las medidas de control disponibles, de menor a mayor monto, según costo efectividad. Como ya fue establecido, a modo conservador, los valores negativos (que suponen ahorros de costos) fueron truncados en cero. La Figura 67 muestra de manera ilustrativa este ejercicio para la comuna de Quilicura.

Millones de USD por ug/m3

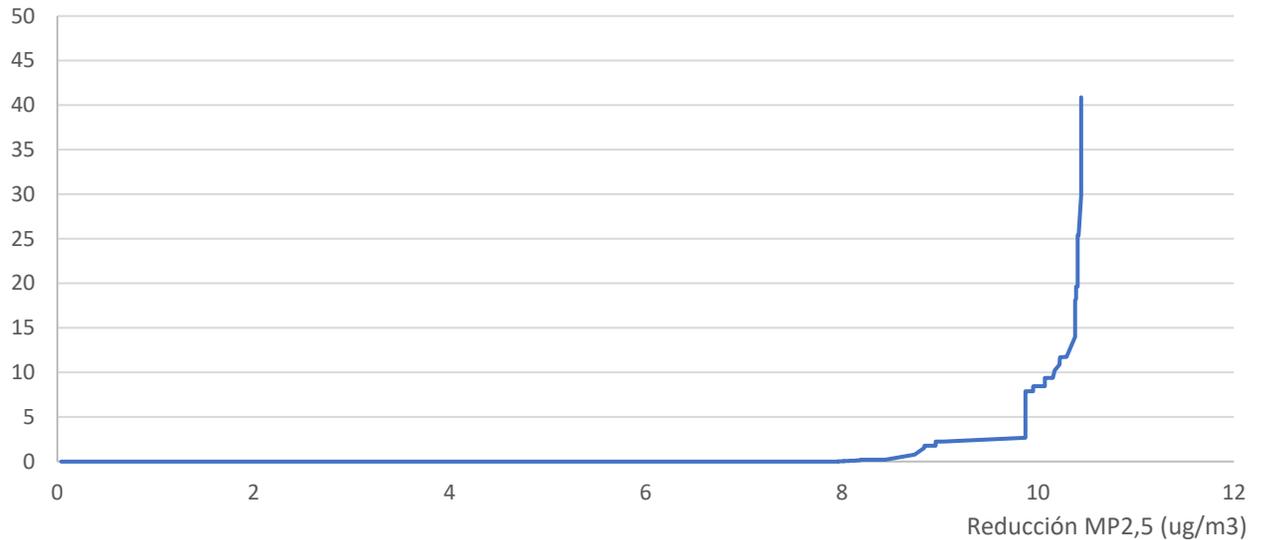


Figura 67. Medidas para la comuna de Quilicura ordenadas por costo medio por mg-m3 de MP_{2,5} reducidos.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, para cada comuna se construyeron curvas de costos medios de abatimiento. Finalmente, una vez ordenadas las medidas de control se ajustaron curvas cuadráticas como aproximación ($Costo\ Total = \beta \times (Reducción\ de\ concentración\ de\ MP_{2,5})^2$) para cada comuna, las que reflejan el costo de cumplimiento de diferentes niveles de calidad ambiental. La Figura 68 presenta curvas de costos totales de cumplimiento para una muestra de más de 100 comunas del país, en función de la magnitud de las reducciones de concentración de MP_{2,5}. Se puede apreciar que estas aproximaciones fueron forzadas para interceptar en cero.

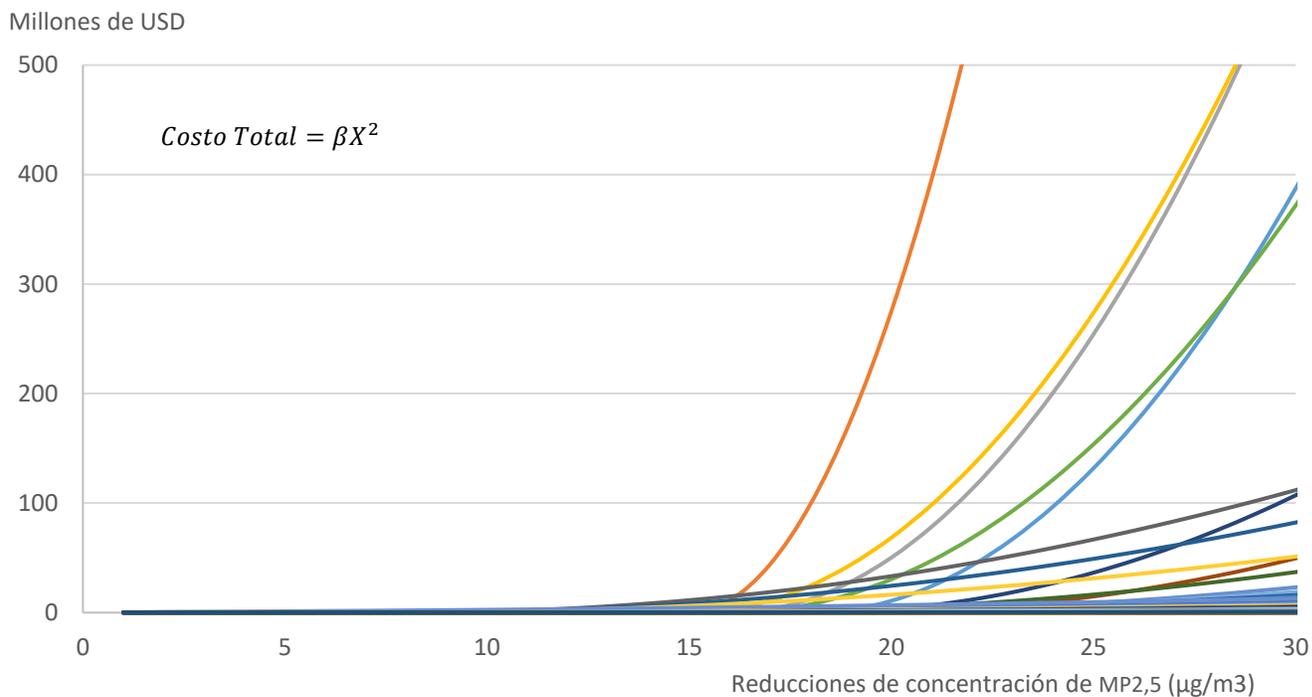


Figura 68. Curva de costos de cumplimiento por comuna. Fuente: Elaboración propia.

13.1.5 Análisis de costos

Utilizando las curvas de costos por µg·m³ de MP_{2,5} reducido para cada comuna calculadas en la etapa anterior, se realizó un análisis de escenarios considerando diferentes niveles de concentración de MP_{2,5} de referencia, y las concentraciones por comuna. A continuación, se presenta una tabla síntesis de costos con diferentes valores de cumplimiento de calidad anual de MP_{2,5} a nivel nacional.

Tabla 51. Costos de cumplimiento de diversos escenarios de concentración anual de MP_{2,5}. Fuente: Elaboración propia.

Escenario (µg/m ³)	Costo (Miles de millones de USD)	
	Anual	Valor presente
10	1.600	12.700
12	900	7.000
15	320	2.500
20	80	650

Para estos escenarios las medidas de control de mayor relevancia fueron, en orden descendente: recambio de calefactor leña por sistemas bombas de calor en aire acondicionado, electromovilidad para vehículos particulares livianos y medianos, hidrógeno verde para transporte de carga, electromovilidad en el transporte público, prohibición de quemas agrícolas, y electromovilidad para el servicio de taxis y taxis colectivos. Debe notarse que la selección de las medidas para la estimación de las curvas de costos consideró criterios de factibilidad técnica y política, en base a la experiencia del consultor. Esto facilitó la determinación del costo total de alcanzar distintos escenarios en distintos horizontes de evaluación.

13.2 Análisis de costos y beneficios

En función de la metodología planteada se presentan los resultados de costos y beneficios en la presente sección. Estos resultados describen los efectos de diferentes niveles de cumplimiento de concentración anual de $MP_{2,5}$ a nivel nacional, asumiendo el total cumplimiento de dichos valores. Los escenarios evaluados para la norma de calidad van desde 0 a $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$. A partir de las curvas de costos por comuna se estimaron valores a nivel nacional, los que van desde 1 a cerca de 9 mil millones de USD por año, para los escenarios de 30 y $0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$ respectivamente. En tanto, los beneficios van desde 80 a sobre 9 mil millones de USD por año para el mismo rango. En la Figura 69 se comparan los costos y los beneficios esperados como flujo anual para diferentes niveles de concentración de $MP_{2,5}$.

El diferencial entre costos y beneficios indica que se maximiza el beneficio social neto con un estándar en torno a los $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$. Adicionalmente, se estimó el valor presente de los costos y beneficios económicos anuales (Figura 69), considerando una tasa de descuento del 6 % (“Informe Precios Sociales 2023”, Ministerio de Desarrollo Social), y un periodo de implementación desde 2030 hasta 2050. La estimación se realizó según la proyección de emisiones presentada anteriormente. El valor presente de los costos va desde 5 a cerca de 50 mil millones de USD, para los escenarios de 30 y $0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$ respectivamente. El valor presente de los beneficios va desde 750 millones de USD a sobre 70 mil millones de USD, para el mismo rango de concentración de $MP_{2,5}$.

Cabe agregar que se incluyeron los costos y beneficios de la norma de calidad actual de $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$, y de valores mayores a esta (hasta $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$) dado que no todas las comunas cumplen con el estándar vigente. Se debe destacar que, si bien se evaluó un amplio rango de escenarios normativos, existe la imposibilidad técnica de alcanzar estándares de calidad más exigentes a $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$, ya que este valor representa en general la calidad del aire en ausencia de toda fuente de emisión antrópica.

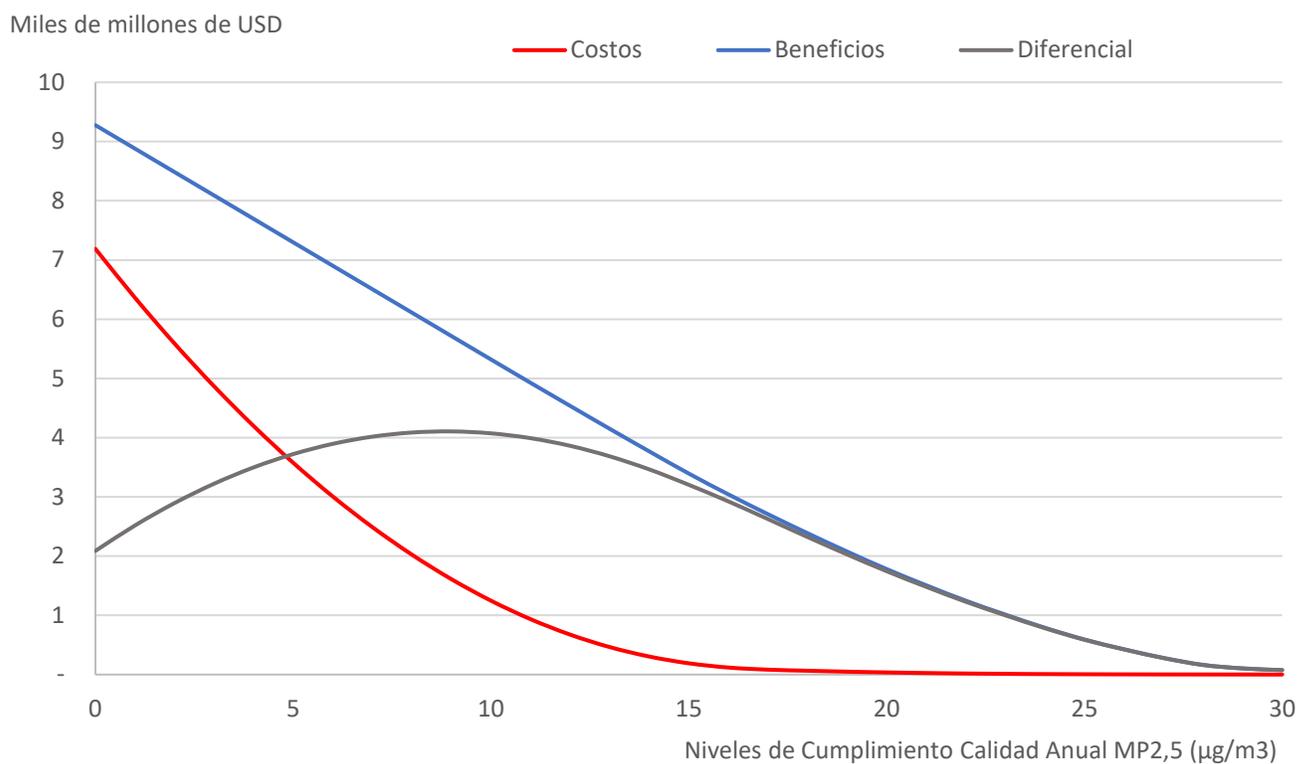


Figura 69. Flujos anuales a nivel nacional para diferentes niveles de cumplimiento de concentración de MP2,5. Fuente: Elaboración propia.

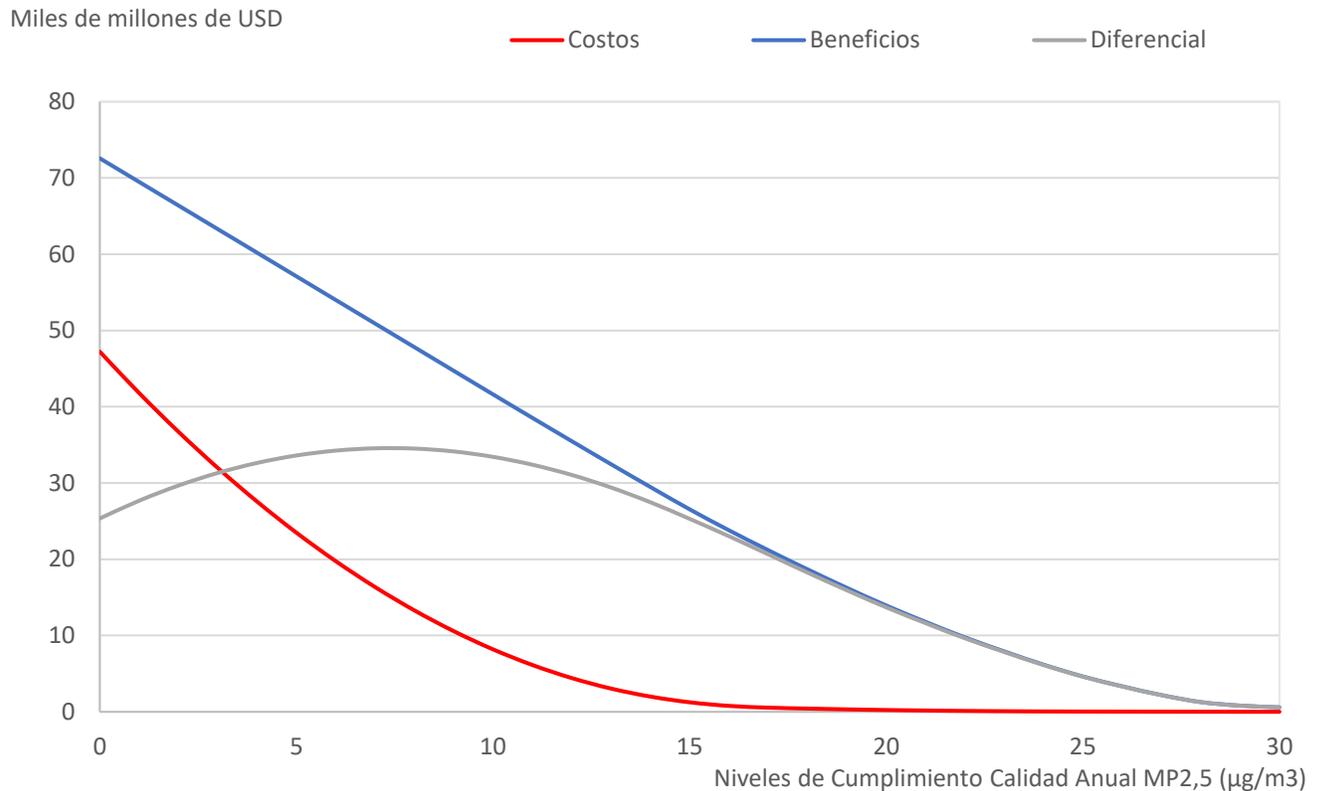


Figura 70. Valor presente a nivel nacional para diferentes niveles de cumplimiento de concentración de MP_{2,5}. Fuente: Elaboración propia.

13.2.1 Análisis de escenarios

A continuación, se presentan los costos y beneficios de escenarios normativos seleccionados en valor presente. Se incluye como escenario la norma vigente y estándares más exigentes, en base la normativa internacional y recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud. Los mejores resultados económicos en términos de beneficio neto se alcanzan entorno a 10 µg-m³ de MP_{2,5}, representando alrededor de 29 mil millones de USD en valor presente. En consecuencia, una norma de 10 µg-m³ de MP_{2,5} se revela como conveniente desde una óptica netamente económica. Cabe destacar que por corresponder al escenario base, costos y beneficios de alcanzar la norma actual, deben ser restados en todos los escenarios.

Tabla 52. Valor presente para diversos escenarios de concentración anual de MP2,5 (Miles de millones de USD).

Escenario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Costo	Beneficios	Beneficio Neto
10	12.700	41.600	29.000
12	7.000	35.500	28.400
15	2.500	26.500	24.000
20	650	14.000	13.300

Fuente: Elaboración propia.

De manera complementaria se evaluaron los diferentes escenarios normativos asumiendo que: (i) costos y beneficios permanecen constantes en el tiempo (Escenario A); (ii) costos y beneficios disminuyen considerando el avance de la ley marco de cambio climático (Escenario B); y (iii) beneficios aumentan con el aumento del ingreso per cápita de la población a una tasa de un 1% anual y costos disminuyen con el desarrollo tecnológico a una tasa de un 1% anual. Se observa en la Tabla 53 que es posible justificar normativas más estrictas ante escenarios menos conservadores para costos y beneficios.

Tabla 53. Valor presente Beneficio Neto para diversos escenarios de concentración anual de MP2,5 (Miles de millones de USD).

Escenario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Escenario A: Costo constante/ Beneficio constante	Escenario B: Costo disminuye/ Beneficio constante	Escenario C: Costos disminuye / Beneficios aumenta
10	28.900	27.200	34.400
12	28.400	24.200	29.800
15	24.000	17.900	21.600
20	13.300	7.600	9.000

Fuente: Elaboración propia.

13.2.2 Análisis de incertidumbre

Finalmente, se presentan costos y beneficios sociales en valor presente, considerando incertidumbre en su estimación mediante simulación de Montecarlo. Se asumió como principales fuentes de incertidumbre el valor de la vida estadística utilizado para valorizar eventos de mortalidad prematura, y variación en costos estimados de $\pm 35\%$, de acuerdo con lo recomendado en el análisis de ingeniería de prefactibilidad. Cabe destacar que criterios similares fueron utilizados en la evaluación costo-beneficio de la norma vigente. La siguiente figura muestra costos y beneficios económicos asociados a la norma vigente y a escenarios normativos propuestos. Se desprende de ella la justificación de valores más estrictos de norma.

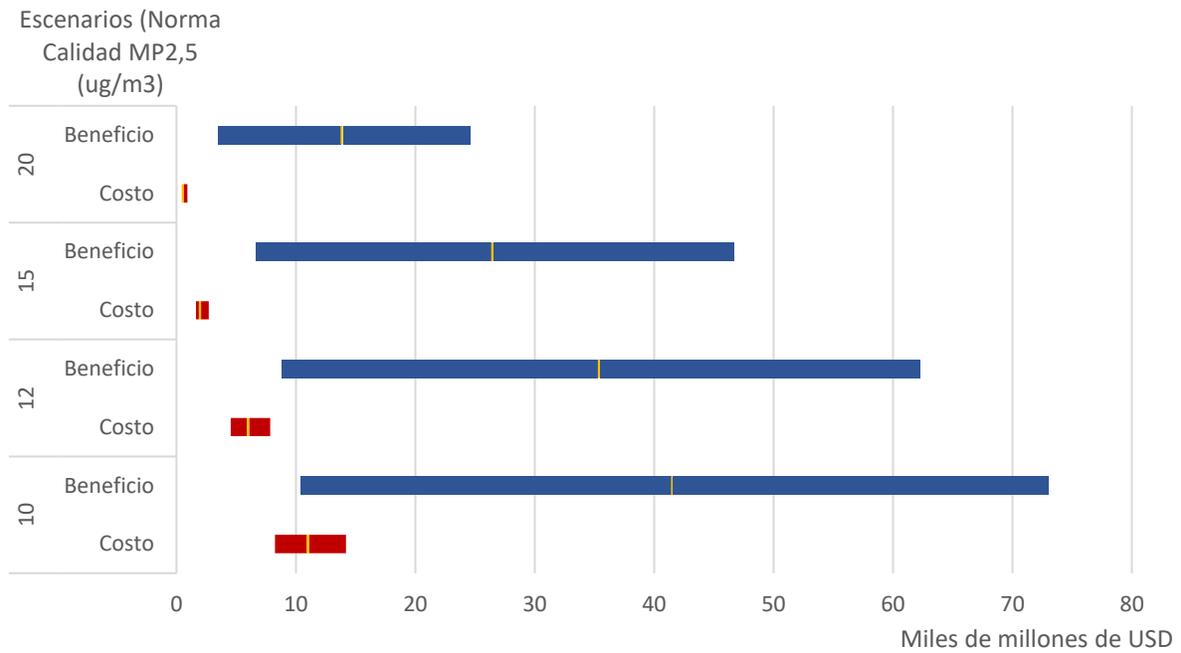


Figura 71. Valor presente a nivel nacional para diferentes escenarios de norma de MP2,5 incluyendo incertidumbre.

Nota: Percentil 50 indicado con línea amarilla. El rango corresponde a percentiles 10 y 90.

Fuente: Elaboración propia.

14 Bibliografía

- Análisis de tendencia del material particulado en la Región Metropolitana y regiones centro sur. MMA, 2020
- Environmental Modelling & Software. Volume 27-28, 52-61.
- Gramsch, E., Oyola, P., Reyes, F., Rojas, F., Henríquez, A., Kang, C.-M., 2021. Trends in particle matter and its elemental composition in Santiago de Chile, 2011 – 2018. *Journal of the Air & Waste Management Association* 0, 1–16. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1877211>
- Jhun, I., Oyola, P., Moreno, F., Castillo, M.A., Koutrakis, P., 2013. PM2.5 mass and species trends in Santiago, Chile, 1998 to 2010: the impact of fuel-related interventions and fuel sales. *J Air Waste Manag Assoc* 63, 161–169.
- Koutrakis, P., Sax, S.N., Sarnat, J.A., Coull, B., Demokritou, P., Demokritou, P., Oyola, P., Garcia, J., Gramsch, E., 2005. Analysis of PM10, PM2.5, and PM2.5–10 Concentrations in Santiago, Chile, from 1989 to 2001. *Journal of the Air & Waste Management Association* 55, 342–351. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464627>
- Sax, S.N., Koutrakis, P., Rudolph, P.A.R., Cereceda-Balic, F., Gramsch, E., Oyola, P., 2007. Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003. *Journal of the Air & Waste Management Association* 57, 845–855.
- Nazarenko Y, Pal D, Ariya PA. PMID: 33551506; PMCID: PMC7856362.
- Grenzwerte (swisstph.ch)
- US-EPA's Control Strategy Tool: <https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/cost-analysis-modelstools-air-pollution>
- Alhanti, B. A., Chang, H. H., Winquist, A., Mulholland, J. A., Darrow, L. A., & Sarnat, S. E. (2016). Ambient air pollution and emergency department visits for asthma: a multi-city assessment of effect modification by age. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 26(2), 180–188. <https://doi.org/10.1038/JES.2015.57>
- Allen, R. W., Criqui, M. H., Diez Roux, A. V., Allison, M., Shea, S., Detrano, R., Sheppard, L., Wong, N. D., Stukovsky, K. H., & Kaufman, J. D. (2009). Fine particulate matter air pollution, proximity to traffic, and aortic atherosclerosis. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 20(2), 254–264. <https://doi.org/10.1097/EDE.0B013E31819644CC>
- Atkinson, R. W., Samoli, E., Analitis, A., Fuller, G. W., Green, D. C., Anderson, H. R., Purdie, E., Dunster, C., Aitlhadj, L., Kelly, F. J., & Mudway, I. S. (2016). Short-term associations between particle oxidative potential and daily mortality and hospital admissions in London. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 219(6), 566–572. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEH.2016.06.004>
- Auchincloss, A. H., Diez Roux, A. V., Dvonch, J. T., Brown, P. L., Barr, R. G., Daviglius, M. L., Goff, D. C., Kaufman, J. D., & O'Neill, M. S. (2008). Associations between recent exposure to ambient fine particulate matter and blood pressure in the Multi-ethnic Study of Atherosclerosis (MESA). *Environmental Health Perspectives*, 116(4), 486–491. <https://doi.org/10.1289/EHP.10899>
- *Archives of Internal Medicine*, 168(9), 920–927. <https://doi.org/10.1001/ARCHINTE.168.9.920>

- Bauer, M., Moebus, S., Mhlenkamp, S., Dragano, N., Nonnemacher, M., Fuchsluger, M., Kessler, C., Jakobs, H., Memmesheimer, M., Erbel, R., Jckel, K. H., & Hoffmann, B. (2010). Urban particulate matter air pollution is associated with subclinical atherosclerosis: results from the HNR (Heinz Nixdorf Recall) study. *Journal of the American College of Cardiology*, 56(22), 1803–1808. <https://doi.org/10.1016/J.JACC.2010.04.065>
- Becker, S., Dailey, L. a., Soukup, J. M., Grambow, S. C., Devlin, R. B., & Huang, Y.-C. T. (2005). Seasonal Variations in Air Pollution Particle-Induced Inflammatory Mediator Release and Oxidative Stress. *Environmental Health Perspectives*, 113(8), 1032–1038. <https://doi.org/10.1289/ehp.7996>
- Beelen, R., Raaschou-Nielsen, O., Stafoggia, M., Andersen, Z. J., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Wolf, K., Samoli, E., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M., Vineis, P., Xun, W. W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Oudin, A., Forsberg, B., Modig, L., Havulinna, A. S., Lanki, T., ... Hoek, G. (2014). Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet (London, England)*, 383(9919), 785–795. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)62158-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62158-3)
- Beelen, R., Stafoggia, M., Raaschou-Nielsen, O., Andersen, Z. J., Xun, W. W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Brunekreef, B., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Wolf, K., Samoli, E., Houthuijs, D., Nieuwenhuijsen, M., Oudin, A., Forsberg, B., Olsson, D., Salomaa, V., Lanki, T., ... Hoek, G. (2014). Long-term exposure to air pollution and cardiovascular mortality: an analysis of 22 European cohorts. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 25(3), 368–378. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000076>
- Bell, M. L., & Ebisu, K. (2012). Environmental inequality in exposures to airborne particulate matter components in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1699–1704. <https://doi.org/10.1289/EHP.1205201>
- Bell, M. L., Son, J. Y., Peng, R. D., Wang, Y., & Dominici, F. (2015). Ambient PM2.5 and Risk of Hospital Admissions: Do Risks Differ for Men and Women? *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 26(4), 575–579. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000310>
- Belleudi, V., Faustini, A., Stafoggia, M., Cattani, G., Marconi, A., Perucci, C. A., & Forastiere, F. (2010). Impact of fine and ultrafine particles on emergency hospital admissions for cardiac and respiratory diseases. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 21(3), 414–423. <https://doi.org/10.1097/EDE.0B013E3181D5C021>
- Bind, M. A., Baccarelli, A., Zanobetti, A., Tarantini, L., Suh, H., Vokonas, P., & Schwartz, J. (2012). Air pollution and markers of coagulation, inflammation, and endothelial function: associations and epigene-environment interactions in an elderly cohort. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 23(2), 332–340. <https://doi.org/10.1097/EDE.0B013E31824523F0>
- Bravo, M. A., Anthopolos, R., Bell, M. L., & Miranda, M. L. (2016). Racial isolation and exposure to airborne particulate matter and ozone in understudied US populations: Environmental justice applications of downscaled numerical model output. *Environment International*, 92–93, 247–255. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2016.04.008>
- *Environmental Health Perspectives*, 125(4), 594–601. <https://doi.org/10.1289/EHP257>
- Breton, C. V., Salam, M. T., Vora, H., Gauderman, W. J., & Gilliland, F. D. (2011). Genetic variation in the glutathione synthesis pathway, air pollution, and children’s lung function

- growth. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 183(2), 243–248.
<https://doi.org/10.1164/RCCM.201006-0849OC>
- Brook, R. D., Cakmak, S., Turner, M. C., Brook, J. R., Crouse, D. L., Peters, P. A., Van Donkelaar, A., Villeneuve, P. J., Brion, O., Jerrett, M., Martin, R. V., Rajagopalan, S., Goldberg, M. S., Pope, C. A., & Burnett, R. T. (2013). Long-term fine particulate matter exposure and mortality from diabetes in Canada. *Diabetes Care*, 36(10), 3313–3320.
<https://doi.org/10.2337/DC12-2189>
 - *American Journal of Hypertension*, 28(9), 1121–1126.
<https://doi.org/10.1093/AJH/HPU302>
 - Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Whitsel, L., & Kaufman, J. D. (2010a). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. In *Circulation* (Vol. 121, Issue 21, pp. 2331–2378). Lippincott Williams & Wilkins.
<https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8e1>
 - Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. v., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. v., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Whitsel, L., & Kaufman, J. D. (2010b). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331–2378. <https://doi.org/10.1161/CIR.0B013E3181DBECE1>
 - Bunch, T. J., Horne, B. D., Asirvatham, S. J., Day, J. D., Crandall, B. G., Weiss, J. P., Osborn, J. S., Anderson, J. L., Muhlestein, J. B., Lappe, D. L., & Pope, C. A. (2011). Atrial fibrillation hospitalization is not increased with short-term elevations in exposure to fine particulate air pollution. *Pacing and Clinical Electrophysiology : PACE*, 34(11), 1475–1479.
<https://doi.org/10.1111/J.1540-8159.2011.03200.X>
 - Cakmak, S., Hebborn, C., Pinault, L., Lavigne, E., Vanos, J., Crouse, D. L., & Tjepkema, M. (2018). Associations between long-term PM_{2.5} and ozone exposure and mortality in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CANHEC), by spatial synoptic classification zone. *Environment International*, 111, 200–211.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2017.11.030>
 - Campen, M. J., McDonald, J. D., Reed, M. D., & Seagrave, J. C. (2006). Fresh gasoline emissions, not paved road dust, alter cardiac repolarization in ApoE^{-/-} mice. *Cardiovascular Toxicology*, 6(3–4), 199–209. <https://doi.org/10.1385/CT:6:3:199>
 - Cassee, F. R., Boere, A. J. F., Fokkens, P. H. B., Leseman, D. L. A. C., Sioutas, C., Kooter, I. M., & Dormans, J. A. M. A. (2005). Inhalation of concentrated particulate matter produces pulmonary inflammation and systemic biological effects in compromised rats. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, 68(10), 773–796.
<https://doi.org/10.1080/15287390590930171>
 - Chahine, T., Baccarelli, A., Litonjua, A., Wright, R. O., Suh, H., Gold, D. R., Sparrow, D., Vokonas, P., & Schwartz, J. (2007). Particulate air pollution, oxidative stress genes, and heart rate variability in an elderly cohort. *Environmental Health Perspectives*, 115(11), 1617–1622. <https://doi.org/10.1289/EHP.10318>

- Chan, S. H., Van Hee, V. C., Bergen, S., Szpiro, A. A., De Roo, L. A., London, S. J., Marshall, J. D., Kaufman, J. D., & Sandler, D. P. (2015). Environmental Health Perspectives, 123(10), 951–958. <https://doi.org/10.1289/EHP.1408125>
- Chen, B. Y., Chen, C. H., Chuang, Y. C., Kim, H., Honda, Y., Chiang, H. C., & Guo, Y. L. (2016). Schoolchildren's antioxidation genotypes are susceptible factors for reduced lung function and airway inflammation caused by air pollution. *Environmental Research*, 149, 145–150. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2016.05.007>
- Chen, H., Burnett, R. T., Kwong, J. C., Villeneuve, P. J., Goldberg, M. S., Brook, R. D., van Donkelaar, A., Jerrett, M., Martin, R. V., Brook, J. R., & Copes, R. (2013). Risk of incident diabetes in relation to long-term exposure to fine particulate matter in Ontario, Canada. *Environmental Health Perspectives*, 121(7), 804–810. <https://doi.org/10.1289/EHP.1205958>
- Chen, H., Burnett, R. T., Kwong, J. C., Villeneuve, P. J., Goldberg, M. S., Brook, R. D., Van Donkelaar, A., Jerrett, M., Martin, R. V., Kopp, A., Brook, J. R., & Copes, R. (2014). Spatial association between ambient fine particulate matter and incident hypertension. *Circulation*, 129(5), 562–569. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.113.003532>
- Chen, J., & Hoek, G. (2020a). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 143. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.105974>
- Chen, J., & Hoek, G. (2020b). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 143, 105974. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.105974>
- Crouse, D. L., Peters, P. A., Hystad, P., Brook, J. R., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Villeneuve, P. J., Jerrett, M., Goldberg, M. S., Arden Pope, C., Brauer, M., Brook, R. D., Robichaud, A., Menard, R., & Burnett, R. T. (2015). Ambient PM_{2.5}, O₃, and NO₂ Exposures and Associations with Mortality over 16 Years of Follow-Up in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CanCHEC). *Environmental Health Perspectives*, 123(11), 1180–1186. <https://doi.org/10.1289/EHP.1409276>
- Dai, L., Zanobetti, A., Koutrakis, P., & Schwartz, J. D. (2014). Associations of fine particulate matter species with mortality in the United States: a multicity time-series analysis. *Environmental Health Perspectives*, 122(8), 837–842. <https://doi.org/10.1289/EHP.1307568>
- Dales, R. E., Cakmak, S., & Vidal, C. B. (2010). Air pollution and hospitalization for venous thromboembolic disease in Chile. *Journal of Thrombosis and Haemostasis : JTH*, 8(4), 669–674. <https://doi.org/10.1111/J.1538-7836.2010.03760.X>
- Delfino, R. J., Gillen, D. L., Tjoa, T., Staimer, N., Polidori, A., Arhami, M., Sioutas, C., & Longhurst, J. (2011). Electrocardiographic ST-segment depression and exposure to traffic-related aerosols in elderly subjects with coronary artery disease. *Environmental Health Perspectives*, 119(2), 196–202. <https://doi.org/10.1289/EHP.1002372>
- Delfino, R. J., Staimer, N., Tjoa, T., Gillen, D. L., Polidori, A., Arhami, M., Kleinman, M. T., Vaziri, N. D., Longhurst, J., & Sioutas, C. (2009). Air pollution exposures and circulating biomarkers of effect in a susceptible population: clues to potential causal component

- mixtures and mechanisms. *Environmental Health Perspectives*, 117(8), 1232–1238.
<https://doi.org/10.1289/EHP.0800194>
- Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. (2017a). Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *New England Journal of Medicine*, 376(26), 2513–2522.
https://doi.org/10.1056/NEJMOA1702747/SUPPL_FILE/NEJMOA1702747_DISCLOSURES.PDF
 - Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. (2017b). Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *The New England Journal of Medicine*, 376(26), 2513–2522. <https://doi.org/10.1056/NEJMOA1702747>
 - Diez Roux, A. V., Auchincloss, A. H., Franklin, T. G., Raghunathan, T., Barr, R. G., Kaufman, J., Astor, B., & Keeler, J. (2008). Long-term exposure to ambient particulate matter and prevalence of subclinical atherosclerosis in the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *American Journal of Epidemiology*, 167(6), 667–675.
<https://doi.org/10.1093/AJE/KWM359>
 - Dimakopoulou, K., Samoli, E., Beelen, R., Stafoggia, M., Andersen, Z. J., Hoffmann, B., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M., Vineis, P., Xun, W., Hoek, G., Raaschou-Nielsen, O., Oudin, A., Forsberg, B., Modig, L., Jousilahti, P., Lanki, T., Turunen, A., Oftedal, B., ... Katsouyanni, K. (2014). Air pollution and nonmalignant respiratory mortality in 16 cohorts within the ESCAPE project. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 189(6), 684–696. <https://doi.org/10.1164/RCCM.201310-1777OC>
 - Ding, L., Zhu, D., Peng, D., & Zhao, Y. (2017). Air pollution and asthma attacks in children: A case-crossover analysis in the city of Chongqing, China. *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 220(Pt A), 348–353. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.09.070>
 - Farraj, A. K., Haykal-Coates, N., Ledbetter, A. D., Evansky, P. A., & Gavett, S. H. (2006). Inhibition of pan neurotrophin receptor p75 attenuates diesel particulate-induced enhancement of allergic airway responses in C57/B16J mice. *Inhalation Toxicology*, 18(7), 483–491. <https://doi.org/10.1080/08958370600602439>
 - Fuertes, E., Brauer, M., MacIntyre, E., Bauer, M., Bellander, T., Von Berg, A., Berdel, D., Brunekreef, B., Chan-Yeung, M., Gehring, U., Herbarth, O., Hoffmann, B., Kerkhof, M., Klümper, C., Koletzko, S., Kozyrskyj, A., Kull, I., Heinrich, J., Melén, E., ... Carlsten, C. (2013). Childhood allergic rhinitis, traffic-related air pollution, and variability in the GSTP1, TNF, TLR2, and TLR4 genes: results from the TAG Study. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 132(2). <https://doi.org/10.1016/J.JACI.2013.03.007>
 - Fuks, K., Moebus, S., Hertel, S., Viehmann, A., Nonnemacher, M., Dragano, N., Möhlenkamp, S., Jakobs, H., Kessler, C., Erbel, R., & Hoffmann, B. (2011). Long-term urban particulate air pollution, traffic noise, and arterial blood pressure. *Environmental Health Perspectives*, 119(12), 1706–1711. <https://doi.org/10.1289/EHP.1103564>
 - Garcia, C. A., Yap, P. S., Park, H. Y., & Weller, B. L. (2016). Association of long-term PM2.5 exposure with mortality using different air pollution exposure models: impacts in rural and urban California. *International Journal of Environmental Health Research*, 26(2), 145–157. <https://doi.org/10.1080/09603123.2015.1061113>
 - Particle and Fibre Toxicology, 11(1). <https://doi.org/10.1186/1743-8977-11-1>

- Gauderman, W. J., Urman, R., Avol, E., Berhane, K., McConnell, R., Rappaport, E., Chang, R., Lurmann, F., & Gilliland, F. (2015). Association of improved air quality with lung development in children. *The New England Journal of Medicine*, 372(10), 905–913. <https://doi.org/10.1056/NEJMOA1414123>
- Gharibvand, L., Shavlik, D., Ghamsary, M., Beeson, W. L., Soret, S., Knutsen, R., & Knutsen, S. F. (2017). The Association between Ambient Fine Particulate Air Pollution and Lung Cancer Incidence: Results from the AHSMOG-2 Study. *Environmental Health Perspectives*, 125(3), 378–384. <https://doi.org/10.1289/EHP124>
- Glad, J. A., Brink, L. L., Talbott, E. O., Lee, P. C., Xu, X., Saul, M., & Rager, J. (2012). The relationship of ambient ozone and PM(2.5) levels and asthma emergency department visits: possible influence of gender and ethnicity. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 67(2), 103–108. <https://doi.org/10.1080/19338244.2011.598888>
- Gleason, J. A., Bielory, L., & Fagliano, J. A. (2014). Associations between ozone, PM2.5, and four pollen types on emergency department pediatric asthma events during the warm season in New Jersey: a case-crossover study. *Environmental Research*, 132, 421–429. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2014.03.035>
- Goldberg, M. S., Burnett, R. T., Stieb, D. M., Brophy, J. M., Daskalopoulou, S. S., Valois, M. F., & Brook, J. R. (2013). Associations between ambient air pollution and daily mortality among elderly persons in Montreal, Quebec. *The Science of the Total Environment*, 463–464, 931–942. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.06.095>
- Hajat, A., Allison, M., Diez-Roux, A. V., Jenny, N. S., Jorgensen, N. W., Szpiro, A. A., Vedal, S., & Kaufman, J. D. (2015). Long-term exposure to air pollution and markers of inflammation, coagulation, and endothelial activation: a repeat-measures analysis in the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA). *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 26(3), 310–320. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000267>
- Haley, V. B., Talbot, T. O., & Felton, H. D. (2009). Surveillance of the short-term impact of fine particle air pollution on cardiovascular disease hospitalizations in New York State. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/1476-069X-8-42>
- Hampel, R., Schneider, A., Brüske, I., Zareba, W., Cyrus, J., Rückerl, R., Breitner, S., Korb, H., Sunyer, J., Wichmann, H. E., & Peters, A. (2010). Altered cardiac repolarization in association with air pollution and air temperature among myocardial infarction survivors. *Environmental Health Perspectives*, 118(12), 1755–1761. <https://doi.org/10.1289/EHP.1001995>
- Hansen, A. B., Ravnskjaer, L., Loft, S., Andersen, K. K., Brauner, E. V., Bastrup, R., Yao, C., Ketznel, M., Becker, T., Brandt, J., Hertel, O., & Andersen, Z. J. (2016). Long-term exposure to fine particulate matter and incidence of diabetes in the Danish Nurse Cohort. *Environment International*, 91, 243–250. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2016.02.036>
- *European Journal of Epidemiology*, 25(8), 581–592. <https://doi.org/10.1007/S10654-010-9477-X>
- Hicken, M. T., Adar, S. D., Hajat, A., Kershaw, K. N., Do, D. P., Barr, R. G., Kaufman, J. D., & Diez Roux, A. V. (2016). Air Pollution, Cardiovascular Outcomes, and Social Disadvantage:

- The Multi-ethnic Study of Atherosclerosis. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 27(1), 42–50.
<https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000367>
- Hoffmann, B., Luttmann-Gibson, H., Allison, C., Zanobetti, A., de Souza, C., Foley, C., Suh, H. H., Coull, B. A., Schwartz, J., Mittleman, M., Stone, P., Horton, E., & Gold, D. R. (2012). Opposing effects of particle pollution, ozone, and ambient temperature on arterial blood pressure. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 241–246.
<https://doi.org/10.1289/EHP.1103647>
 - Hoffmann, B., Moebus, S., Dragano, N., Stang, A., Möhlenkamp, S., Schmermund, A., Memmesheimer, M., Bröcker-Preuss, M., Mann, K., Erbel, R., & Jöckel, K. H. (2009). Chronic residential exposure to particulate matter air pollution and systemic inflammatory markers. *Environmental Health Perspectives*, 117(8), 1302–1308.
<https://doi.org/10.1289/EHP.0800362>
 - Hoffmann, B., Moebus, S., Kröger, K., Stang, A., Möhlenkamp, S., Dragano, N., Schmermund, A., Memmesheimer, M., Erbel, R., & Jöckel, K. H. (2009). Residential exposure to urban air pollution, ankle-brachial index, and peripheral arterial disease. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 20(2), 280–288.
<https://doi.org/10.1097/EDE.0B013E3181961AC2>
 - Hystad, P., Demers, P. A., Johnson, K. C., Carpiano, R. M., & Brauer, M. (2013). Long-term residential exposure to air pollution and lung cancer risk. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 24(5), 762–772. <https://doi.org/10.1097/EDE.0B013E3182949AE7>
 - Jacobs, L., Buczynska, A., Walgraeve, C., Delcloo, A., Potgieter-Vermaak, S., Van Grieken, R., Demeestere, K., Dewulf, J., Van Langenhove, H., De Backer, H., Nemery, B., & Nawrot, T. S. (2012). Acute changes in pulse pressure in relation to constituents of particulate air pollution in elderly persons. *Environmental Research*, 117, 60–67.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2012.05.003>
 - Johnson, D., & Parker, J. D. (2009). Air pollution exposure and self-reported cardiovascular disease. *Environmental Research*, 109(5), 582–589.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2009.01.001>
 - Kampfrath, T., Maiseyeu, A., Ying, Z., Shah, Z., Deiluiis, J. A., Xu, X., Kherada, N., Brook, R. D., Reddy, K. M., Padture, N. P., Parthasarathy, S., Chen, L. C., Moffatt-Bruce, S., Sun, Q., Morawietz, H., & Rajagopalan, S. (2011). Chronic fine particulate matter exposure induces systemic vascular dysfunction via NADPH oxidase and TLR4 pathways. *Circulation Research*, 108(6), 716–726. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.110.237560>
 - Karner, A. A., Eisinger, D. S., & Niemeier, D. A. (2010). Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data. *Environmental Science & Technology*, 44(14), 5334–5344. <https://doi.org/10.1021/ES100008X>
 - Kioumourtzoglou, M. A., Schwartz, J., James, P., Dominici, F., & Zanobetti, A. (2016). PM2.5 and Mortality in 207 US Cities: Modification by Temperature and City Characteristics. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 27(2), 221–227.
<https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000422>
 - Kleinman, M. T., Hamade, A., Meacher, D., Oldham, M., Sioutas, C., Chakrabarti, B., Stram, D., Froines, J. R., & Cho, A. K. (2005). Inhalation of concentrated ambient particulate matter near a heavily trafficked road stimulates antigen-induced airway responses in mice.

Journal of the Air & Waste Management Association (1995), 55(9), 1277–1288.

<https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464727>

- Kloog, I., Nordio, F., Zanobetti, A., Coull, B. A., Koutrakis, P., & Schwartz, J. D. (2014). Short term effects of particle exposure on hospital admissions in the Mid-Atlantic states: a population estimate. *PloS One*, 9(2). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0088578>
- Kloog, I., Ridgway, B., Koutrakis, P., Coull, B. A., & Schwartz, J. D. (2013). Long- and short-term exposure to PM_{2.5} and mortality: using novel exposure models. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 24(4), 555–561. <https://doi.org/10.1097/EDE.0B013E318294BEAA>
- Klümper, C., Krämer, U., Lehmann, I., von Berg, A., Berdel, D., Herberth, G., Beckmann, C., Link, E., Heinrich, J., Hoffmann, B., & Schins, R. P. F. (2015). Air pollution and cytokine responsiveness in asthmatic and non-asthmatic children. *Environmental Research*, 138, 381–390. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2015.02.034>
- Kodavanti, U. P., Schladweiler, M. C., Ledbetter, A. D., McGee, J. K., Walsh, L., Gilmour, P. S., Highfill, J. W., Davies, D., Pinkerton, K. E., Richards, J. H., Crissman, K., Andrews, D., & Costa, D. L. (2005). Consistent pulmonary and systemic responses from inhalation of fine concentrated ambient particles: roles of rat strains used and physicochemical properties. *Environmental Health Perspectives*, 113(11), 1561–1568. <https://doi.org/10.1289/EHP.7868>
- Krishnan, R. M., Adar, S. D., Szpiro, A. A., Jorgensen, N. W., Van Hee, V. C., Barr, R. G., O’Neill, M. S., Herrington, D. M., Polak, J. F., & Kaufman, J. D. (2012). Vascular responses to long- and short-term exposure to fine particulate matter: MESA Air (Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis and Air Pollution). *Journal of the American College of Cardiology*, 60(21), 2158–2166. <https://doi.org/10.1016/J.JACC.2012.08.973>
- Künzli, N., Jerrett, M., Garcia-Esteban, R., Basagaña, X., Beckermann, B., Gilliland, F., Medina, M., Peters, J., Hodis, H. N., & Mack, W. J. (2010). Ambient air pollution and the progression of atherosclerosis in adults. *PloS One*, 5(2). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0009096>
- Lanzinger, S., Schneider, A., Breitner, S., Stafoggia, M., Erzen, I., Dostal, M., Pastorkova, A., Bastian, S., Cyrus, J., Zscheppang, A., Kolodnitska, T., & Peters, A. (2016). Ultrafine and Fine Particles and Hospital Admissions in Central Europe. Results from the UFIREG Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 194(10), 1233–1241. <https://doi.org/10.1164/RCCM.201510-2042OC>
- Lee, M., Koutrakis, P., Coull, B., Kloog, I., & Schwartz, J. (2016). Acute effect of fine particulate matter on mortality in three Southeastern states from 2007-2011. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 26(2), 173–179. <https://doi.org/10.1038/JES.2015.47>
- Lei, Y. C., Chen, M. C., Chan, C. C., Wang, P. Y., Lee, C. Te, & Cheng, T. J. (2004). Effects of concentrated ambient particles on airway responsiveness and pulmonary inflammation in pulmonary hypertensive rats. *Inhalation Toxicology*, 16(11–12), 785–792. <https://doi.org/10.1080/08958370490490572>
- Lepeule, J., Bind, M. A. C., Baccarelli, A. A., Koutrakis, P., Tarantini, L., Litonjua, A., Sparrow, D., Vokonas, P., & Schwartz, J. D. (2014). Epigenetic influences on associations between air

- pollutants and lung function in elderly men: the normative aging study. *Environmental Health Perspectives*, 122(6), 566–572. <https://doi.org/10.1289/EHP.1206458>
- Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D., & Schwartz, J. (2012). Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard Six Cities study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, 120(7), 965–970. <https://doi.org/10.1289/EHP.1104660>
 - Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Matus, P., Valdes Ortega, N., Osorio Garcia, S., Pascal, M., Stafoggia, M., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Hurtado-Díaz, M., Cruz, J., ... Kan, H. (2019a). Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *New England Journal of Medicine*, 381(8), 705–715. https://doi.org/10.1056/NEJMOA1817364/SUPPL_FILE/NEJMOA1817364_DISCLOSURES.PDF
 - Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Matus, P., Valdes Ortega, N., Osorio Garcia, S., Pascal, M., Stafoggia, M., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Hurtado-Díaz, M., Cruz, J., ... Kan, H. (2019b). Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *New England Journal of Medicine*, 381(8), 705–715. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364>
 - Liu, C., Xu, X., Bai, Y., Wang, T. Y., Rao, X., Wang, A., Sun, L., Ying, Z., Gushchina, L., Maiseyeu, A., Morishita, M., Sun, Q., Harkema, J. R., & Rajagopalan, S. (2014). Air pollution-mediated susceptibility to inflammation and insulin resistance: influence of CCR2 pathways in mice. *Environmental Health Perspectives*, 122(1), 17–26. <https://doi.org/10.1289/EHP.1306841>
 - Liu, L., Ruddy, T., Dalipaj, M., Poon, R., Szyszkowicz, M., You, H., Dales, R. E., & Wheeler, A. J. (2009). Effects of indoor, outdoor, and personal exposure to particulate air pollution on cardiovascular physiology and systemic mediators in seniors. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 51(9), 1088–1098. <https://doi.org/10.1097/JOM.0B013E3181B35144>
 - Liu, P., Wang, X., Fan, J., Xiao, W., & Wang, Y. (2016). Effects of Air Pollution on Hospital Emergency Room Visits for Respiratory Diseases: Urban-Suburban Differences in Eastern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/IJERPH13030341>
 - Lv, C., Wang, X., Pang, N., Wang, L., Wang, Y., Xu, T., Zhang, Y., Zhou, T., & Li, W. (2017). The impact of airborne particulate matter on pediatric hospital admissions for pneumonia among children in Jinan, China: A case-crossover study. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 67(6), 669–676. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265026>
 - Madsen, C., Rosland, P., Hoff, D. A., Nystad, W., Nafstad, P., & Næss, Ø. E. (2012). The short-term effect of 24-h average and peak air pollution on mortality in Oslo, Norway. *European Journal of Epidemiology*, 27(9), 717–727. <https://doi.org/10.1007/S10654-012-9719-1>
 - Mar, T. F., Larson, T. V., Stier, R. A., Claiborn, C., & Koenig, J. Q. (2004). An analysis of the association between respiratory symptoms in subjects with asthma and daily air pollution

- in Spokane, Washington. *Inhalation Toxicology*, 16(13), 809–815.
<https://doi.org/10.1080/08958370490506646>
- Mikati, I., Benson, A. F., Luben, T. J., Sacks, J. D., & Richmond-Bryant, J. (2018). Disparities in Distribution of Particulate Matter Emission Sources by Race and Poverty Status. *American Journal of Public Health*, 108(4), 480–485.
<https://doi.org/10.2105/AJPH.2017.304297>
 - Milojevic, A., Wilkinson, P., Armstrong, B., Bhaskaran, K., Smeeth, L., & Hajat, S. (2014). Short-term effects of air pollution on a range of cardiovascular events in England and Wales: case-crossover analysis of the MINAP database, hospital admissions and mortality. *Heart (British Cardiac Society)*, 100(14), 1093–1098. <https://doi.org/10.1136/HEARTJNL-2013-304963>
 - Mu, L., Deng, F., Tian, L., Li, Y., Swanson, M., Ying, J., Browne, R. W., Rittenhouse-Olson, K., Zhang, J., Zhang, Z. F., & Bonner, M. R. (2014). Peak expiratory flow, breath rate and blood pressure in adults with changes in particulate matter air pollution during the Beijing Olympics: a panel study. *Environmental Research*, 133, 4–11.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2014.05.006>
 - Nachman, K. E., & Parker, J. D. (2012). Exposures to fine particulate air pollution and respiratory outcomes in adults using two national datasets: a cross-sectional study. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 11, 25.
<https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-25>
 - O'Donnell, M. J., Fang, J., Mittleman, M. A., Kapral, M. K., & Wellenius, G. A. (2011). Fine particulate air pollution (PM_{2.5}) and the risk of acute ischemic stroke. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 22(3), 422–431. <https://doi.org/10.1097/EDE.0B013E3182126580>
 - O'Lenick, C. R., Winqvist, A., Mulholland, J. A., Friberg, M. D., Chang, H. H., Kramer, M. R., Darrow, L. A., & Sarnat, S. E. (2017). Assessment of neighbourhood-level socioeconomic status as a modifier of air pollution-asthma associations among children in Atlanta. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 71(2), 129–136. <https://doi.org/10.1136/JECH-2015-206530>
 - Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 142, 105876. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.105876>
 - Ostro, B., Malig, B., Broadwin, R., Basu, R., Gold, E. B., Bromberger, J. T., Derby, C., Feinstein, S., Greendale, G. A., Jackson, E. A., Kravitz, H. M., Matthews, K. A., Sternfeld, B., Tomey, K., Green, R. R., & Green, R. (2014). Chronic PM_{2.5} exposure and inflammation: determining sensitive subgroups in mid-life women. *Environmental Research*, 132, 168–175. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2014.03.042>
 - Peng, C., Bind, M. A. C., Colicino, E., Kloog, I., Byun, H. M., Cantone, L., Trevisi, L., Zhong, J., Brennan, K., Dereix, A. E., Vokonas, P. S., Coull, B. A., Schwartz, J. D., & Baccarelli, A. A. (2016). Particulate Air Pollution and Fasting Blood Glucose in Nondiabetic Individuals: Associations and Epigenetic Mediation in the Normative Aging Study, 2000–2011. *Environmental Health Perspectives*, 124(11), 1715–1721. <https://doi.org/10.1289/EHP183>

- Pinault, L. L., Weichenthal, S., Crouse, D. L., Brauer, M., Erickson, A., Donkelaar, A. van, Martin, R. V., Hystad, P., Chen, H., Finès, P., Brook, J. R., Tjepkema, M., & Burnett, R. T. (2017). Associations between fine particulate matter and mortality in the 2001 Canadian Census Health and Environment Cohort. *Environmental Research*, 159, 406–415. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2017.08.037>
- Pinault, L., Tjepkema, M., Crouse, D. L., Weichenthal, S., Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Chen, H., & Burnett, R. T. (2016). Risk estimates of mortality attributed to low concentrations of ambient fine particulate matter in the Canadian community health survey cohort. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/S12940-016-0111-6>
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(6), 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Pope, C. A., Turner, M. C., Burnett, R. T., Jerrett, M., Gapstur, S. M., Diver, W. R., Krewski, D., & Brook, R. D. (2015). Relationships between fine particulate air pollution, cardiometabolic disorders, and cardiovascular mortality. *Circulation Research*, 116(1), 108–115. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.116.305060>
- Prieto-Parra, L., Yohannessen, K., Brea, C., Vidal, D., Ubilla, C. A., & Ruiz-Rudolph, P. (2017). Air pollution, PM2.5 composition, source factors, and respiratory symptoms in asthmatic and nonasthmatic children in Santiago, Chile. *Environment International*, 101, 190–200. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2017.01.021>
- Puett, R. C., Hart, J. E., Yanosky, J. D., Paciorek, C., Schwartz, J., Suh, H., Speizer, F. E., & Laden, F. (2009). Chronic fine and coarse particulate exposure, mortality, and coronary heart disease in the Nurses' Health Study. *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1697–1701. <https://doi.org/10.1289/EHP.0900572>
- Puett, R. C., Hart, J. E., Yanosky, J. D., Spiegelman, D., Wang, M., Fisher, J. A., Hong, B., & Laden, F. (2014). Particulate matter air pollution exposure, distance to road, and incident lung cancer in the nurses' health study cohort. *Environmental Health Perspectives*, 122(9), 926–932. <https://doi.org/10.1289/EHP.1307490>
- Rich, D. Q., Kipen, H. M., Zhang, J., Kamat, L., Wilson, A. C., & Kostis, J. B. (2010). Triggering of transmural infarctions, but not nontransmural infarctions, by ambient fine particles. *Environmental Health Perspectives*, 118(9), 1229–1234. <https://doi.org/10.1289/EHP.0901624>
- Rich, D. Q., Zareba, W., Beckett, W., Hopke, P. K., Oakes, D., Frampton, M. W., Bisognano, J., Chalupa, D., Bausch, J., O'Shea, K., Wang, Y., & Utell, M. J. (2012). Are ambient ultrafine, accumulation mode, and fine particles associated with adverse cardiac responses in patients undergoing cardiac rehabilitation? *Environmental Health Perspectives*, 120(8), 1162–1169. <https://doi.org/10.1289/EHP.1104262>
- Rodopoulou, S., Samoli, E., Chalbot, M. C. G., & Kavouras, I. G. (2015). Air pollution and cardiovascular and respiratory emergency visits in Central Arkansas: A time-series analysis. *The Science of the Total Environment*, 536, 872–879. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.06.056>

- Rohr, A. C., Wagner, J. G., Morishita, M., Kamal, A., Keeler, G. J., & Harkema, J. R. (2010). Cardiopulmonary responses in spontaneously hypertensive and Wistar-Kyoto rats exposed to concentrated ambient particles from Detroit, Michigan. *Inhalation Toxicology*, 22(6), 522–533. <https://doi.org/10.3109/08958370903524509>
- Sade, M. Y., Novack, V., Ifergane, G., Horev, A., & Kloog, I. (2015). Air Pollution and Ischemic Stroke Among Young Adults. *Stroke*, 46(12), 3348–3353. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.115.010992>
- Salam, M. T., Byun, H. M., Lurmann, F., Breton, C. V., Wang, X., Eckel, S. P., & Gilliland, F. D. (2012). Genetic and epigenetic variations in inducible nitric oxide synthase promoter, particulate pollution, and exhaled nitric oxide levels in children. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 129(1). <https://doi.org/10.1016/J.JACI.2011.09.037>
- Samoli, E., Atkinson, R. W., Analitis, A., Fuller, G. W., Green, D. C., Mudway, I., Anderson, H. R., & Kelly, F. J. (2016). Associations of short-term exposure to traffic-related air pollution with cardiovascular and respiratory hospital admissions in London, UK. *Occupational and Environmental Medicine*, 73(5), 300–307. <https://doi.org/10.1136/OEMED-2015-103136>
- Samoli, E., Stafoggia, M., Rodopoulou, S., Ostro, B., Declercq, C., Alessandrini, E., Díaz, J., Karanasiou, A., Kelessis, A. G., Tertre, A. Le, Pandolfi, P., Randi, G., Scarinzi, C., Zauli-Sajani, S., Katsouyanni, K., Forastiere, F., Alessandrini, E., Angelini, P., Berti, G., ... Pascal, M. (2013). Associations between fine and coarse particles and mortality in Mediterranean cities: results from the MED-PARTICLES project. *Environmental Health Perspectives*, 121(8), 932–938. <https://doi.org/10.1289/EHP.1206124>
- Sarnat, J. A., Sarnat, S. E., Flanders, W. D., Chang, H. H., Mulholland, J., Baxter, L., Isakov, V., & Özkaynak, H. (2013). Spatiotemporally resolved air exchange rate as a modifier of acute air pollution-related morbidity in Atlanta. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 23(6), 606–615. <https://doi.org/10.1038/JES.2013.32>
- Schneider, A., Neas, L., Herbst, M. C., Case, M., Williams, R. W., Cascio, W., Hinderliter, A., Holguln, F., Buse, J. B., Dungan, K., Styner, M., Peters, A., & Devlin, R. B. (2008). Endothelial dysfunction: associations with exposure to ambient fine particles in diabetic individuals. *Environmental Health Perspectives*, 116(12), 1666–1674. <https://doi.org/10.1289/EHP.11666>
- Schwartz, J., Park, S. K., O'Neill, M. S., Vokonas, P. S., Sparrow, D., Weiss, S., & Kelsey, K. (2005). Glutathione-S-transferase M1, obesity, statins, and autonomic effects of particles: gene-by-drug-by-environment interaction. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 172(12), 1529–1533. <https://doi.org/10.1164/RCCM.200412-1698OC>
- Shi, L., Zanobetti, A., Kloog, I., Coull, B. A., Koutrakis, P., Melly, S. J., & Schwartz, J. D. (2016). Low-Concentration PM_{2.5} and Mortality: Estimating Acute and Chronic Effects in a Population-Based Study. *Environmental Health Perspectives*, 124(1), 46–52. <https://doi.org/10.1289/EHP.1409111>
- Silverman, R. A., Ito, K., Freese, J., Kaufman, B. J., De Claro, D., Braun, J., & Prezant, D. J. (2010). Association of ambient fine particles with out-of-hospital cardiac arrests in New York City. *American Journal of Epidemiology*, 172(8), 917–923. <https://doi.org/10.1093/AJE/KWQ217>

- Sinclair, A. H., Melly, S., Tolsma, D., Spengler, J., Perkins, L., Rohr, A., & Wyzga, R. (2014). Childhood asthma acute primary care visits, traffic, and traffic-related pollutants. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 64(5), 561–567. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.873093>
- Strickland, M. J., Hao, H., Hu, X., Chang, H. H., Darrow, L. A., & Liu, Y. (2016). Pediatric Emergency Visits and Short-Term Changes in PM2.5 Concentrations in the U.S. State of Georgia. *Environmental Health Perspectives*, 124(5), 690–696. <https://doi.org/10.1289/EHP.1509856>
- Strickland, M. J., Klein, M., Dana Flanders, W., Chang, H. H., Mulholland, J. A., Tolbert, P. E., & Darrow, L. A. (2014). Modification of the effect of ambient air pollution on pediatric asthma emergency visits: susceptible subpopulations. *Epidemiology* (Cambridge, Mass.), 25(6), 843–850. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000170>
- Su, C., Hampel, R., Franck, U., Wiedensohler, A., Cyrus, J., Pan, X., Wichmann, H. E., Peters, A., Schneider, A., & Breitner, S. (2015). Assessing responses of cardiovascular mortality to particulate matter air pollution for pre-, during- and post-2008 Olympics periods. *Environmental Research*, 142, 112–122. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2015.06.025>
- Thurston, G. D., Ahn, J., Cromar, K. R., Shao, Y., Reynolds, H. R., Jerrett, M., Lim, C. C., Shanley, R., Park, Y., & Hayes, R. B. (2016). Ambient Particulate Matter Air Pollution Exposure and Mortality in the NIH-AARP Diet and Health Cohort. *Environmental Health Perspectives*, 124(4), 484–490. <https://doi.org/10.1289/EHP.1509676>
- Tomczak, A., Miller, A. B., Weichenthal, S. A., To, T., Wall, C., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Crouse, D. L., & Villeneuve, P. J. (2016). Long-term exposure to fine particulate matter air pollution and the risk of lung cancer among participants of the Canadian National Breast Screening Study. *International Journal of Cancer*, 139(9), 1958–1966. <https://doi.org/10.1002/ijc.30255>
- Tong, H., Rappold, A. G., Caughey, M., Hinderliter, A. L., Bassett, M., Montilla, T., Case, M. W., Berntsen, J., Bromberg, P. A., Cascio, W. E., Diaz-Sanchez, D., Devlin, R. B., & Samet, J. M. (2015). Dietary Supplementation with Olive Oil or Fish Oil and Vascular Effects of Concentrated Ambient Particulate Matter Exposure in Human Volunteers. *Environmental Health Perspectives*, 123(11), 1173–1179. <https://doi.org/10.1289/EHP.1408988>
- Tong, H., Rappold, A. G., Diaz-Sanchez, D., Steck, S. E., Berntsen, J., Cascio, W. E., Devlin, R. B., & Samet, J. M. (2012). Omega-3 fatty acid supplementation appears to attenuate particulate air pollution-induced cardiac effects and lipid changes in healthy middle-aged adults. *Environmental Health Perspectives*, 120(7), 952–957. <https://doi.org/10.1289/EHP.1104472>
- Turner, M. C., Cohen, A., Burnett, R. T., Jerrett, M., Diver, W. R., Gapstur, S. M., Krewski, D., Samet, J. M., & Pope, C. A. (2017). Interactions between cigarette smoking and ambient PM2.5 for cardiovascular mortality. *Environmental Research*, 154, 304–310. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2017.01.024>
- Turner, M. C., Krewski, D., Pope, C. A., Chen, Y., Gapstur, S. M., & Thun, M. J. (2011). Long-term ambient fine particulate matter air pollution and lung cancer in a large cohort of never-smokers. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 184(12), 1374–1381. <https://doi.org/10.1164/rccm.201106-1011OC>

- U.S. EPA. (2019). Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, Dec 2019). <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=347534>
- U.S. EPA. (2022). Supplement to the 2019 Integrated Science Assessment for Particulate Matter (Final Report, 2022).
- Viehmann, A., Hertel, S., Fuks, K., Eisele, L., Moebus, S., Möhlenkamp, S., Nonnemacher, M., Jakobs, H., Erbel, R., Jöckel, K. H., & Hoffmann, B. (2015). Long-term residential exposure to urban air pollution, and repeated measures of systemic blood markers of inflammation and coagulation. *Occupational and Environmental Medicine*, 72(9), 656–663. <https://doi.org/10.1136/OEMED-2014-102800>
- Vieira, J. L., Guimaraes, G. V., De Andre, P. A., Saldiva, P. H. N., & Bocchi, E. A. (2016). Effects of reducing exposure to air pollution on submaximal cardiopulmonary test in patients with heart failure: Analysis of the randomized, double-blind and controlled FILTER-HF trial. *International Journal of Cardiology*, 215, 92–97. <https://doi.org/10.1016/J.IJCARD.2016.04.071>
- Villeneuve, P. J., Weichenthal, S. A., Crouse, D., Miller, A. B., To, T., Martin, R. V., Van Donkelaar, A., Wall, C., & Burnett, R. T. (2015). Long-term Exposure to Fine Particulate Matter Air Pollution and Mortality among Canadian Women. *Epidemiology*, 26(4), 536–545. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000294>
- Wang, M., Utell, M. J., Schneider, A., Zareba, W., Frampton, M. W., Oakes, D., Hopke, P. K., Wiltshire, J., Kane, C., Peters, A., Breitner, S., Chalupa, D., & Rich, D. Q. (2016). Does total antioxidant capacity modify adverse cardiac responses associated with ambient ultrafine, accumulation mode, and fine particles in patients undergoing cardiac rehabilitation? *Environmental Research*, 149, 15–22. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2016.04.031>
- Wang, Y., Shi, L., Lee, M., Liu, P., Di, Q., Zanobetti, A., & Schwartz, J. D. (2017). Long-term Exposure to PM_{2.5} and Mortality Among Older Adults in the Southeastern US. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 28(2), 207–214. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000614>
- Watanabe, M., Noma, H., Kurai, J., Sano, H., Kitano, H., Saito, R., Kimura, Y., Aiba, S., Oshimura, M., & Shimizu, E. (2015). Variation in the Effect of Particulate Matter on Pulmonary Function in Schoolchildren in Western Japan and Its Relation with Interleukin-8. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(11), 14229–14243. <https://doi.org/10.3390/IJERPH121114229>
- Weichenthal, S., Lavigne, E., Evans, G., Pollitt, K., & Burnett, R. T. (2016). Ambient PM_{2.5} and risk of emergency room visits for myocardial infarction: impact of regional PM_{2.5} oxidative potential: a case-crossover study. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/S12940-016-0129-9>
- Weichenthal, S., Villeneuve, P. J., Burnett, R. T., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Jones, R. R., DellaValle, C. T., Sandler, D. P., Ward, M. H., & Hoppin, J. A. (2014a). Long-term exposure to fine particulate matter: association with nonaccidental and cardiovascular mortality in the agricultural health study cohort. *Environmental Health Perspectives*, 122(6), 609–615. <https://doi.org/10.1289/EHP.1307277>
- Weichenthal, S., Villeneuve, P. J., Burnett, R. T., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Jones, R. R., DellaValle, C. T., Sandler, D. P., Ward, M. H., & Hoppin, J. A. (2014b). Long-term

exposure to fine particulate matter: association with nonaccidental and cardiovascular mortality in the agricultural health study cohort. *Environmental Health Perspectives*, 122(6), 609–615. <https://doi.org/10.1289/EHP.1307277>

- Weinmayr, G., Hennig, F., Fuks, K., Nonnemacher, M., Jakobs, H., Möhlenkamp, S., Erbel, R., Jöckel, K. H., Hoffmann, B., & Moebus, S. (2015). Long-term exposure to fine particulate matter and incidence of type 2 diabetes mellitus in a cohort study: effects of total and traffic-specific air pollution. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/S12940-015-0031-X>
- Wellenius, G. A., Boyle, L. D., Wilker, E. H., Sorond, F. A., Coull, B. A., Koutrakis, P., Mittleman, M. A., & Lipsitz, L. A. (2013). Ambient fine particulate matter alters cerebral hemodynamics in the elderly. *Stroke*, 44(6), 1532–1536. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.111.000395>
- Wellenius, G. A., Burger, M. R., Coull, B. A., Schwartz, J., Suh, H. H., Koutrakis, P., Schlaug, G., Gold, D. R., & Mittleman, M. A. (2012). Ambient air pollution and the risk of acute ischemic stroke. *Archives of Internal Medicine*, 172(3), 229–234. <https://doi.org/10.1001/ARCHINTERNMED.2011.732>
- Wellenius, G. A., Wilhelm-Benartzi, C. S., Wilker, E. H., Coull, B. A., Suh, H. H., Koutrakis, P., & Lipsitz, L. A. (2012). Ambient particulate matter and the response to orthostatic challenge in the elderly: the Maintenance of Balance, Independent Living, Intellect, and Zest in the Elderly (MOBILIZE) of Boston study. *Hypertension (Dallas, Tex. : 1979)*, 59(3), 558–563. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.111.180778>
- WHO. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
- Wittkopp, S., Staimer, N., Tjoa, T., Gillen, D., Daher, N., Shafer, M., Schauer, J. J., Sioutas, C., & Delfino, R. J. (2013). Mitochondrial genetic background modifies the relationship between traffic-related air pollution exposure and systemic biomarkers of inflammation. *PLoS One*, 8(5). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0064444>
- Wong, C. M., Lai, H. K., Tsang, H., Thach, T. Q., Neil Thomas, G., Lam, K. B. H., Chan, K. P., Yang, L., Lau, A. K. H., Ayres, J. G., Lee, S. Y., Chan, W. M., Hedley, A. J., & Lam, T. H. (2015). Satellite-Based Estimates of Long-Term Exposure to Fine Particles and Association with Mortality in Elderly Hong Kong Residents. *Environmental Health Perspectives*, 123(11), 1167–1172. <https://doi.org/10.1289/EHP.1408264>
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- World Health Organization. Regional Office for Europe. (2006). Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.
- Xu, Q., Li, X., Wang, S., Wang, C., Huang, F., Gao, Q., Wu, L., Tao, L., Guo, J., Wang, W., & Guo, X. (2016). Fine Particulate Air Pollution and Hospital Emergency Room Visits for Respiratory Disease in Urban Areas in Beijing, China, in 2013. *PLoS One*, 11(4). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0153099>
- Xu, X., Yavar, Z., Verdin, M., Ying, Z., Mihai, G., Kampfrath, T., Wang, A., Zhong, M., Lippmann, M., Chen, L. C., Rajagopalan, S., & Sun, Q. (2010). Effect of early particulate air

- pollution exposure on obesity in mice: role of p47phox. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 30(12), 2518–2527. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.110.215350>
- Yap, P. S., Gilbreath, S., Garcia, C., Jareen, N., & Goodrich, B. (2013). The influence of socioeconomic markers on the association between fine particulate matter and hospital admissions for respiratory conditions among children. *American Journal of Public Health*, 103(4), 695–702. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2012.300945>
 - Ye, X., Peng, L., Kan, H., Wang, W., Geng, F., Mu, Z., Zhou, J., & Yang, D. (2016). Acute Effects of Particulate Air Pollution on the Incidence of Coronary Heart Disease in Shanghai, China. *PloS One*, 11(3). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0151119>
 - Zeger, S. L., Dominici, F., McDermott, A., & Samet, J. M. (2008). Mortality in the Medicare population and chronic exposure to fine particulate air pollution in urban centers (2000–2005). *Environmental Health Perspectives*, 116(12), 1614–1619. <https://doi.org/10.1289/EHP.11449>
 - Zheng, Z., Zhang, X., Wang, J., Dandekar, A., Kim, H., Qiu, Y., Xu, X., Cui, Y., Wang, A., Chen, L. C., Rajagopalan, S., Sun, Q., & Zhang, K. (2015). Exposure to fine airborne particulate matters induces hepatic fibrosis in murine models. *Journal of Hepatology*, 63(6), 1397–1404. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2015.07.020>
 - Zhong, J., Karlsson, O., Wang, G., Li, J., Guo, Y., Lin, X., Zemplyenyi, M., Sanchez-Guerra, M., Trevisi, L., Urch, B., Speck, M., Liang, L., Coull, B. A., Koutrakis, P., Silverman, F., Gold, D. R., Wu, T., & Baccarelli, A. A. (2017). B vitamins attenuate the epigenetic effects of ambient fine particles in a pilot human intervention trial. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(13), 3503–3508. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1618545114>
 - Zhong, J., Trevisi, L., Urch, B., Lin, X., Speck, M., Coull, B. A., Liss, G., Thompson, A., Wu, S., Wilson, A., Koutrakis, P., Silverman, F., Gold, D. R., & Baccarelli, A. A. (2017). B-vitamin Supplementation Mitigates Effects of Fine Particles on Cardiac Autonomic Dysfunction and Inflammation: A Pilot Human Intervention Trial. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/SREP45322>

15 Acrónimos

ACS	American Cancer Society
ALL	Todas Las Causas
ASTH	Asma
BRO	Bronquitis Aguda
CHD	Coronary Heart Disease
CHF	Enfermedad Cardio congestiva
CLD	Enfermedad Respiratoria Crónica
COPD	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
CPM	Enfermedades cardiopulmonares
CQP	Concón, Quintero y Puchuncaví
CRFs	Concentration - Response Functions
CRP	proteína C reactiva
CVD	Enfermedades Cardiovascular
DYS	Disritmia
ECLP	Publicación de la Estrategia Climática de Largo Plazo
EMRP	Estación Monitora con Representatividad Poblacional
EPOC	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas
ERV	Visitas salas de urgencia
ESE	Estatus socioeconómico
FVC	capacidad pulmonar vital forzada
HA	Admisiones Hospitalarias
IHD	Enfermedad Cardio isquémica
MLT	Mortalidad Prematura Exposición de Largo Plazo
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
MRAD	Días con Actividad Restringida Leve
MST	Mortalidad Prematura Exposición de Corto Plazo
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
NDC	Contribución Determinada a Nivel Nacional
OMS	Organización Mundial de La Salud
PNEU	Neumonía
RAD	Días con Actividad Restringida
RM	Región Metropolitana
RR	riesgo relativo
RSP	Enfermedades Respiratorias
SLD	Días Escolares Perdidos
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SNA	sistema nervioso autónomo
WLD	Días Laborales Perdidos

