



Informe Número

1608690

Original



**ESTUDIO ANTECEDENTES PARA LA REVISIÓN DEL PLAN DE
PREVENCIÓN DE HUASCO Y REVISIÓN DE LA NORMA DE
CALIDAD DEL AIRE PARA MATERIAL PARTICULADO
SEDIMENTABLE EN LA CUENCA DEL RÍO HUASCO
ID Licitación: 608897-129-LP22**

Estudio solicitado por la Subsecretaría del Medio Ambiente

INFORME FINAL

Santiago, 19 de octubre de 2023

Título del Proyecto

Estudio Antecedentes para la Revisión del Plan de Prevención de Huasco y Revisión de la Norma de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco

Autores:

Jefe de proyecto: Luis Cifuentes

Especialista Inventario Emisiones y Calidad del Aire:
Héctor Jorquera

Ingeniero de proyecto: Viviana Cerda Gho, Valentina Morandé, Rocío Herrera

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna N° 4860, Macul – Santiago

Datos Mandante

Razón Social: Subsecretaría del Medio Ambiente

RUT: [REDACTED]

Dirección: San Martín 73, Santiago

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo general recomendar líneas de acción futuras mediante la evaluación del impacto generado por la aplicación del Plan de Prevención de la Contaminación Atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante en la evolución de la calidad del aire en Huasco, y la presentación de antecedentes para la revisión de la norma de calidad del aire por material particulado sedimentable (MPS) vigente en la zona.

Cuerpo del informe

318 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

19/10/2023

Información Contractual

Correlativo Contrato: 3311

OC N°: 610176-33-SE22

Contraparte técnica

Nombre: Mónica Pavez

Cargo: Profesional Área Control de la Contaminación, SEREMI del Medio Ambiente Región de Atacama

E-mail: [REDACTED]

Sr. Luis Cifuentes

Director GreenLab

Dictuc S.A.

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	I
Lista de Tablas.....	V
Lista de Figuras.....	IX
Acrónimos y Abreviaturas.....	XIV
Resumen Ejecutivo	1
1. Antecedentes y justificación del estudio.....	4
1.1 Área de estudio.....	5
2. Objetivos del estudio	8
2.1 Objetivo general.....	8
2.2 Objetivos específicos	8
2.3 Alcance de este informe	8
3. Generación de antecedentes para la revisión del PPA Huasco – Identificación de fuentes emisoras	10
3.1 Reunión de inicio con la contraparte técnica	10
3.2 Recopilación de antecedentes, e identificación y descripción fuentes emisoras existentes.....	10
3.2.1 <i>Central Termoeléctrica Guacolda</i>	<i>12</i>
3.2.2 <i>Planta de Pellets.....</i>	<i>16</i>
3.2.3 <i>Central Térmica Huasco</i>	<i>25</i>
3.2.4 <i>Puerto Las Losas.....</i>	<i>26</i>
3.2.5 <i>Punta Alcalde</i>	<i>28</i>
3.2.6 <i>Cerro Blanco.....</i>	<i>28</i>
3.2.7 <i>Otras fuentes puntuales.....</i>	<i>31</i>
3.2.8 <i>Fuentes Difusas</i>	<i>35</i>
3.2.9 <i>Síntesis fuentes existentes</i>	<i>39</i>
3.3 Identificación de potenciales nuevas fuentes de MP10, MP2,5, sus precursores y sustancias tóxicas, y/o futuras ampliaciones de complejos industriales existentes, para los próximos 15 años, en el marco del SEIA.....	40

3.4	Recopilación compromisos ambientales, en el marco del SEIA, que tengan relación con el control de emisiones	41
3.5	Entrega recopilación realizada en un formato que permita identificar las variables relevantes.....	42
3.6	Elaboración de inventario de emisiones actualizado y proyectado considerando un horizonte de evaluación de 15 años	42
3.6.1	<i>Estimación del inventario de emisiones.....</i>	<i>43</i>
3.6.2	<i>Proyección del inventario de emisiones.....</i>	<i>73</i>
3.6.3	<i>Comparación del inventario de emisiones actualizado y el inventario utilizado en la elaboración del anteproyecto del PPA Huasco</i>	<i>81</i>
3.7	Determinación del aporte de las distintas fuentes emisoras en la calidad del aire, para los contaminantes MP10 y MP2,5	83
3.7.1	<i>Análisis de la evolución de la calidad del aire para el MP10 y MP2,5 y meteorología.....</i>	<i>83</i>
3.7.2	<i>Evaluación del impacto de las emisiones totales y por fuente emisora sobre la calidad del aire para MP10, MP2,5 y MPS.....</i>	<i>114</i>
3.7.3	<i>Determinación de la relación emisión-calidad del aire para MP10 y MP2,5, según escenario sin y con medidas propuestas proyectadas a 15 años</i>	<i>123</i>
3.8	Determinación background de MP10 y MP2,5, para la zona en estudio	125
3.8.1	<i>Campaña de monitoreo de background</i>	<i>125</i>
3.8.2	<i>Resultados de la campaña de monitoreo de background</i>	<i>129</i>
3.8.3	<i>Estimación alternativa del background</i>	<i>131</i>
3.9	Análisis y propuesta de mejoras para las medidas vigentes del PPA	136
3.9.1	<i>Evaluación de la aplicación de las medidas, estudios e instrumentos establecidos en el PPA</i>	<i>136</i>
3.9.2	<i>Determinación de la existencia de potencial de reducción de emisiones de fuentes emisoras identificadas en escenario actual y proyectado</i>	<i>152</i>
3.9.3	<i>Propuesta de conjunto de medidas de control de emisiones a implementar en escenario actual y proyectado</i>	<i>157</i>
3.9.4	<i>Análisis y recomendaciones sobre estrategias de largo plazo o condiciones mínimas para garantizar que la localidad de Huasco se mantenga bajo latencia por norma anual de MP10.....</i>	<i>164</i>
3.10	Estimación de la reducción de emisiones de las medidas señaladas en el Plan de Control Integral de la Planta de Pellets y Termoeléctrica Guacolda	165

3.11	Propuesta de banco de medidas de compensación de emisiones de MP10	169
3.11.1	<i>Revisión de medidas de compensación potencialmente aplicables</i>	<i>170</i>
3.11.2	<i>Banco de medidas de compensación</i>	<i>171</i>
4.	Evaluación del comportamiento histórico de la concentración de MPS y generación de antecedentes para la revisión y/o actualización del D.S. N°4/1992 del MINAGRI	179
4.1	Análisis del comportamiento histórico de la concentración del MPS contenida en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI	179
4.1.1	<i>Reunión de inicio con la contraparte técnica.....</i>	<i>179</i>
4.1.2	<i>Análisis del comportamiento histórico de las concentraciones de MPS, y realizar un diagnóstico de la calidad del aire de Huasco por MPS y contenido de hierro en el MPS</i>	<i>179</i>
4.1.3	<i>Análisis mensual/anual entre las concentraciones de MPS y las emisiones generadas por las principales fuentes emisoras.....</i>	<i>215</i>
4.2	Análisis de la regulación internacional existente para la calidad del aire por MPS ...	218
4.2.1	<i>Descripción de las normas internacionales de MPS y de hierro en MPS, y comparación con la normativa nacional</i>	<i>218</i>
4.2.2	<i>Principales ventajas y desventajas de la norma vigente en comparación con la normativa internacional</i>	<i>222</i>
4.3	Estimación del potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de MPS.....	227
4.3.1	<i>Identificación de las potenciales tecnologías de abatimiento para reducir emisiones de MPS</i>	<i>227</i>
4.3.2	<i>Estimación del potencial de reducción de emisiones de medidas propuestas para MPS</i>	<i>227</i>
4.3.3	<i>Costo de medidas propuestas para MPS</i>	<i>229</i>
4.3.4	<i>Selección de medidas para MPS por costo-eficiencia</i>	<i>231</i>
4.4	Generación de antecedentes para la revisión y/o actualización de la norma de MPS	231
4.4.1	<i>Recopilación y sistematización de resultados y conclusiones de los estudios realizados en la zona de Huasco respecto al MPS</i>	<i>231</i>
4.4.2	<i>Resultados de investigaciones científicas que aportan a las actualizaciones sobre efectos del MPS en recursos naturales</i>	<i>249</i>
4.4.3	<i>Estudios sobre metodologías de medición de concentración atmosférica de MPS</i>	<i>262</i>

4.5	Elaboración de escenarios de actualización de la norma existente	269
4.5.1	<i>Artículos relevantes para dictación de normas de calidad ambiental y emisión, contenidos en el D.S. N°38/2012 del MMA.....</i>	270
4.5.2	<i>Definición de la fuente a regular.....</i>	271
4.5.3	<i>Método de medición para constatar el cumplimiento de la norma</i>	271
4.5.4	<i>Condiciones de superación de la norma</i>	274
4.5.5	<i>Revisión y propuestas de mejora del articulado existente</i>	276
4.5.6	<i>Evaluación del costo de aplicación de las propuestas regulatorias.....</i>	279
5.	Conclusiones.....	280
6.	Bibliografía	284
7.	Anexos.....	290
7.1	Diagrama de procesos de la Central Termoeléctrica Guacolda	290
7.2	Diagrama de procesos de la Planta de Pellets	291
7.3	Niveles de actividad para la estimación de emisiones de grandes fuentes	292
7.4	Factores de emisión para la estimación de emisiones de fuentes puntuales de otras industrias.....	293
7.5	Revisión de instrumentos de protección de glaciares	297
7.6	Evaluación norma anual de MPS y hierro en MPS bajo propuesta de verificador de promedio trianual	299
7.7	Evaluación norma mensual de hierro en MPS bajo propuesta de verificador alternativa.....	300

Lista de Tablas

Tabla 1-1 Características de los puntos que delimitan la Zona Latente por MP10 para la localidad de Huasco y su zona circundante.....	7
Tabla 2-1 Resumen cumplimiento de objetivos específicos.....	9
Tabla 3-1 Participantes reunión de inicio	10
Tabla 3-2 Fuentes de emisión (MP, MP10, MP2,5, NOx, SOx, As, V, Hg, Ni, Pb, Cd) identificadas en la localidad de Huasco y su zona circundante	11
Tabla 3-3 Itinerario de la primera visita a terreno.....	12
Tabla 3-4 Sistemas de control de emisiones atmosféricas de la Central Termoeléctrica Guacolda	15
Tabla 3-5 Sistemas de abatimiento en procesos con combustión de la Planta de Pellets.....	22
Tabla 3-6 Generación Bruta de centrales Huasco TG y Huasco Vapor	25
Tabla 3-7 Establecimientos que operan fuentes emisoras puntuales en la comuna de Huasco .	31
Tabla 3-8 Tipos de fuentes identificadas en la zona latente	33
Tabla 3-9 Contaminantes emitidos por tipo de combustible	33
Tabla 3-10 Tipos de fuentes identificadas en la zona latente por tipo de combustible y contaminantes emitidos	34
Tabla 3-11 Principales empresas dueñas de fuentes emisoras	34
Tabla 3-12 Relaves abandonados Huasco.....	35
Tabla 3-13 Superficie de quemas agrícolas en la comuna de Huasco, 2018-2021 [ha]	36
Tabla 3-14 Siniestros registrados en la comuna de Huasco, 2018-2021	36
Tabla 3-15 Superficie de incendios forestales en la comuna de Huasco, 2018-2021 [ha]	37
Tabla 3-16 Consumo de leña en la comuna de Huasco, 2018-2019 [m ³ sólidos/año]	38
Tabla 3-17 Proyectos aprobados por el SEIA de las principales fuentes emisoras en Huasco.....	40
Tabla 3-18 Proyectos aprobados por el SEIA en la comuna de Huasco	41
Tabla 3-19 Sistemas de Abatimiento recopilados	42
Tabla 3-20 Factores de emisión utilizados para los distintos tipos de fuentes emisoras	44
Tabla 3-21 Parámetros utilizados para estimación de factor de emisión	47
Tabla 3-22 Factores de emisión de sustancias tóxicas por tipo de fuente emisora	49
Tabla 3-23 Parámetros fuentes móviles para la localidad de Huasco	53
Tabla 3-24 Inventario de emisiones [t/año] de MP10 y MP2,5 por instalación en Huasco	55
Tabla 3-25 Inventario de emisiones [t/año] de SOx y NOx por instalación en Huasco	56
Tabla 3-26 Inventario de emisiones [t/año] de NH ₃ y COVs por instalación en Huasco	56
Tabla 3-27 Inventario de emisiones [kg/año] de As, Hg y Ni por instalación en Huasco	57
Tabla 3-28 Inventario de emisiones [kg/año] de Pb y Cd por instalación en Huasco	57
Tabla 3-29 Emisiones de MP10 y MP2,5 por combustión y sin combustión de Planta de Pellets [t/año]	60
Tabla 3-30 Emisiones de SOx y NOx por combustión y sin combustión de Planta de Pellets [t/año]	60

Tabla 3-31 Emisiones de NH₃ y COVs por combustión y sin combustión de Planta de Pellets [t/año] 60

Tabla 3-32 Emisiones de MP10 y MP2,5 por combustión y sin combustión de la Termoeléctrica Guacolda [t/año]..... 60

Tabla 3-33 Emisiones de SOx y NOx por combustión y sin combustión de la Termoeléctrica Guacolda [t/año]..... 61

Tabla 3-34 Emisiones de NH₃ y COVs por combustión y sin combustión de la Termoeléctrica Guacolda [t/año] 61

Tabla 3-35 Emisiones por contaminante y fuente, año 2021 [t] 62

Tabla 3-36 Inventario de emisiones anuales de MP10 y MP2,5 por subcategoría de la comuna de Huasco [t] 68

Tabla 3-37 Inventario de emisiones anuales de COV, NH₃, NOx y SOx por subcategoría de la comuna de Huasco [t]..... 69

Tabla 3-38 Referencias utilizadas para la proyección del inventario de emisiones 75

Tabla 3-39 Proyección emisiones MP10 por instalación, 2021-2036 [t/año] 78

Tabla 3-40 Proyección emisiones M2,5 por instalación, 2021-2036 [t/año] 78

Tabla 3-41 Comparación inventario de emisiones de anteproyecto PPA e inventario de emisiones actualizado, año 2020 [t/año]..... 82

Tabla 3-42 Cantidad de datos de MP10 y MP2,5, por año y estación de monitoreo..... 85

Tabla 3-43 Límites de concentración en normas de calidad primaria para MP10 y MP2,5..... 85

Tabla 3-44 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m³N] en estación 21 de Mayo..... 88

Tabla 3-45 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m³N] en estación 21 de Mayo..... 88

Tabla 3-46 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m³N] en estación EME F..... 91

Tabla 3-47 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m³N] en estación EME F..... 91

Tabla 3-48 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m³N] en estación EME M 94

Tabla 3-49 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m³N] en estación EME M 94

Tabla 3-50 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m³N] en estación Huasco Sívica 96

Tabla 3-51 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m³N] en estación Huasco II 97

Tabla 3-52 Variables meteorológicas medidas por estación 98

Tabla 3-53 Valores estadísticos estación Huasco Sívica, 2016 – 2023 102

Tabla 3-54 Valores estadísticos estación Huasco II, 2017 – 2021 102

Tabla 3-55 Valores estadísticos estación EME F, 2018 – 2023 103

Tabla 3-56 Valores estadísticos estación EME ME, 2018 – 2023..... 103

Tabla 3-57 Valores estadísticos estación SM4, 2018 – 2023 103

Tabla 3-58 Valores estadísticos estación SM8, 2018 – 2023 103

Tabla 3-59 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación EME F, año 2021 111

Tabla 3-60 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación EME ME, año 2021 112

Tabla 3-61 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación Huasco II, año 2021 112

Tabla 3-62 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación Huasco Sivica, año 2021 112

Tabla 3-63 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación SM4, año 2021 113

Tabla 3-64 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación SM8, año 2021 113

Tabla 3-65 Resumen de fuentes consideradas en la modelación. 115

Tabla 3-66 Receptores discretos..... 119

Tabla 3-67 Aportes al MP10 anual [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por cada fuente emisora en Huasco..... 120

Tabla 3-68 Aportes al MP2,5 anual [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por cada fuente emisora en Huasco..... 121

Tabla 3-69 Aportes al MPS anual [$\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$] por cada fuente emisora en Huasco 122

Tabla 3-70 FEC MP10 por fuente y estación de monitoreo..... 124

Tabla 3-71 FEC MP2,5 por fuente y estación de monitoreo..... 124

Tabla 3-72 Caracterización monitores 126

Tabla 3-73 Niveles de MP2,5 Background en la zona de estudio. 135

Tabla 3-74 Niveles de MP10 Background en la zona de estudio. 135

Tabla 3-75 Comparación de modelación y monitoreo de MP10 y MP2,5 en la zona de estudio 136

Tabla 3-76 Metas de reducción de emisiones de material particulado 139

Tabla 3-77 Medidas PPA Huasco 140

Tabla 3-78 Evaluación avance medidas PPA Huasco 141

Tabla 3-79 Recomendaciones respecto a medidas PPA Huasco 151

Tabla 3-80 Medidas de control de emisiones de MP10 línea base 154

Tabla 3-81 Medidas recopiladas posibles para aplicación a inventario de emisiones 155

Tabla 3-82 Potencial de reducción de emisiones de MP10..... 156

Tabla 3-83 Detalle precio unitario pavimentación en Calama (CLP2007/ m^2)..... 158

Tabla 3-84 Detalle precio unitario pavimentación en Calama (CLP2007/metro lineal)..... 158

Tabla 3-85 Resumen presupuesto actividades de fiscalización 2023 para PPDA..... 161

Tabla 3-86 Tiempos de incorporación de medidas seleccionadas 162

Tabla 3-87 Aportes al MP10 anual [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por cada fuente emisora en Huasco, año 2035 ... 163

Tabla 3-88 Medidas mínimas para el Plan de Control Integral de Planta de Pellets CAP Minería 165

Tabla 3-89 Medidas mínimas para el Plan de Control Integral Central Termoeléctrica Guacolda S.A. 167

Tabla 3-90 Eficiencias de abatimiento de las medidas señaladas en los PCI 167

Tabla 3-91 Potencial de reducción de emisiones de las medidas señaladas en los PCI..... 169

Tabla 3-92 Medidas de compensación comprometidas por proyectos localizados en Huasco. 170

Tabla 3-93 Banco de medidas de compensación de emisiones MP10..... 171

Tabla 3-94 Estimación factor de emisión para calcular compensación por estabilización 173

Tabla 3-95 Estimación factor de emisión para calcular compensación por pavimentación 174

Tabla 4-1 Valores máximos permisibles establecidos en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI 180

Tabla 4-2 Cantidad de datos de MPS por año y estación de monitoreo 181

Tabla 4-3 Cantidad de incumplimientos históricos del límite mensual de MPS, en el marco del D.S. N°4/1992..... 186

Tabla 4-4 Cantidad de incumplimientos históricos del límite mensual de hierro en MPS, en el marco del D.S. N°4/1992..... 188

Tabla 4-5 Promedio anual de las concentraciones de MPS, periodo 2016-2020..... 195

Tabla 4-6 Promedio anual de las concentraciones de hierro en MPS, periodo 2016-2020..... 196

Tabla 4-7 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°1 200

Tabla 4-8 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°1..... 200

Tabla 4-9 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°2 203

Tabla 4-10 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°2..... 203

Tabla 4-11 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°3 206

Tabla 4-12 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°3..... 206

Tabla 4-13 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°4 208

Tabla 4-14 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°4..... 209

Tabla 4-15 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°5 211

Tabla 4-16 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°5..... 212

Tabla 4-17 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°6 214

Tabla 4-18 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°6..... 214

Tabla 4-19 Emisiones anuales de MPS por instalación, periodo 2017-2020 [t] 215

Tabla 4-20 Concentraciones medias anuales medidas por las estaciones de monitoreo de MPS de CAP, periodo 2016-2020 215

Tabla 4-21 Concentraciones mensuales medidas por la red de monitoreo de MPS de CAP, periodo 2016-2020 [mg/m²-día] 216

Tabla 4-22 FEC MPS por fuente y estación de monitoreo 218

Tabla 4-23 Detalle de valores de referencia internacionales de MPS [mg/m²-día] identificados 221

Tabla 4-24 Cuadro comparativo para normativa existente de MPS..... 225

Tabla 4-25 Medidas recopiladas posibles para reducción de MPS 227

Tabla 4-26 Potencial de reducción de emisiones de MPS 228

Tabla 4-27 Valores del monitoreo de MPS en [mg/m²-día]..... 233

Tabla 4-28 Valores del monitoreo de hierro en MPS en [mg/m²-día] 234

Tabla 4-29 Sedimentación anual MPS entre 2008 – 2014 en [mg/m²-día] 235

Tabla 4-30 Sedimentación anual de hierro en MPS entre 2008 – 2014 en [mg/m²-día]..... 236

Tabla 4-31 Valor promedio mensual de MPS insoluble en zona de estudio[mg/m²-día] 237

Tabla 4-32 Valor promedio anual de MPS total en la cuenca del Río Huasco en [mg/m²-día] . 238

Tabla 4-33 Valores promedio [mg/kg] de metales en suelo en los diferentes sectores de la zona de estudio, comparados con los niveles de background de la zona de estudio 239

Tabla 4-34 Concentración mensual para MPS para el periodo del 2019 en [mg/m²-día]..... 241

Tabla 4-35 Concentración mensual para MPS para el periodo del 2020 en [mg/m²-día]..... 242

Tabla 4-36 Concentración mensual para MPS para el periodo del 2021 en [mg/m²-día]..... 242

Tabla 4-37 Concentraciones anuales para MPS para el periodo 2019-2021 en [mg/m²-día] 243

Tabla 4-38 Concentración mensual para hierro en MPS para el periodo del 2019 en [mg/m²-día] 244

Tabla 4-39 Concentración mensual para hierro en MPS para el periodo del 2020 en [mg/m²-día] 244

Tabla 4-40 Concentración mensual para hierro en MPS para el periodo del 2021 en [mg/m²-día] 245

Tabla 4-41 Concentraciones anuales para hierro en MPS para el periodo 2019-2021..... 245

Tabla 4-42 Resumen de estudios realizados en la zona de Huasco 248

Tabla 4-43 Lista de especies y sus respectivas familias 250

Tabla 4-44 Concentración de Fe56 y Fe57 en material particulado atmosférico recolectado en Vitória, Brasil..... 254

Tabla 4-45 Resumen estudios sobre efectos del MPS sobre Recursos Naturales..... 260

Tabla 4-46: Artículos relevantes para actualización de normativa 270

Tabla 4-47 Comparación entre estándares de monitoreo CIMM 1992 y ASTM 2017 273

Tabla 4-48 Propuesta de modificaciones al articulado de la Norma 278

Tabla 7-1 Niveles de actividad para Grandes Fuentes..... 292

Tabla 7-2 Factores de emisión por CCF8 para la estimación de emisiones de fuentes puntuales 293

Tabla 7-3 Revisión de instrumentos de protección de glaciares 297

Tabla 7-4 Concentraciones promedio por periodo y norma mensual de hierro en MPS [mg/m²-día] 301

Lista de Figuras

Figura 0-1 Emisiones anuales por contaminante e instalación [t/año] 2

Figura 1-1 Polígono declarado como latente por MP10 como norma anual, Huasco y su zona circundante 6

Figura 3-1 Ubicación de las unidades generadoras de Central Guacolda 13

Figura 3-2 Diagrama de los sistemas de abatimiento de las unidades generadoras de la Central Guacolda 15

Figura 3-3 Ubicación del proyecto Planta Desalinizadora Guacolda 16

Figura 3-4 Diagrama de procesos en Planta de Pellets..... 17

Figura 3-5 Ubicación Áreas Planta de Pellets 17

Figura 3-6 Ubicación canchas de Acopio, CMP 21

Figura 3-7 Ubicación aspersores en cancha de acopio principal 22

Figura 3-8 Ubicación del proyecto Depósito de Relaves Filtrados 24

Figura 3-9 Diagrama proceso generación eléctrica de Central Huasco..... 26

Figura 3-10 Ubicación Puerto Las Losas..... 27

Figura 3-11 Ubicación Proyecto Cerro Blanco y vías de acceso 29

Figura 3-12 Ubicación de partes, acciones y obras físicas asociadas a Planta Desalinizadora..... 30

Figura 3-13 Identificación de fuentes dentro de la zona latente en QGIS 32

Figura 3-14 Ubicación geográfica de relave abandonado Capote..... 35

Figura 3-15 Emisiones anuales de MP10, MP2,5, SOx y NOx por instalación [t/año] 58

Figura 3-16 Emisiones anuales de NH3 y COVs por instalación [t/año] 59

Figura 3-17 Emisiones de MP10, MP2,5, SOx y NOx por fuente, año 2021 [t]..... 62

Figura 3-18 Emisiones de NH3 y COVs por fuente, año 2021 [t] 63

Figura 3-19 Distribución emisiones de MP10 por fuentes de Planta de Pellets, año 2021 [%] ... 64

Figura 3-20 Distribución emisiones de MP10 por fuentes de Termoeléctrica Guacolda, año 2021 [%] 65

Figura 3-21 Distribución emisiones de MP2,5 por fuentes de Planta de Pellets, año 2021 [%] .. 66

Figura 3-22 Distribución emisiones de MP2,5 por fuentes de Termoeléctrica Guacolda, año 2021 [%] 67

Figura 3-23 Emisiones anuales por contaminante y categoría (otras industrias y comuna de Huasco) [t/año] 70

Figura 3-24 Emisiones por contaminante y subcategoría, año 2021 [t]..... 71

Figura 3-25 Distribución emisiones de MP10 por subcategoría, año 2021 [%] 72

Figura 3-26 Distribución emisiones de MP2,5 por subcategoría, año 2021 [%] 73

Figura 3-27 Proyección de emisiones MP10 [t/año], 2021-2036 79

Figura 3-28 Proyección de emisiones MP2,5 [t/año], 2021-2036 79

Figura 3-29 Proyección emisiones MP10 Otras fuentes [t/año], 2018-2035 80

Figura 3-30 Proyección emisiones MP2,5 Otras fuentes [t/año], 2018-2035 81

Figura 3-31 Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la zona de Huasco 84

Figura 3-32 Promedio tri-anual de las concentraciones anuales de MP10 86

Figura 3-33 Concentraciones de MP10 en estación de monitoreo 21 de Mayo 87

Figura 3-34 Concentraciones de MP2,5 en estación de monitoreo 21 de Mayo 88

Figura 3-35 Concentraciones de MP10 en estación de monitoreo EME F 90

Figura 3-36 Concentraciones de MP2,5 en estación de monitoreo EME F 91

Figura 3-37 Concentraciones de MP10 en estación de monitoreo EME M 93

Figura 3-38 Concentraciones de MP2,5 en estación de monitoreo EME M 94

Figura 3-39 Concentraciones de MP2,5 en estación de monitoreo Huasco Sivica 95

Figura 3-40 Concentraciones de MP10 en estación de monitoreo Huasco II 97

Figura 3-41 Estaciones de monitoreo con meteorología en la zona de estudio 98

Figura 3-42 Serie de tiempo variables meteorológicas estación Huasco Sivica 99

Figura 3-43 Serie de tiempo variables meteorológicas estación Huasco II 100

Figura 3-44 Serie de tiempo variables meteorológicas estación EME F 100

Figura 3-45 Serie de tiempo variables meteorológicas estación EME ME 101

Figura 3-46 Serie de tiempo variables meteorológicas estación SM4 101

Figura 3-47 Serie de tiempo variables meteorológicas estación SM8 102

Figura 3-48 Perfiles diarios de la velocidad del viento año 2020 104

Figura 3-49 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación Huasco Sivica (2016 -2023) 105

Figura 3-50 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación Huasco II (2017-2021) 106

Figura 3-51 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación EME F (2018-2023) 106

Figura 3-52 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación EME ME (2018-2023)..... 107

Figura 3-53 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación SM4 (2018-2023) 108

Figura 3-54 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación SM8 (2018-2023) 108

Figura 3-55 Dominio más interno de la modelación WRF para Huasco, año 2021. 109

Figura 3-56 Dominio de modelación CALPUFF 114

Figura 3-57 Fuentes de emisión (color rojo) consideradas en la modelación 116

Figura 3-58 Fuentes de emisión (color rojo), ampliación sobre Huasco bajo 117

Figura 3-59 Grilla de receptores con separación horizontal de 1 km 118

Figura 3-60 Grilla de receptores con separación de 250 m, sobre la zona de Huasco bajo y zona agrícola 119

Figura 3-61 Ubicaciones receptores discretos considerados en la modelación 120

Figura 3-62 Ubicación geográfica Parque Eólico San Juan 126

Figura 3-63 Monitores continuos instalados para medir MP10 y MP2,5 en Parque Eólico San Juan 127

Figura 3-64 Sitio donde fueron instalados los monitores continuos de medición en Parque Eólico San Juan 128

Figura 3-65 Serie de tiempo del MP2,5 en Parque Eólico San Juan 130

Figura 3-66 Perfil diario del MP2,5 en Parque Eólico San Juan 130

Figura 3-67 Estaciones de monitoreo analizadas 132

Figura 3-68 Concentraciones diarias de MP2,5 estación Huasco Sivica (2019-2022) 133

Figura 3-69 Concentraciones diarias de MP2,5 estación EME M (2019-2022) 134

Figura 3-70 Concentraciones diarias de MP2,5 estación 21 de mayo (2019-2022) 134

Figura 3-71 Concentraciones diarias de MP10 estación 21 de mayo (2019-2022) 135

Figura 3-72 Evaluación norma anual MP10 137

Figura 3-73 Evaluación norma diaria MP10 138

Figura 3-74 Evaluación de límites de emisión máxima anual de MP para fuentes con combustión establecidos en el PPA 145

Figura 3-75 Comparación emisión anual de MP de Termoeléctrica Guacolda respecto a emisión aprobada por RCA y operación a máxima capacidad 146

Figura 3-76 Evaluación de escenario propuesto de límites de emisión máxima anual de MP para fuentes con combustión 147

Figura 3-77 Grado de oxidación resultante en los lechos de pellets de los experimentos con gas entrante a 800°C y diferentes niveles de oxígeno 149

Figura 3-78 Evaluación de la norma anual de MP10 en el año 2035 164

Figura 4-1 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo CAP MPS 180

Figura 4-2 Serie temporal 2000-2010 de concentraciones mensuales de MPS por estación 182

Figura 4-3 Serie temporal 2011-2020 de concentraciones mensuales de MPS por estación 183

Figura 4-4 Serie temporal 2000-2010 de concentraciones mensuales de hierro en MPS por estación..... 184

Figura 4-5 Serie temporal 2011-2020 de concentraciones mensuales de hierro en MPS por estación..... 185

Figura 4-6 Cantidad de incumplimientos históricos del límite mensual de MPS, en el marco del D.S. N°4/1992..... 187

Figura 4-7 Cantidad de incumplimientos históricos del límite mensual de hierro en MPS, en el marco del D.S. N°4/1992..... 188

Figura 4-8 Evaluación norma mensual MPS, año 2016 189

Figura 4-9 Evaluación norma mensual MPS, año 2017 190

Figura 4-10 Evaluación norma mensual MPS, año 2018 190

Figura 4-11 Evaluación norma mensual MPS, año 2019 191

Figura 4-12 Evaluación norma mensual MPS, año 2020 191

Figura 4-13 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2016..... 192

Figura 4-14 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2017..... 193

Figura 4-15 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2018..... 193

Figura 4-16 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2019..... 194

Figura 4-17 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2020..... 194

Figura 4-18 Evaluación norma anual de MPS, periodo 2016-2020 196

Figura 4-19 Evaluación norma anual de hierro contenido en MPS, periodo 2016-2020 197

Figura 4-20 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°1 198

Figura 4-21 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°1 199

Figura 4-22 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°2 201

Figura 4-23 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°2 202

Figura 4-24 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°3 204

Figura 4-25 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°3 205

Figura 4-26 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°4 207

Figura 4-27 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°4 208

Figura 4-28 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°5 210

Figura 4-29 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°5 211

Figura 4-30 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°6 213

Figura 4-31 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°6 213

Figura 4-32 Comparación entre emisiones y concentraciones medias de MPS, periodo 2017-2020 216

Figura 4-33 Concentraciones mensuales medidas por la red de monitoreo de MPS de CAP para cada año entre 2016 y 2020 [mg/m²-día]..... 217

Figura 4-34 Valores límites de MPS [mg/m²-día] identificados a nivel internacional 222

Figura 4-35 Ubicación de monitores MPS1- MPS7 232

Figura 4-36 Ubicación de monitores MPS8-MPS9 233

Figura 4-37 Ubicación de Red de Monitoreo de CAP MPS 235

Figura 4-38 Ubicación de muestreadores MPS1-MPS15 del estudio 237

Figura 4-39 Concentración de Fe [mg/kg] en polvo depositado. 240

Figura 4-40 Gráfico de concentración anual de MPS para los años 2019, 2020 y 2021 243

Figura 4-41 Gráfico de concentración anual de hierro en MPS para los años 2019, 2020 y 2021 246

Figura 4-42 Frisbee Thechnique..... 263

Figura 4-43 Sticky Pad Technique 263

Figura 4-44 Corte transversal de estructura de contenedor y parabrisas..... 265

Figura 4-45 Metodologías de medición de polvo sedimentable 267

Figura 4-46 Evaluación norma mensual de MPS mediante el percentil 85 de las concentraciones de un año, periodo 2016-2020 275

Figura 7-1 Diagrama de Procesos de Guacolda 290

Figura 7-2 Diagrama proceso Planta de Pellets 292

Figura 7-3 Evaluación norma anual de MPS, promedio trianual periodo 2000-2020 299

Figura 7-4 Evaluación norma anual de hierro en MPS, promedio trianual periodo 2000-2020 300

Figura 7-5 Concentraciones promedio por periodo de hierro en MPS, para los años 2016-2020 [mg/m²-día]..... 301

Acrónimos y Abreviaturas

Abreviaturas

AGIES:	Análisis General del Impacto Económico y Social
CMP:	Compañía Minera del Pacífico
DIA:	Declaración de Impacto Ambiental
EIA:	Estudio de Impacto Ambiental
FE:	Factores de Emisión
FEC:	Factores Emisión-Concentración
Minagri:	Ministerio de Agricultura
MMA:	Ministerio del Medio Ambiente
MP:	Material Particulado
MPS:	Material Particulado Sedimentable
MP10:	Material particulado respirable
MP2,5:	Material particulado fino
PPA:	Plan de Prevención contaminación Atmosférica
PRAS:	Programa para la Recuperación Ambiental y Social
RFyP:	Registro de Fuentes y Procesos
RUEA:	Registro Único de Emisiones Atmosféricas
RETC:	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
SNIFA:	Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental
SINCA:	Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire

Prefijos

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

Unidades

m:	Metro (Longitud)
kg:	Kilogramo (Masa)
s:	Segundo (Tiempo)
°C:	Celsius (Temperatura)
m ² :	Metro cuadrado m ² (Superficie o área)
m ³ :	Metro cúbico (Volumen)

Formato

"," separador decimal

"." separador de miles

Resumen Ejecutivo

El presente informe corresponde a la entrega final del estudio que recopila antecedentes para la revisión del Plan de Prevención de Huasco y para la revisión de la norma de calidad del aire para Material Particulado Sedimentable en la cuenca del río Huasco. En línea con lo anterior, esta entrega presenta la actualización y proyección a 15 años del inventario de emisiones de MP10, MP2,5 y sus precursores, para las fuentes existentes, nuevas y futuras ampliaciones localizadas al interior de la zona latente definida por el D.S. N°40/2011 del MMA. Para lo anterior, en primer lugar, se identificaron las fuentes emisoras de los contaminantes en la zona a partir de una revisión la información disponible en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), recopilada en una base de datos.

Una vez identificadas las fuentes emisoras dentro de la zona de estudio, se realizó una estimación del inventario de emisiones para los cinco años comprendidos entre 2017 y 2021. En el caso de las grandes fuentes, los niveles de actividad fueron obtenidos a partir de fichas de información completadas por los titulares de las instalaciones. Las instalaciones que generan emisiones en la zona corresponden a la Planta de Pellets, Termoeléctrica Guacolda, Puerto Las Losas, Central Térmica Huasco y, por último, se consideró la línea férrea por la cual se transporta el preconcentrado de hierro desde la Mina Los Colorados.

En la Figura 0-1 se resumen los resultados, para los contaminantes principales, del inventario de emisiones desarrollado, en donde se presentan las emisiones anuales por instalación de los principales contaminantes estudiados. Se observa que la Planta de Pellets es la principal fuente de emisiones de material particulado, principalmente a través de las chimeneas de las líneas de peletización 2A y 2B, la erosión eólica y la carga y descarga de material. En 2021, debido a trabajos en la chimenea 2B que implicaron el cese de su operación, la erosión eólica se convirtió en la principal fuente de emisiones. En cuanto a Guacolda, las chimeneas de las unidades generadoras, así como el transporte por caminos sin pavimentar, son las principales fuentes de emisiones. En general, las emisiones totales disminuyen año tras año, en parte debido a la reducción de emisiones de las chimeneas operativas y la disminución de la actividad. Se puede notar que en 2019 hubo una marcada disminución de emisiones de material particulado, lo cual se debe a un accidente fatal que detuvo la producción en la Planta de Pellets durante varios meses.

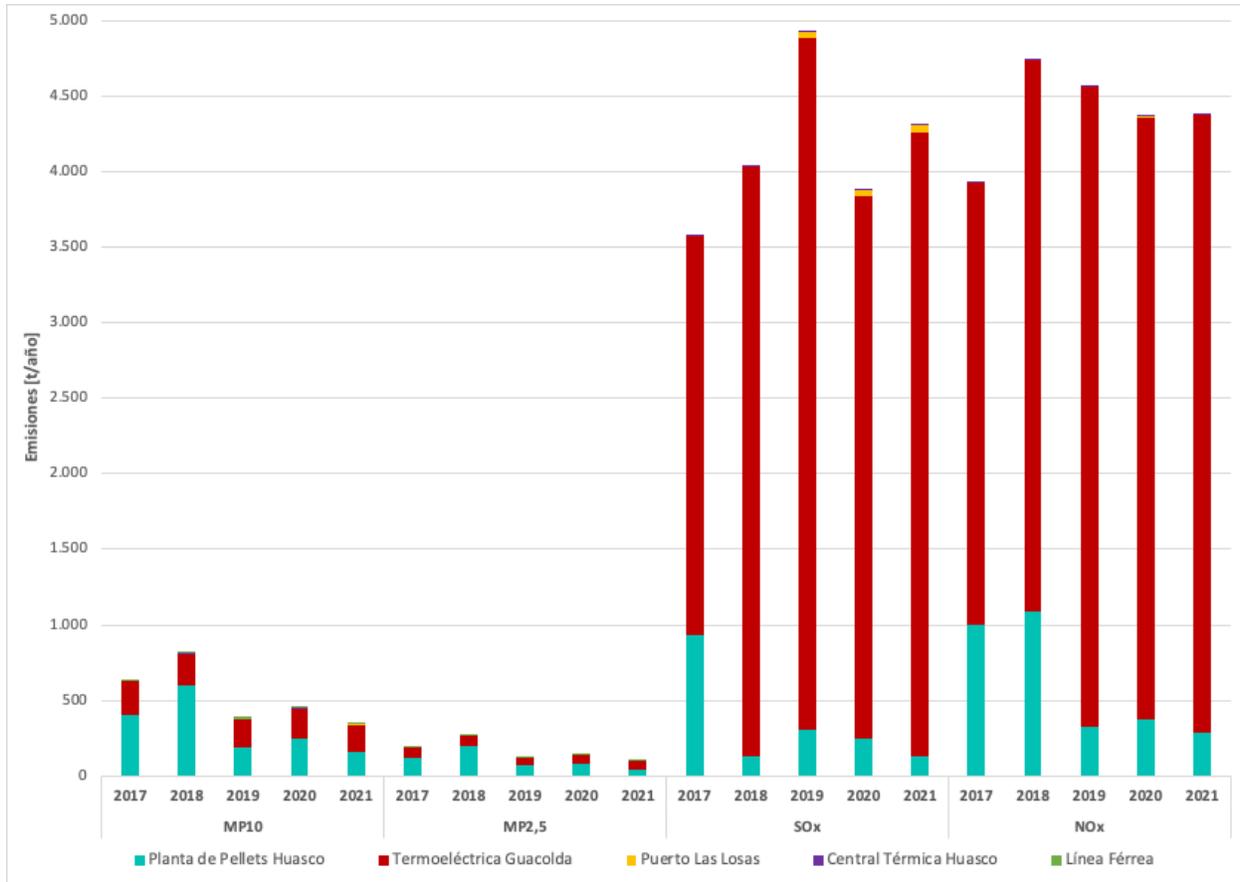


Figura 0-1 Emisiones anuales por contaminante e instalación [t/año]

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se evalúa la evolución histórica de la calidad del aire por MP10 y MP2,5 desde 2016. A partir de esto se pudo notar que, desde la aplicación del PPA de Huasco, la localidad de Huasco ha registrado concentraciones de MP10 menores a las que la llevaron a ser declarada zona latente en el 2011, lo que refleja una relación entre el instrumento y la reducción de las concentraciones.

A partir de las emisiones estimadas en la zona de Huasco, se desarrolló un modelo de dispersión de emisiones para evaluar el impacto de las emisiones totales sobre la calidad del aire por MP10 y MP2,5. Con estos antecedentes, complementados con una evaluación de cada una de las medidas incorporadas en el Plan de Prevención de Huasco, se proponen posibles modificaciones o precisiones a implementar en la actualización del Plan, como la disminución del límite de emisión máxima anual para fuentes con combustión establecido para la Planta de Pellets y Guacolda. En esta línea, se identifican, evalúan y proponen una serie de medidas de mitigación de emisiones de MP10, correspondientes a barreras de viento, filtros de manga, pavimentación, reducción catalítica selectiva y precipitador electroestático seco. Por criterio de costo-eficiencia, se seleccionan las medidas de pavimentación de los caminos de Huasco e internos de las

instalaciones, y la implementación de barreras de viento en canchas de acopio y zonas de carga y descarga de la Planta de Pellets.

Por otro lado, el informe presenta los resultados de la revisión de normativa internacional existente de MPS y de hierro u otros elementos contenidos en MPS, y su comparación con la normativa nacional vigente en la Cuenca del Río Huasco. Si bien la regulación ambiental de MPS es escasa a nivel internacional, se recopilaron algunas como la vigente en el estado de Espírito Santo en Brasil, la del estado de Nueva York y Montana en EEUU, la aplicada en la provincia de Buenos Aires de Argentina y en Suiza. Los límites máximos de MPS a nivel internacional son mayores al vigente en Huasco, a excepción del establecido para zonas rurales y de baja densidad poblacional en Nueva York.

Adicionalmente, se evaluaron distintos estudios de MPS realizados en la zona de Huasco, y estudios científicos sobre los efectos de este contaminante sobre los recursos naturales y potencial impacto en las personas. Esto último permitió identificar efectos negativos en plantas, biota acuática y agua subterránea, como la disminución de la tasa fotosintética en plantas y una disminución de su productividad. En cuanto a la biota acuática, el MPS genera impactos negativos en algunas especies animales acuáticas y consecuentemente, en los seres humanos que ingieran dichas especies. De hecho, se determinó que el consumo de tilapia en niños no es seguro, al presentar un factor de riesgo mayor a 1. Por último, en el caso del agua subterránea, se encontró evidencia de contaminación por Fe en las muestras tomadas. Algunos de los autores consultados concluyen que en la regulación del MPS es importante no solo considerar la vía de exposición atmosférica, sino que también la interacción de este contaminante con otros medios.

Finalmente, se hacen sugerencias de modificación al articulado de la norma de MPS vigente en la Cuenca del Río Huasco. La primera sugerencia consiste en la modificación de los estándares de muestreo, siguiendo los lineamientos contenidos en el documento Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter) – D1739-98 (ASTM, 2017) e incluirlos de forma explícita en el artículo de forma de asegurar que las mediciones sean precisas. La segunda consiste en eliminar las excepciones que aplican a la Planta de Pellets, que es la principal fuente de emisión de MPS en la Cuenca. En la tercera, se propone agregar un artículo que especifique las condiciones de superación de la norma a nivel anual y mensual para MPS y hierro en MPS. Por último, se recomienda aplicar la norma de MPS en el mismo polígono que se utiliza para la norma de MP10.

1. Antecedentes y justificación del estudio

La localidad de Huasco se ubica en la costa de la Región de Atacama en una pequeña bahía abierta al norte, ocupando la vertiente sur de la cuenca del río Huasco, en las coordenadas geográficas 28°27'30" S y 71°13'00" W. La comuna de Huasco forma, en conjunto con las comunas de Freirina, Vallenar y Alto del Carmen, la Provincia de Huasco.

La relevancia geográfica de Huasco está dada por ser la cabecera de la comuna homónima y se emplaza en el interior del subsistema transversal del valle de Huasco. Corresponde a la segunda ciudad en jerarquía, después de Vallenar, influenciando a nivel comunal e intercomunal como centro de servicios, puerto de embarque y balneario.

Huasco se conecta con la Ruta 5 Norte por la ruta Vallenar-Huasco o C-46, siendo de tránsito intenso el flujo entre estos puntos. Existe una red ferroviaria sin transporte de pasajeros y de uso exclusivo para el transporte de hierro de la mina Los Colorados y Huasco (puerto mecanizado).

El puerto de Huasco cuenta con dos terminales, correspondientes a Guacolda I y Guacolda II. Guacolda I recibe, desde el exterior, carbón para la termoeléctrica de Guacolda S.A., mientras que desde Guacolda II se exportan minerales provenientes de la planta de pellets de Compañía Minera del Pacífico (CMP).

La comuna de Huasco, según el censo del año 2017, tiene una población de 10.149 habitantes, donde un 51,7% son hombres y 48,3% son mujeres. El poblamiento histórico de la comuna se relaciona con actividades asociadas a su borde costero (pesca y actividades portuarias) y agricultura desarrollada a lo largo del valle Huasco. La densidad poblacional llega a 6,3 habitantes/km².

La localidad de Huasco fue declarada zona latente por norma anual de material particulado respirable (MP10)¹, en el D.S. N°40/2011 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (MMA, 2012a). La declaración de zona latente se basó en el análisis de los resultados de las mediciones de la red de monitoreo de MP10 perteneciente a la Empresa Eléctrica Guacolda que mide material particulado respirable (MP10), dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y parámetros meteorológicos.

El 30 de agosto del año 2017, se publicó en el Diario Oficial el D.S. N°38/2016 del MMA el cual contiene el Plan de Prevención de la contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante² (MMA, 2017a) (en adelante, PPA Huasco), en el cual se establece que, en el plazo de cinco años siguientes a su publicación en el diario oficial, se iniciará la actualización, con el propósito de evaluar y complementar, en lo que sea necesario, los instrumentos y medidas con respecto al objetivo del Plan.

¹ <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1040270%2FidParte%3D0>

² <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1107021>

Por otra parte, en diciembre del año 2017, se aprobó el Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Huasco³ (PRAS) del MMA (MMA, 2017c), cuyo objetivo es mejorar la calidad de vida de la población de las zonas ambientalmente vulnerables a través de la participación integral de diversos actores, en el cual se establecieron 16 objetivos y un conjunto de 67 medidas de solución. Cada una de las medidas fue plasmada en “Fichas”, dentro de las cuales aquellas asociadas al componente Aire (A) tienen como objetivo n°1 “Contar con una buena calidad del aire y un sistema de monitoreo y control que cumpla con estándares internacionales”. En específico, la Ficha A.1.6 plantea "Iniciar un proceso gradual de revisión y actualización de normas ambientales de calidad de aire"; esta considera dentro de sus actividades críticas para dar cumplimiento a la misma la recopilación de antecedentes y evaluación del Plan de Prevención de la contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante. A su vez, la Ficha A.2.2 señala "Evaluar el comportamiento histórico de la norma de calidad del aire para Material Particulado Sedimentable, D.S. N°4/1992 Ministerio de Agricultura (MINAGRI) (MINAGRI, 1992) y gestionar su inclusión en programa de regulación ambiental"; dentro de los hitos críticos para el cumplimiento de la mencionada se encuentra realizar un informe de calidad del aire respecto del cumplimiento del D.S. N°4/1992 del MINAGRI, en función de la norma anual y mensual del MPS y hierro contenido en el MPS.

En consideración a lo anteriormente expuesto, este estudio busca obtener un primer análisis de los 5 años de vigencia del Plan de Prevención de la contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante, un análisis y presentación de antecedentes para la revisión de la normativa vigente de Material Particulado Sedimentable contenida en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI, y además, establecer una relación entre la información recopilada y la operación de la Planta de Pellets de CMP.

1.1 Área de estudio

El área de estudio considera la zona geográfica que comprende a la localidad de Huasco y su zona circundante declarada como zona latente por material particulado respirable MP10 mediante el D.S. N°40/2011 del Ministerio del Medio Ambiente (ver Figura 1-1), en donde se localizan fuentes emisoras de material particulado y sus precursores. La Tabla 1-1 indica las coordenadas que delimitan la zona latente por MP10 para la localidad de Huasco y su zona circundante.

³ <https://pras.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/11/PRAS-Huasco.pdf>

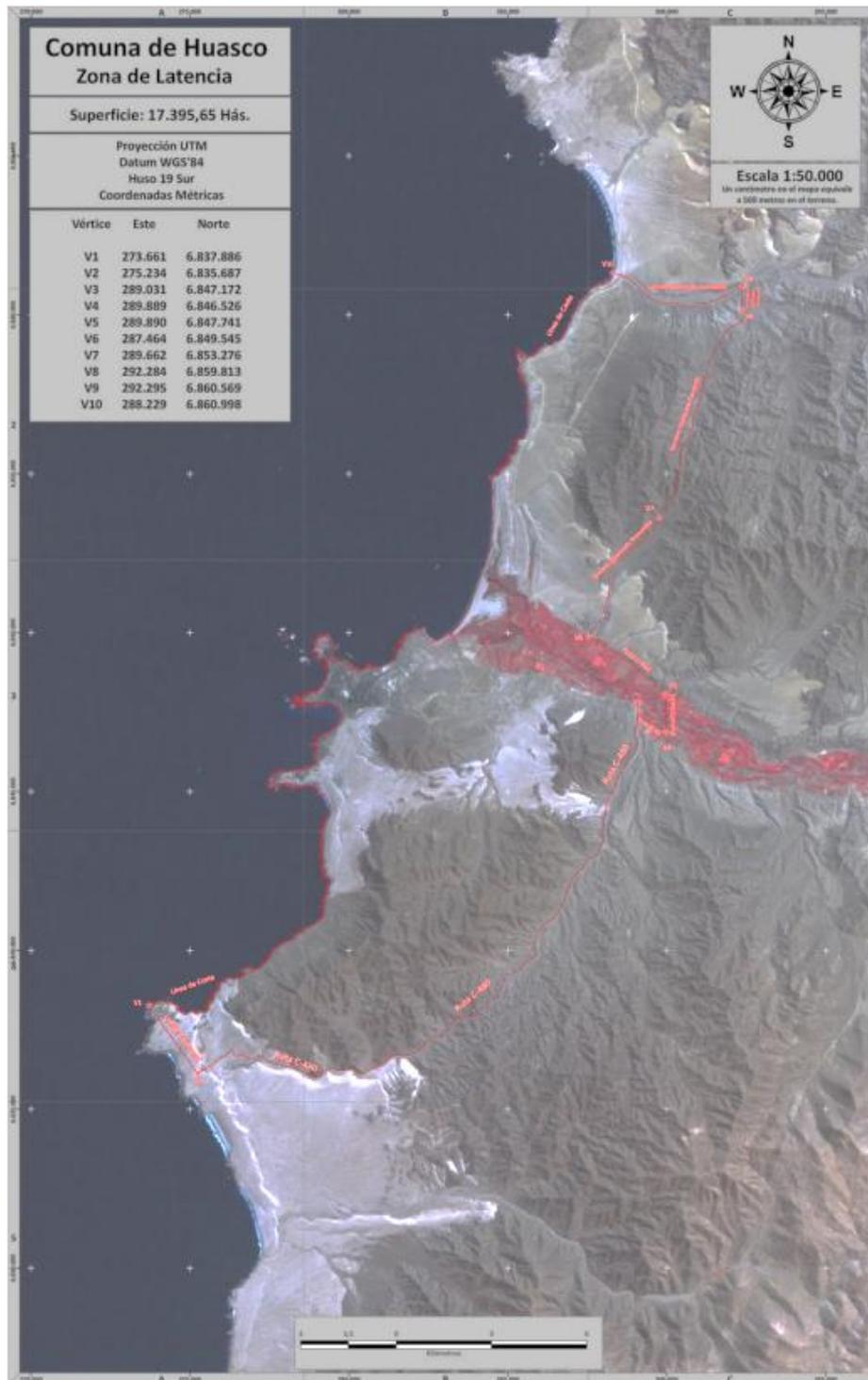


Figura 1-1 Polígono declarado como latente por MP10 como norma anual, Huasco y su zona circundante

Fuente: Expediente Electrónico Plan: Antecedentes previos al Plan de Prevención de la localidad de Huasco y su zona circundante

Tabla 1-1 Características de los puntos que delimitan la Zona Latente por MP10 para la localidad de Huasco y su zona circundante

N° Vértice	Coordenadas UTM WGS84 HUSO 19J		Descripción ubicación
	UTM-ESTE	UTM-NORTE	
1	273.661	6.837.886	Punta Alcalde
2	275.234	6.835.687	Intersección con la Ruta C-480
3	289.031	6.847.172	Intersección Ruta C-480 con la Ruta C-46
4	289.889	6.846.526	Intersección Ruta C-46 con límite comunal Este de Huasco
5	289.890	6.847.741	Intersección límite comunal Este de Huasco con la Ruta C-462
6	287.464	6.849.545	Intersección Ruta C-462 con el sendero "Quebrada Romualdo"
7	289.662	6.853.276	Intersección sendero "Quebrada Romualdo" hasta la intersección con el sendero "Quebrada Panulcillo"
8	292.284	6.859.276	Intersección sendero "Quebrada Panulcillo" y sendero "Quebrada El Romero"
9	292.295	6.860.569	Intersección sendero "Quebrada El Romero" y quebrada "Carrizalillo"
10	288.299	6.860.998	Intersección quebrada "Carrizalillo" y la línea de la costa

Fuente: Bases técnicas de la licitación

2. Objetivos del estudio

2.1 Objetivo general

El objetivo general del estudio es recomendar líneas de acción futuras, mediante la evaluación del impacto generado por la aplicación del Plan de Prevención en la evolución de la calidad del aire en Huasco, y la presentación de antecedentes para la revisión de la norma de calidad del aire por material particulado sedimentable (MPS).

2.2 Objetivos específicos

- 1) Generar antecedentes para la revisión del Plan de Prevención de la contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante.
- 2) Evaluar el comportamiento histórico de la concentración del Material Particulado Sedimentable, en función del D.S. N°4/1992 del MINAGRI y generar antecedentes para la revisión y/o actualización de la Norma de MPS.

2.3 Alcance de este informe

El presente informe contiene el desarrollo de todas las actividades asociadas al cumplimiento de del objetivo específico 1) y 2) (ver Sección 2.2), en los términos descritos en los numerales 3.1 y 3.2, de las Bases Técnicas. En la Tabla 2-1 se presenta un resumen con cada ítem en el que se da cumplimiento a los objetivos específicos del informe.

Tabla 2-1 Resumen cumplimiento de objetivos específicos

Producto	Actividad del objetivo específico	Ítem
Informe 1	1.a) Identificar las fuentes emisoras existentes, y potenciales nuevas fuentes y/o futuras ampliaciones de complejos industriales existentes en la zona.	Sección 3.2, 3.3, 3.4, 3.5
	2.a) Analizar el comportamiento histórico de la concentración del MPS contenida en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI.	Sección 4.1
Informe 2	1.b) Elaborar un inventario de emisiones actualizado y una proyección considerando un horizonte de evaluación de 15 años.	Sección 3.6
	1.c) Determinar el aporte de las distintas fuentes emisoras en la calidad del aire de la zona, para el contaminante MP10 y MP2,5.	Sección 3.7
	2.b) Analizar la regulación internacional existente para la calidad del aire por MPS.	Sección 4.2
Informe Final	1.d) Determinación del background	Sección 3.8
	1.e) Analizar y proponer para cada una de las medidas vigentes del Plan, oportunidades de mejoras o precisiones	Sección 3.9
	1.f) Estimar la reducción de emisiones de las medidas señaladas en los Planes de Control Integral de la Planta de Pellets CAP Minería y de la Central Termoeléctrica Guacolda S.A.	Sección 3.10
	1.g) Proponer un banco de medidas de compensación al cual puedan optar los proyectos que deban compensar sus emisiones de MP10, específico para la zona latente de Huasco	Sección 3.11
	2.c) Estimar el potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de MPS	Sección 4.3
	2.d) Generar antecedentes para la revisión y/o actualización de la Norma de MPS	Sección 4.4
	2.e) Elaborar escenario(s) de actualización de la norma existente	Sección 4.5

Fuente: Elaboración propia

3. Generación de antecedentes para la revisión del PPA Huasco – Identificación de fuentes emisoras

Se identificaron las fuentes emisoras al aire presentes en la zona declarada latente, y se identificaron potenciales nuevas fuentes y/o futuras ampliaciones de complejos industriales existentes. Para esto se desarrollaron las siguientes subactividades:

3.1 Reunión de inicio con la contraparte técnica

Para dar inicio al estudio, se realizó una reunión de inicio el 22 de noviembre de 2022 vía Microsoft Teams, cuyos participantes se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3-1 Participantes reunión de inicio

Participante	Equipo
Mónica Pavez	SEREMI Medio Ambiente, unidad de calidad del aire
Elizabeth Juárez	SEREMI Medio Ambiente, unidad de calidad del aire
Rocío Pino	SEREMI Medio Ambiente, encargada PRAS Huasco
Nicolás Trivelli	Depto. Economía Ambiental MMA
José Andaur	SAG región de Atacama
Roberto Martínez	Depto. Planes y Normas, División de Calidad del Aire MMA
Héctor Jorquera	Asesor experto de GreenLab Dictuc
Luis Cifuentes	Director de GreenLab Dictuc
Viviana Cerda Gho	Directora Ejecutiva de GreenLab Dictuc
Valentina Morandé	Ingeniero Senior de proyectos de GreenLab Dictuc
Rocío Herrera	Ingeniero de proyectos de GreenLab Dictuc

Fuente: Elaboración propia

Los temas tratados fueron las fechas propuestas para la primera visita a terreno, la zona propuesta para instalar los equipos de monitoreo de material particulado, información disponible y a solicitar, transporte para visitas en terreno, contenido de los productos a entregar y la coordinación de la consultoría. Se elaboró una minuta de la reunión sostenida, la que fue revisada y corregida por la contraparte para su versión definitiva.

3.2 Recopilación de antecedentes, e identificación y descripción fuentes emisoras existentes

La segunda subactividad realizada consistió en la recopilación de antecedentes para la identificación y descripción de las fuentes emisoras (a nivel de cada proceso emisor) existentes de MP10, MP2,5 y sus precursores, y sustancias tóxicas tales como Hg, Pb, As, V, Ni y otras relevantes, localizadas al interior de la zona latente, definida por el D.S. N°40/2011 del MMA, que declara zona latente por norma anual de MP10 a Huasco y su zona circundante.

En la identificación de las fuentes se consideraron como mínimo las identificadas en el estudio “Antecedentes para Elaborar el Plan de Prevención de la Localidad de Huasco” (GreenLabUC, 2014). Las fuentes identificadas en dicho estudio se resumen a continuación:

Tabla 3-2 Fuentes de emisión (MP, MP10, MP2,5, NOx, SOx, As, V, Hg, Ni, Pb, Cd) identificadas en la localidad de Huasco y su zona circundante

Categoría de Fuente	Tipo de Emisión	Responsable
Fuentes Fijas	Combustión	CAP
		Guacolda
		Punta Alcalde
		Central Huasco
	Fugitivas	CAP
		Guacolda
		Puerto Las Losas
		Punta Alcalde
Fuentes Móviles	Combustión	CAP
		Guacolda
		Otros
		Puerto Las Losas
		Punta Alcalde
		Central Huasco
	Fugitivas	CAP
		Guacolda
		Otros
		Puerto Las Losas
		Punta Alcalde
		Central Huasco

Fuente: Extracto de (GreenLabUC, 2014).

Lo anterior se complementó con un proceso de identificación que consistió en una búsqueda previa de información en las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) y los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) aprobados y disponibles en el SEIA de los proyectos de las principales fuentes emisoras en Huasco. Adicional a su identificación, se recabaron antecedentes respecto a los contaminantes emitidos por las fuentes, los niveles de actividad de cada proceso emisor, los sistemas de abatimiento de emisiones implementados y sus eficiencias, así como estimación en términos de calidad del aire. Estos antecedentes resultan relevantes para las siguientes etapas del estudio.

Posteriormente, se realizaron visitas a terreno a las principales fuentes emisoras de material particulado, correspondientes a la Central Termoeléctrica Guacolda y a la Planta de Pellets. Las

visitas permitieron comparar la información obtenida en terreno con la información revisada previamente, para así corroborar la identificación y ubicación de las fuentes. En Tabla 3-3 se presenta el itinerario que tuvo la visita.

Tabla 3-3 Itinerario de la primera visita a terreno

Fecha	Actividad
Lunes 19-12-2022	Visita a Guacolda
	Visita a Planta de Pellet CMP
Martes 20-12-2022	Visita a Carrizalillo, posible lugar de instalación de monitores para medición MP

Fuente: Elaboración propia

Para la visita de cada uno de los establecimientos se elaboró una minuta, adjuntas en el Anexo Digital, carpeta “Minutas” como archivos Word.

3.2.1 Central Termoeléctrica Guacolda

La Central Termoeléctrica Guacolda surge en 1992 y está compuesta por cinco unidades generadoras en base a carbón. Cada una de las unidades U1, U2, U3 y U4 cuenta con una potencia bruta ambientalmente aprobada de 154 MW, mientras que la unidad U5 cuenta con una autorización ambiental para producir 168 MW⁴. El complejo termoeléctrico está situado a 6 km al sudoeste de la ciudad de Huasco por la ruta C-468, en la región de Atacama. La Figura 3-1 muestra una imagen satelital de la localización de las cinco unidades generadoras junto con la cancha de acopio de la central.

El año 1995 comenzó a funcionar la primera unidad generadora, y al año siguiente la segunda. Tanto la Unidad 1 como la Unidad 2 cuentan con una caldera para la combustión de carbón, una turbina a vapor y un condensador de vapor; sin embargo, evacúan sus emisiones de gases a través de una chimenea en común. Posteriormente entró en funcionamiento las Unidad 3 y 4 a partir de 2009 y 2010 respectivamente, cada una con su propia chimenea de salida de gases. En el año 2015 comenzó a funcionar la Unidad 5, aprobada mediante RCA N° 44/2014, expansión que incluyó la instalación de equipamiento ambiental para adecuarse a la nueva Norma de Emisiones para Centrales Termoeléctricas establecida en el Decreto N°13/2011 del MMA.

⁴ DIA “Eliminación del Uso de Petcoke en Central Guacolda y Ajuste de la Capacidad de Energía Eléctrica”.



Figura 3-1 Ubicación de las unidades generadoras de Central Guacolda

Fuente: Subgerencia Medio Ambiente de Guacolda Energía S.A.

A continuación, se realiza la descripción del proceso de la Central Guacolda ilustrado en la Figura 7-1 (ver Anexo 7.1), utilizando como referencia el EIA del proyecto “Unidad 5 Central Térmica Guacolda S.A.”. El proceso inicia con el abastecimiento de combustible sólido, correspondiente a carbón o mezclas, a través de una correa transportadora proveniente del Puerto Guacolda hasta la instalación. Ya en la central, el carbón se almacena en la cancha de acopio, formando distintas pilas según el tipo de carbón. La cancha de carbón tiene una superficie irregular de 5 hectáreas, está perimetrada con una malla de 16 metros de altura y cuenta con 12 aspersores que funcionan 2 veces al día para evitar levantamiento de polvo, lo que se complementa con regadío mediante camiones aljibe. Desde la cancha el combustible es enviado mediante un sistema de correas transportadoras cubiertas a las distintas unidades generadoras.

Por otro lado, la caliza requerida en la operación de las unidades se transporta en camiones sellados desde yacimientos cercanos a Huasco y Vallenar a la central, para luego ser descargada

en un galpón techado de recepción de caliza. La caliza acopiada dentro de un silo será recuperada por medio de cargador frontal en una tolva y es enviada directamente al cuerpo de un mezclador de lechada de caliza, el cual es bombeado directamente al desulfurizador.

Abastecidas las unidades con carbón y caliza, operan a través de procesos similares. En particular, se describirá la operación de la Unidad 5, que es similar a la Unidad 3, pero considera un sistema SCR para mitigar emisiones de NOx. En primer lugar, el carbón o mezclas ingresan a la unidad a través de una correa transportadora desde la cancha de carbón hasta los silos adyacentes a la caldera. El combustible de los silos es descargado por gravedad a los pulverizadores, desde un alimentador neumático que lo envía hacia la caldera. El intercambio de calor producido por la combustión genera vapor de agua, y los gases producidos junto con las cenizas volantes son conducidos al sistema SCR de abatimiento de NOx y, a continuación, hacia el precipitador electrostático, en donde las cenizas son capturadas.

Posteriormente, los gases limpios de cenizas son conducidos hacia el desulfurizador que mitiga el SO₂ con caliza húmeda y, finalmente, a la chimenea que los descarga con velocidad hacia la atmósfera. El vapor generado alimenta una turbina de vapor, la cual transforma la energía calórica/cinética en energía eléctrica a través de un eje conectado a un generador eléctrico. Una vez que el vapor pasa por la turbina de vapor, es condensado en un condensador refrigerado con agua proveniente del mar, y luego el agua condensada es bombeada de regreso a la caldera.

Como se pudo notar en la descripción anterior, cada una de las unidades contempla tecnologías para el control de emisiones, presentadas en la Tabla 3-4 junto con sus eficiencias de abatimientos y fechas de entrada en operación, y dispuestas como se muestra en la Figura 3-2. Adicional a los equipos presentados, las unidades 3, 4 y 5 cuentan con quemadores de tipo Low NOx, cuya eficiencia de abatimiento de emisiones de NOx es aproximadamente del 30%.

De los procesos llevados a cabo en la central se obtienen aproximadamente 1.000 toneladas diarias de subproductos, correspondientes a ceniza, escoria, yeso y otros residuos. Estos son transportados mediante camiones por un camino pavimentado⁵ hasta el depósito, donde se descargan, se disponen en capas y se compactan, formando estratos horizontales que luego son sellados con una capa final de suelo natural para evitar la erosión. El área del depósito es de 80 hectáreas, de las cuales actualmente se utilizan 12.

⁵ Cabe destacar que este camino fue pavimentado en el año 2022, en cumplimiento con el Plan de Control Integral de la Termoeléctrica Guacolda.

Tabla 3-4 Sistemas de control de emisiones atmosféricas de la Central Termoeléctrica Guacolda

Unidad de generación	Contaminante	Equipo de abatimiento	Eficiencia [%]	Fecha de puesta en servicio [D/M/A]
Unidad 1	MP	Filtro de mangas	99,85	29-10-2015
	NO _x	Reducción catalítica selectiva	89,91	04-08-2015
	SO _x	Desulfurizador seco	91	10-12-2015
Unidad 2	MP	Filtro de mangas	99,85	08-12-2015
	SO _x	Desulfurizador seco	91	26-02-2016
Unidad 3	MP	Precipitador electrostático	99,85	03-08-2009
	SO _x	Desulfurizador húmedo	90,5	03-08-2009
Unidad 4	MP	Filtro de mangas	99,85	03-03-2016
	NO _x	Reducción catalítica selectiva	83	31-03-2013
	SO _x	Desulfurizador seco	87,5	26-02-2016
Unidad 5	MP	Precipitador electrostático	99,85	15-12-2015
	NO _x	Reducción catalítica selectiva	83,3	15-12-2015
	SO _x	Desulfurizador húmedo	90,5	14-09-2015

Fuente: Elaboración propia

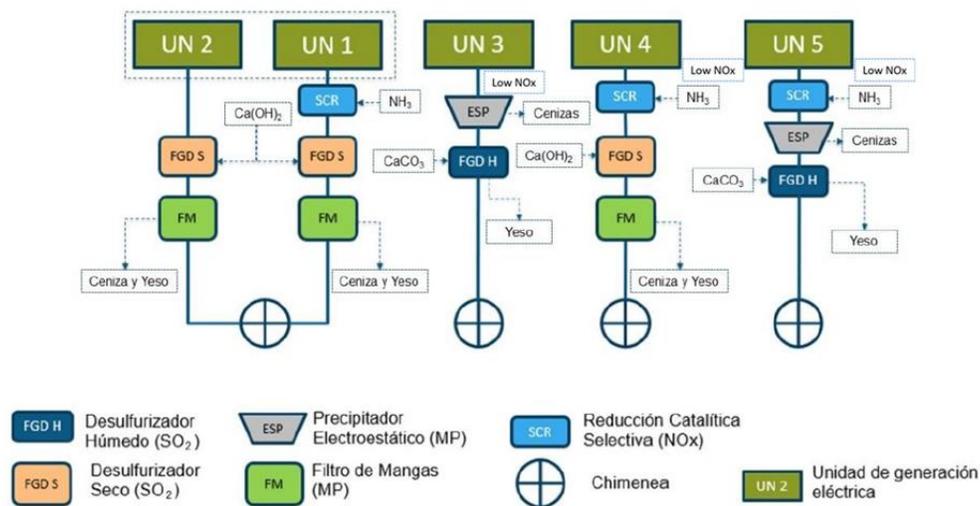


Figura 3-2 Diagrama de los sistemas de abatimiento de las unidades generadoras de la Central Guacolda

Fuente: Subgerencia Medio Ambiente de Guacolda Energía S.A.

Adicionalmente, mediante la RCA N° 84/2018 se aprobó la construcción de una planta desalinizadora al interior de la central para la producción de agua desalinizada de calidad industrial, etapa que aún no ha iniciado. La instalación capturará, por medio de tuberías de conducción, agua de enfriamiento desde el pozo de sello del circuito de refrigeración de la Unidad 5. Posterior al proceso de ósmosis inversa y remineralización, el agua desalinizada será conducida por tuberías de distribución para ser puesta a disposición de terceros, mientras que el agua de rechazo de la desalinización será conducida por tuberías de descarga al pozo de sello de la Unidad 5, para su posterior descarga al medio marino. La planta estará ubicada al interior de la central,

a unos 50 km al poniente de la ciudad de Vallenar y unos 200 km al sur de la ciudad de Copiapó, como se muestra en la Figura 3-3. La fase de operación del proyecto considera dos etapas con una duración de 12 meses cada una: La Fase I considera una producción de la planta de 800 l/s, y la Fase II incrementará la producción a 1400 l/s.



Figura 3-3 Ubicación del proyecto Planta Desalinizadora Guacolda

Fuente: Descripción de proyecto, DIA “Planta Desalinizadora Guacolda”

3.2.2 Planta de Pellets

La Planta de Pellets es una instalación minero-industrial perteneciente a la Compañía Minera del Pacífico (CMP) de CAP Minería. Esta planta inició su operación en el año 1978 y se ubica a 5 km al sudoeste del puerto de Huasco. El objetivo de esta planta es la producción de aglomerados de minerales de hierro en forma de esferas de 9 a 16 mm de diámetro, denominadas pellets. Adicionalmente, se produce concentrado magnético de alta ley, denominado pellet feed, y un subproducto de la peletización, denominado pellet chips.

A continuación, se realiza la descripción del proceso de la Planta de Pellets ilustrado en la Figura 7-2 (ver Anexo 7.2), utilizando como referencia el EIA “Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets”, aprobado mediante la RCA N° 215/2010, y la DIA del proyecto “Sistema de Control de Emisiones Planta de Pellets de Huasco”, aprobado ambientalmente mediante la RCA N° 104/2018. En la Figura 3-4 se muestra un diagrama que resume el proceso productivo de la planta y que será detallado a continuación, mientras que en la Figura 3-5 se observa la ubicación de todas las áreas donde se llevan a cabo los distintos procesos.

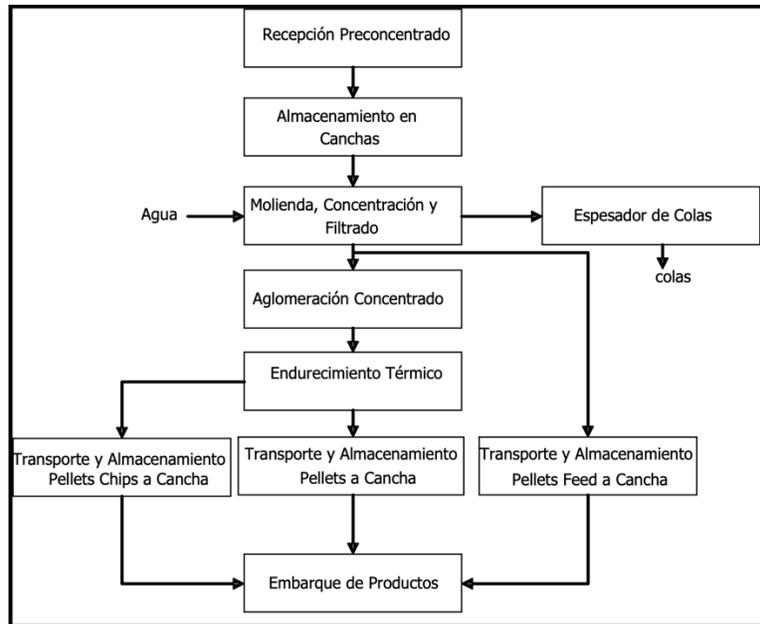


Figura 3-4 Diagrama de procesos en Planta de Pellets

Fuente: Descripción de Proyecto, EIA “Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets”

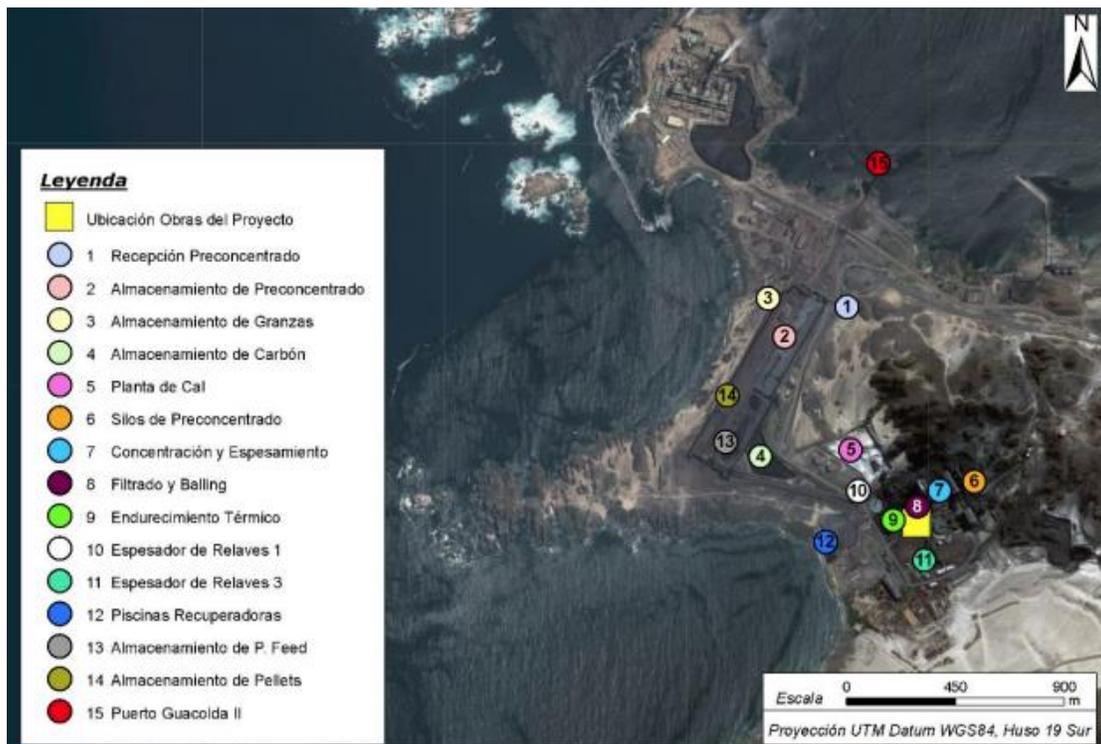


Figura 3-5 Ubicación Áreas Planta de Pellets

Fuente: DIA “Sistema de Control de Emisiones Planta de Pellets de Huasco”

El proceso productivo se inicia con el transporte del preconcentrado magnético de hierro por el ferrocarril desde la mina Los Colorados, ubicada en la ciudad de Vallenar, hasta la estación de descarga en la Planta de Pellets, donde se transfiere a buzones de traspaso. El transporte se realiza con una frecuencia media de 12 viajes por día, considerando que cada viaje es realizado por un tren que incluye una locomotora y entre 35 a 40 tolvas, correspondientes a los vagones, de 60 toneladas cada una⁶. El preconcentrado se almacena en pilas en el sector de canchas, o bien se deriva al sistema de alimentación de silos de preconcentrado, utilizando para ello alimentadores vibratorios, un sistema de correas transportadoras y un apilador viajero. Para controlar las emisiones de MP generadas por el transporte ferroviario, se han implementado las siguientes medidas: Cierre superior de las cúpulas de todos los vagones; automatización del sistema de limpieza y lavado de vagones vacíos en la Planta de Pellets, el cual se inicia apenas se detecta movimiento en el vagón e incluye el retiro del preconcentrado que sedimenta para depositarlo en un estanque acumulador; y un sistema de soplado de vagones en la mina Los Colorados.

La cancha de almacenamiento de preconcentrado tiene una capacidad de 500.000 toneladas vivas. En esta, mediante cargadores frontales que alimentan la correa transportadora, se alimentan los silos de preconcentrado. Adicionalmente, en estas canchas se almacenan minerales de hierro que no ingresan al proceso, y son embarcados a través de las instalaciones del Puerto Guacolda II. Desde los silos, el material se alimenta a cada una de las 4 líneas de molienda, clasificación y concentración, compuestas por molinos de bolas, estanque hidroseparador, baterías magnéticas y estanque espesador. En la alimentación a los molinos, se mezcla el preconcentrado seco con la carga circulante y se agrega agua, de tal forma de mantener el porcentaje de sólidos en la pulpa constante.

La descarga del molino alimenta, a través de bombas centrífugas, la etapa de clasificación que se realiza mediante hidrociclones donde se produce la separación de las partículas según tamaño. Las partículas finas pasan a la etapa de concentración, mientras que las partículas gruesas son retornadas al molino, como carga circulante hasta alcanzar la disminución de tamaño esperada. La etapa de concentración se inicia con la alimentación de la pulpa a hidroseparadores, donde por sobreflujo se produce la eliminación de colas, constituidas por arcillas y sílices. El bajo flujo o producto útil de los hidroseparadores se alimenta a la etapa de concentración magnética, donde aprovechando las propiedades magnéticas del mineral de hierro (magnetita) se concentra, separando además las impurezas. Los concentrados obtenidos en esta etapa son enviados por gravedad a un sumidero. Las colas de los hidroseparadores junto con las colas de los concentradores magnéticos se alimentan por gravedad hasta el estanque espesador de colas, donde se recupera agua. Las colas son enviadas al emisario submarino para la disposición final de relaves.

⁶ Consulta de Pertinencia “Ajuste Operacional del Transporte Ferroviario entre Mina Los Colorados y Planta de Pellets”. <https://pertinencia.sea.gob.cl/api/public/expediente/PERTI-2021-13634>

La Planta de Pellets también cuenta una planta de flotación neumática cuyo objetivo es aumentar la concentración de hierro, eliminando impurezas (sílice y arcilla). El producto de esta etapa es bombeado a la concentración magnética secundaria y, desde ahí, el concentrado final es bombeado al área de filtrado. Los relaves del proceso son colectados por medio de canaletas y conducidos a un sumidero, desde donde son bombeados a la etapa de concentración magnética o directamente al estanque espesador de colas. El concentrado proveniente de la etapa de concentración magnética, mediante bombeo, es alimentado hacia la caja de distribución de los filtros y, desde este punto, se direcciona por gravedad a las bateas de los filtros. La filtración se realiza mediante filtros de discos, reteniendo un sólido con bajo porcentaje de humedad o “queque filtrado”, el cual se desprende del disco mediante soplado con aire comprimido. Al final de esta etapa, es posible realizar la separación entre los dos productos de la planta: pellet o pellet feed.

La producción de pellet feed se logra desviando el “queque filtrado” mediante correa transportadora hacia la pila de finos magnéticos, donde es temporalmente acopiado. Esta pila es recuperada utilizando un cargador frontal y el pellet feed es transportado en camiones hacia el sector de canchas, donde es almacenado hasta el embarque.

Por otra parte, para obtener pellet, el producto final de la etapa de filtrado es conducido hacia el área de Balling⁷ mediante correas transportadoras, alimentando 6 buzones de concentrado. En esta área se mezcla el concentrado con cal hidratada y caliza, la cual es dirigida hacia los discos peletizadores, donde se elaboran aglomerados de mineral de hierro en forma de bolas, denominados “pellets verdes”, que posteriormente son clasificados mediante harneros de rodillo. Aquellos pellets verdes que se encuentran en el rango de tamaño 9 a 16 mm son seleccionados para su endurecimiento mediante proceso térmico. Los pellets verdes fuera de especificación son retornados mediante correa hacia los buzones de concentrado, previo rompimiento y desaglomerado.

Los pellets verdes clasificados dentro del rango de tamaño apropiado (9 a 16 mm) son conducidos a un alimentador de rodillos, donde se recuperan minerales finos, previo al ingreso al horno. Luego pasa a la etapa de endurecimiento térmico y oxidación, la que está conformada por horno de parrillas, horno rotatorio, enfriador anular y, finalmente, un enfriador recto. En la etapa de endurecimiento térmico se considera la exposición progresiva de los pellets verdes a flujo de gases a elevadas temperaturas para conseguir su endurecimiento y oxidación, modificando con ellos su estructura molecular de magnetita a hematita.

El horno de parrillas está dividido en tres zonas: La primera corresponde a una zona de secado ascendente (denominada zona UDD, por sus siglas en inglés “up draught drying”) donde circulan gases a 260°C provenientes del área de precalentamiento, con el objetivo de iniciar el proceso de secado de los pellets verdes. Los gases y MP provenientes de esta zona son conducidos a

⁷ El nombre de esta área hace referencia a “creación de la bola”, ya que en ella se produce el pellet en forma de bolas.

equipos de abatimiento evacuados por la Chimenea 2A. La segunda zona es de secado descendente (denominada zona DDD, por sus siglas en inglés “down draught drying”), donde circulan gases a 340°C provenientes del enfriador anular, y que pasan a través de la cama de pellets secándolos completamente. Asociada a esta zona se encuentra la Chimenea 2B existente. La tercera zona es de precalentamiento, y está compuesta por dos etapas: En la primera circulan gases a 830 °C provenientes del enfriador anular, para iniciar el proceso de oxidación de los pellets que transforma el mineral de hierro concentrado (magnetita, Fe_3O_4) en hematita (Fe_2O_3) que es la forma más oxidada de la magnetita. La segunda etapa de precalentamiento recibe gases a 1.100 °C provenientes del horno rotatorio, los que pasan a través de la cama de pellets endureciéndolos lo suficiente para resistir el rompimiento y la abrasión cuando estos pasen a través del horno rotatorio.

El horno rotatorio tiene un largo de 50 metros, un diámetro interno de 6,7 metros y una inclinación de 5%, de manera que los pellets avancen por el horno hasta ser descargados en el enfriador anular. La temperatura alcanzada en el horno es de 1.330 °C, la cual se obtiene, por un lado, utilizando carbón como combustible de alta calidad y, por otro lado, la energía entregada por el proceso exotérmico (oxidación de magnetita a hematita). El carbón utilizado en el proceso es molido previamente en un molino de rodillos a un tamaño de partícula de 80% menor a 200 mallas. El tratamiento de los pellets a través del horno rotatorio permite lograr las propiedades de dureza suficiente para reducir al máximo el rompimiento y la abrasión de los mismos, durante los siguientes procesos de apilamiento, embarque y transporte del mineral de hierro.

Los pellets son descargados en el enfriador anular, donde existen dos ventiladores que inyectan aire del ambiente, el que pasa a través de la cama de pellets enfriándolos a una temperatura entre 60 y 80°C. Los gases calientes que se generan son reincorporados al proceso de endurecimiento térmico en el horno de parrillas, de manera de aprovechar su energía calórica. De este proceso se obtienen esferas de concentrado de hematita, denominadas pellets, los que son transportados y almacenados en una cancha de almacenamiento para su posterior embarque mediante correas transportadoras hacia el puerto Guacolda II. Los pellets de bajo tamaño o fracturados son enviados a otra cancha de embarque, mientras que el material fino es clasificado y enviado a un molino de remolienda, de bolas. En la Figura 3-6 se aprecia la ubicación de los sectores de almacenamiento de los diversos productos mencionados precedentemente.

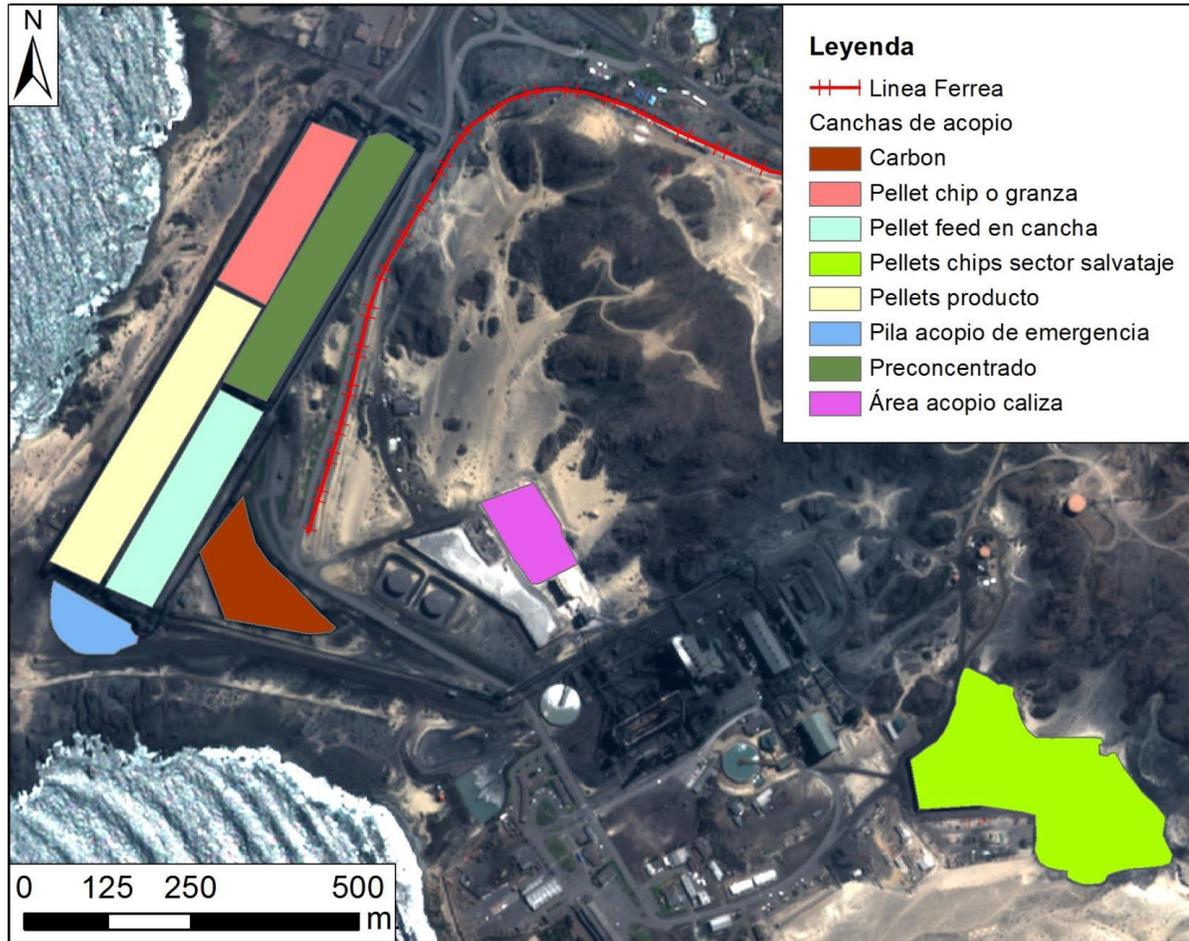


Figura 3-6 Ubicación canchas de Acopio, CMP

Fuente: Expediente Elaboración Plan de Prevención de Huasco, MMA

Las emisiones que se generan en la Planta de Pellets provienen, principalmente, de las canchas de acopio de insumos y producto debido a la erosión eólica y al movimiento de mineral, como también de los procesos con combustión que se evacúan por las chimeneas asociadas al proceso de endureciendo térmico. Respecto a las emisiones que se generan en los procesos sin combustión, estas provienen de las canchas de acopio de preconcentrado y sinter feed. En estas existen 10 aspersores en total, con un ángulo variable que puede oscilar entre los 15° y los 360 °, y están ubicados a un costado de la cancha, como se muestra en la Figura 3-7.

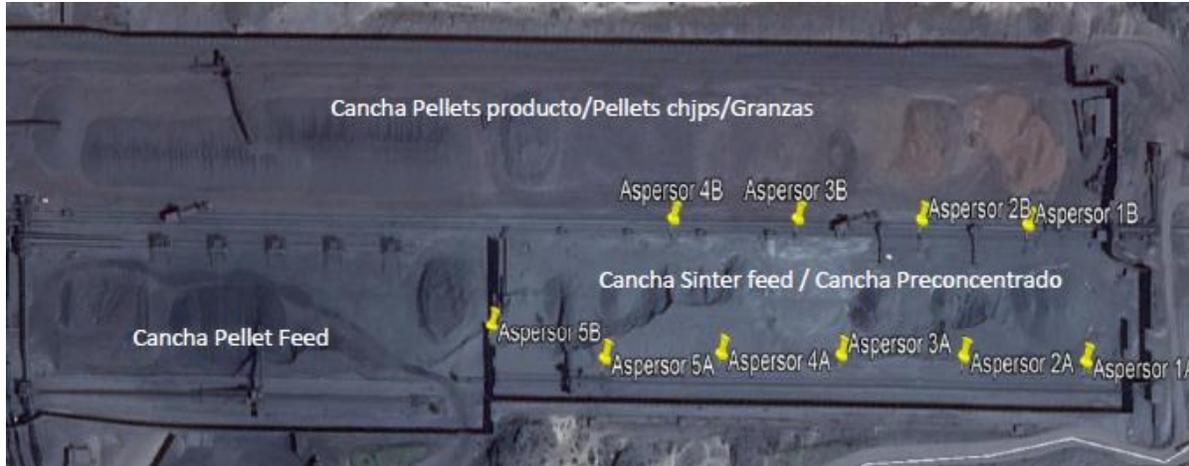


Figura 3-7 Ubicación aspersores en cancha de acopio principal

Fuente: Plan de Control Integral Planta de Pellets

Por otro lado, las emisiones que se generan en los procesos con combustión se evacuan por las Chimeneas 2A y 2B. La Chimenea 2A cuenta con un sistema de abatimiento y colecta, y evacúa el flujo de los gases y MP procedentes de la zona de secado ascendente (zona UDD), de la etapa de endurecimiento térmico. Este flujo es tratado previo a su emisión mediante un precipitador electrostático que remueve el MP, y un desulfurizador húmedo que remueve el SO₂, los cuales están instalados y operando desde el año 2014.

La Chimenea 2B también cuenta con un sistema de abatimiento y colecta, y evacúa el flujo de los gases procedentes de la zona de secado descendente (zona DDD), de la etapa de endurecimiento térmico. Este flujo es tratado previo a su emisión, mediante un precipitador electrostático para remover el MP, y en menor cuantía el SO₂ mediante un desulfurizador húmedo. La instalación de estos equipos de abatimiento fue aprobada por la RCA N°104/2018 y su operación se inició en noviembre del 2021. Respecto a las reducciones del NO_x, el sistema de abatimiento SNCR, aprobado por la RCA N° 104/2018, está instalado directamente en la fuente generadora (en la zona de pre-calentamiento del horno de parrilla), por lo que este abatimiento se ve reflejado en ambas chimeneas. Los sistemas de abatimiento de las chimeneas 2A y 2B se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3-5 Sistemas de abatimiento en procesos con combustión de la Planta de Pellets

Chimenea	Contaminante	Equipo de abatimiento	Eficiencia [%]
2A	MP	Precipitador electrostático	98,5
	SO ₂	Desulfurizador húmedo	77,0
	NO _x	Reducción selectiva no catalítica	46,8
2B	MP	Precipitador electrostático	98,5
	SO ₂	Desulfurizador húmedo	87,0
	NO _x	Reducción selectiva no catalítica	46,8

Fuente: Elaboración propia

Adicional al proceso productivo existente en la planta, mediante la RCA N°215/2010 fue aprobada la construcción de una segunda línea de peletización durante la Fase II del proyecto, cuyas emisiones atmosféricas serían evacuadas por una nueva chimenea. Esta línea incluye la instalación de un horno de parrilla, un horno rotatorio y, para el control de sus emisiones, en la DIA del proyecto se establece que se considerará un precipitador electrostático y un scrubber. Además, se debe considerar un sistema de transporte de aditivos desde planta de cal actual a nueva línea.

Respecto a la situación actual, la segunda línea de peletización modificaría la recepción, almacenamiento y preparación de caliza. La caliza será transportada en camiones a la planta, donde será depositada en tolvas de recepción y almacenamiento. Posteriormente, será movilizadora a una planta de molienda seca mediante correa transportadora, desde donde se transportará a silos de almacenamiento. Adicionalmente, será necesario aumentar la producción de cal hidratada en la planta hidratadora ya existente.

En términos generales, el proceso que se llevará a cabo en la nueva línea de peletización inicia con el ingreso de concentrado de hierro, caliza y cal hidratada gracias al sistema de mezclado. La mezcla será conducida al área de Balling de la nueva línea donde se formarán los pellets verdes. Luego, estos pellets serán clasificados por tamaño, donde aquellos que se encuentren fuera del rango de los 9 a 16 mm de diámetro serán chancados y recirculados al proceso. Los que cumplen con el rango serán conducidos mediante correas transportadoras para ser sometidos al endurecimiento térmico, proceso que considera, en primer lugar, el secado de pellets en el horno de parrillas. A continuación, los pellets serán precalentados y se producirá la oxidación de la magnetita, logrando la resistencia adecuada para el posterior quemado en el horno rotatorio. Luego de quemados, los pellets serán sometidos a enfriamiento hasta bajo los 150°C. El material descargado desde el enfriador anular será enviado a la estación de harneo para su separación en los productos que, posteriormente, serán transportados a las canchas de almacenamiento.

Cabe destacar que en la DIA “Sistema de Control de Emisiones Planta de Pellets de Huasco” aprobada mediante la RCA N°104/2018 se indica que, en caso de ejecutarse la Fase II, la nueva fuente de emisiones atmosféricas, evacuadas por la Chimenea 3, contará con los sistemas de abatimiento requeridos para dar cumplimiento con la normativa ambiental. La definición de los equipos y su eficiencia se establecerá en el proceso de desarrollo de ingeniería de dicho proyecto, antecedentes que serán presentados a evaluación ambiental, tal como se comprometió en el proceso de evaluación ambiental de la DIA mencionada precedentemente.

Por otro lado, mediante la RCA N° 158/2021 se aprobó la modificación de la forma de disposición de los relaves de la planta, por lo que actualmente se encuentra en construcción un depósito de relaves filtrados en tierra que será incorporado como fuente futura en el inventario de emisiones, posee una vida útil total de 11 años, una fase de operación estimada en 8 años, y su ubicación se muestra en la Figura 3-8, al sur de la Planta de Pellets. Este proyecto forma parte de las obligaciones derivadas de un Programa de Cumplimiento (PdC), aprobado a raíz de la formulación de cargos que la SMA formuló a CAP Minería por medio de la Resolución Exenta N°1/Rol D-002-

2018, en la cual uno de los cargos aludía directamente a la descarga de relaves producidos por el proceso productivo de Planta de Pellets de Huasco⁸. En virtud de lo anterior, se iniciará la deposición de relave en el depósito de relaves filtrados en septiembre de 2023.

El depósito considera una capacidad de almacenamiento de 14,6 millones de toneladas de relave, y contempla la construcción de una planta de filtrado y una correa transportadora mediante la cual se transportará el relave filtrado hasta una estación de transferencia. En este punto se considera un acopio de emergencia para el almacenamiento transitorio del relave en caso de fallas del sistema de transporte en correas. Posteriormente, el relave será cargado en camiones y transportado por un camino no pavimentado, tratado con supresor de polvo, hasta el depósito, donde se descargará y será extendido en capas mediante maquinaria. Las capas serán compactadas y regadas con una solución supresora de polvo para reducir las emisiones que serán generadas. El depósito será apilado en 5 terrazas sucesivas de 10 metros cada una, y al finalizarlas se aplicará una cobertura de material granular, permitiendo el cierre progresivo del depósito hasta la cobertura vegetal final. El material granular será transportado en camiones encarpados desde la planta hasta el depósito. Las emisiones por erosión eólica sobre la superficie del depósito no se consideran debido a que el relave compactado no presentará pérdida de material, según pruebas realizadas con condiciones extremas de vientos.

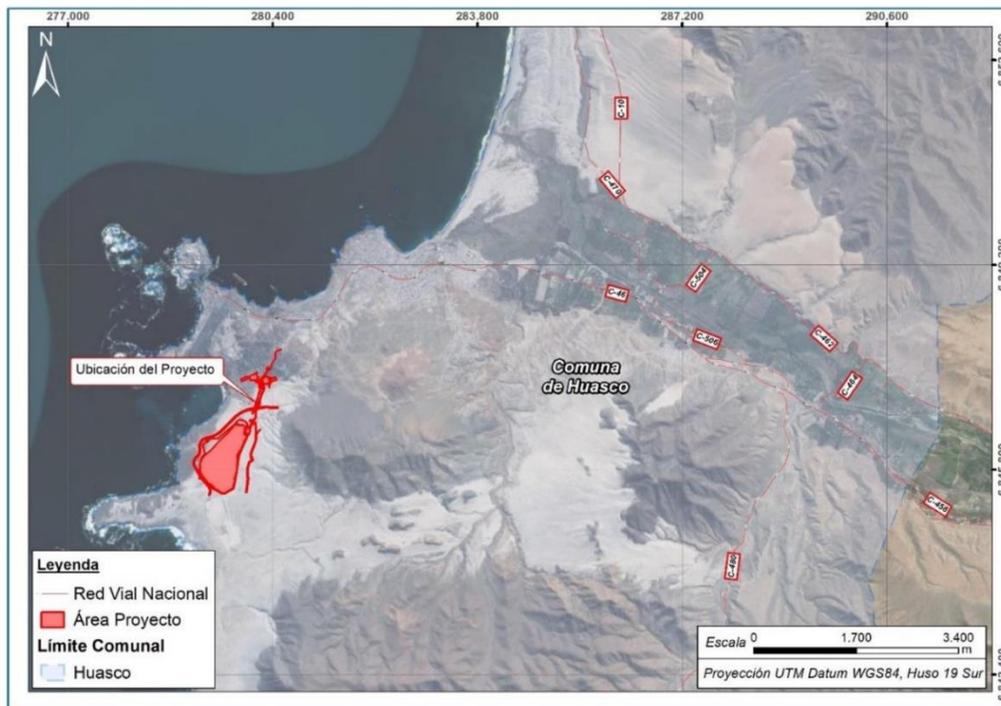


Figura 3-8 Ubicación del proyecto Depósito de Relaves Filtrados

Fuente: Descripción de proyecto, EIA “Deposito de Relaves Filtrados Planta de Pellets”

⁸ EIA “Deposito de Relaves Filtrados Planta de Pellets”.

https://seia.sea.gob.cl/archivos/2020/01/07/Capitulo_1_Descripcion_de_Proyecto.pdf

3.2.3 Central Térmica Huasco

Adicional a las fuentes anteriores, en la zona se encuentra la Central Térmica Huasco perteneciente a la empresa Enel Generación Chile S.A., ubicada en el Puerto Guacolda, aproximadamente a 2,8 km de la ciudad de Huasco. Esta planta se compone de dos centrales: Huasco Vapor y Huasco TG. La primera posee dos unidades generadoras a vapor, cada una con una capacidad instalada de 8 MW, sin embargo, tal como se muestra en la Tabla 3-6, no ha presentado un funcionamiento relevante desde 2006 y actualmente no es reportada por el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), por lo que no se considera en el inventario. La segunda central utiliza petróleo diésel como combustible, consta de tres turbogeneradores (TG3, TG4 y TG5) con una capacidad de 21,41 MW cada uno y sus emisiones son liberadas por chimeneas independientes, sin sistemas de abatimiento asociados a este proceso, como se muestra en la Figura 3-9. Adicional a lo anterior, en la central se generan emisiones debido al tránsito de camiones pesados y camionetas por caminos no pavimentados, en donde no se aplican medidas de abatimiento. Las unidades entraron en operación entre 1976 y 1997 por lo que, dada su antigüedad, su funcionamiento no ha sido sometido al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Tabla 3-6 Generación Bruta de centrales Huasco TG y Huasco Vapor

Año	Generación (MWh)	
	Huasco TG	Huasco TV
2004	29.045	4.106
2005	57.248	11.136
2006	33.101	0
2007	184.625	0
2008	160.840	0
2009	24.127	0
2010	1.069	0
2011	1.062	0
2012	197	23
2013	30	0
2014	486	0

Fuente: CEN

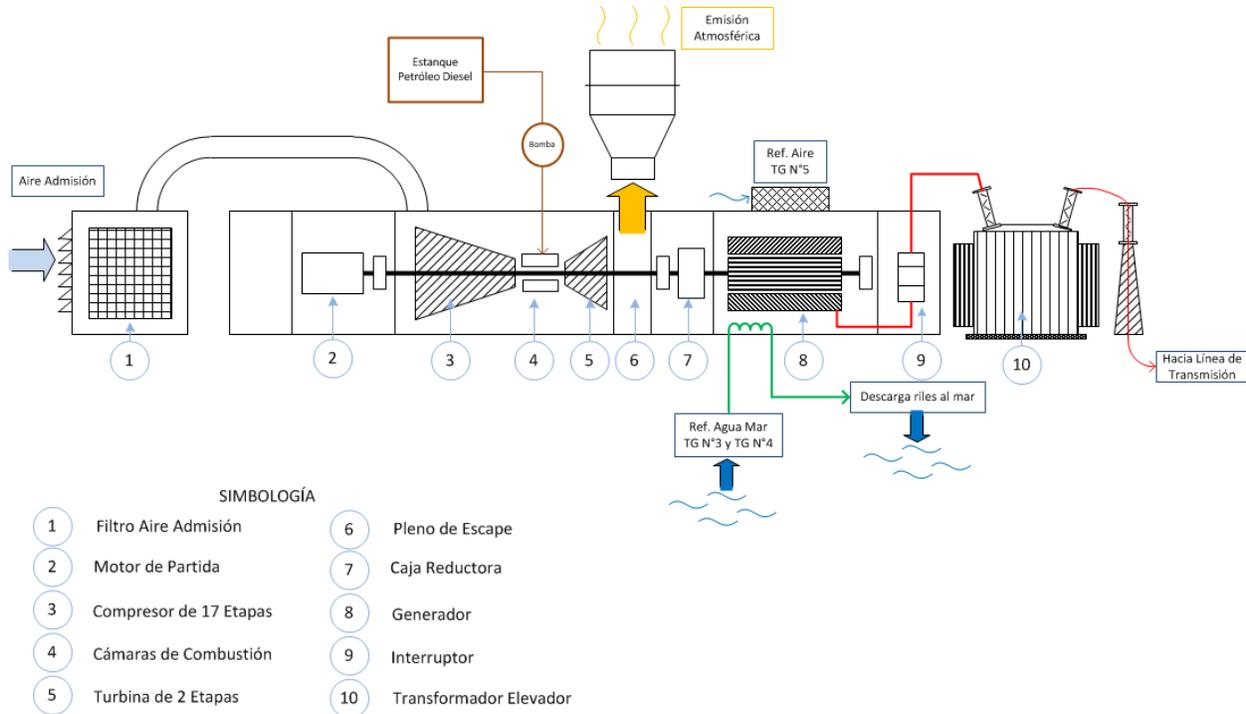


Figura 3-9 Diagrama proceso generación eléctrica de Central Huasco

Fuente: Enel Generación Chile S.A

Es importante mencionar que la generación bruta de la Central Huasco TG es, en promedio, 200 MWh anual, considerando la información histórica desde 2016 obtenida del CEN. Debido a su bajo nivel de generación histórica, el estudio “Antecedentes para elaborar el Plan de Prevención de la localidad de Huasco” (GreenLabUC, 2014) no incluyó la fuente dentro del inventario de emisiones presentado. Considerando lo anterior, y que en el año 2022 su generación bruta fue de 53 MWh, se espera que su operación continúe disminuyendo a futuro. A pesar de esto, la central fue incluida en el inventario elaborado en el presente estudio.

3.2.4 Puerto Las Losas

Puerto Las Losas es un terminal multipropósito del Grupo CAP que se encuentra ubicado a 1,5 km de la ciudad de Huasco, como se muestra en la Figura 3-10. Es una de las instalaciones portuarias más importantes de la región de Atacama, y lleva varios años dedicado a la carga y descarga de graneles minerales (carbón, caliza y pellets), graneles agroindustriales y el manejo de cargas de proyectos de inversión. El puerto cuenta en la actualidad con dos sitios de atraque operativos, que permiten el atraque de naves de forma simultánea: El Sitio 1 está habilitado para recibir naves de hasta 60.000 y cuenta con tres tolvas móviles de 300 ton/h, mientras que el Sitio 2, aprobado por la RCA N°332/2008, recibe naves de 12.000 DWT.



Figura 3-10 Ubicación Puerto Las Losas

Fuente: Google Earth

El puerto corresponde a una fuente industrial existente en la zona, cuya operación de desembarque inicia con el atraque de la nave en alguno de los dos sitios habilitados, donde la descarga se realiza mediante grúas a 3 tolvas móviles ubicadas en el cabezo de atraque, que luego descargan a un sistema de correas transportadoras cubiertas que transportan la carga hasta la torre de transferencia o, para el caso de cargas en contenedores, estos son transportados por camiones a los patios de contenedores. Desde la torre la carga es distribuida según lo requerido, pudiendo ser descargada a camiones para ser directamente despachada, o transportada mediante correas a su sector de almacenamiento temporal, ya sea silos, bodega o cancha de acopio. Este último sector representa una importante fuente de emisiones, por lo que considera una malla perimetral y 4 torres de humectación para las pilas de graneles minerales.

Adicionalmente, mediante la aprobación de la RCA N° 80/2020, el puerto amplía el espectro de graneles minerales a embarcar, incluyendo pellets de hierro. Estos son transportados mediante camiones desde la Planta de Pellets hasta el Sitio 1 o Sitio 2, donde se realiza el embarque a través de un sistema de correas cerrado que combina una sección fija y otra móvil, y un cargador móvil con manga retráctil que deposita el mineral en las distintas bodegas del barco. Además, la misma RCA aprobó la construcción de un centro de acopio temporal de residuos sólidos.

3.2.5 Punta Alcalde

La central termoeléctrica Punta Alcalde, perteneciente a Enel Generación Chile S.A., es un proyecto de central que se instalará a 15 km de la ciudad de Huasco, y a 2 km de Punta Alcalde. De acuerdo al proyecto inicial, esta termoeléctrica utilizaría carbón como combustible y estaría compuesta por dos unidades con capacidad de 370 MW cada una, con chimeneas independientes. El proyecto consideraba un muelle mecanizado para la descarga de carbón, canchas de acopio de carbón, una cancha de acopio de caliza y un depósito de ceniza y escorias. Además, las unidades incluirían como sistemas de abatimiento un filtro de mangas para MP, un desulfurizador húmedo, un sistema SCR y quemadores bajo NOx.

Si bien el proyecto fue ingresado al SEIA en el año 2008, debido a la situación de calidad atmosférica y presiones de la comunidad de Huasco, no fue aprobado hasta el año 2013, bajo la condición de ser sometido a un monitoreo ambiental permanente. La construcción de la central iniciaría en 2015, sin embargo, ese mismo año Endesa anunció la suspensión de su desarrollo, debido a que las adaptaciones para que fuera más rentable y con tecnologías más sustentables implicarían modificaciones sustanciales a la RCA favorable. Debido a que la central no será construida, no se considera como fuente emisora en el inventario.

3.2.6 Cerro Blanco

El proyecto Cerro Blanco, aprobado ambientalmente por la RCA N°90/2015, consiste en la explotación, procesamiento y transporte de mineral de rutilo (dióxido de titanio). El proyecto se ubicaría en la comuna de Freirina, y las reservas del mineral se encuentran en yacimientos en el sector de Cerro Blanco, como se muestra en la Figura 3-11. El proyecto considera una planta de concentración gravitacional, flotación y concentración magnética para el procesamiento del mineral, mientras que el abastecimiento de energía eléctrica y agua sería de manera autónoma a través de líneas eléctricas y una planta desalinizadora.

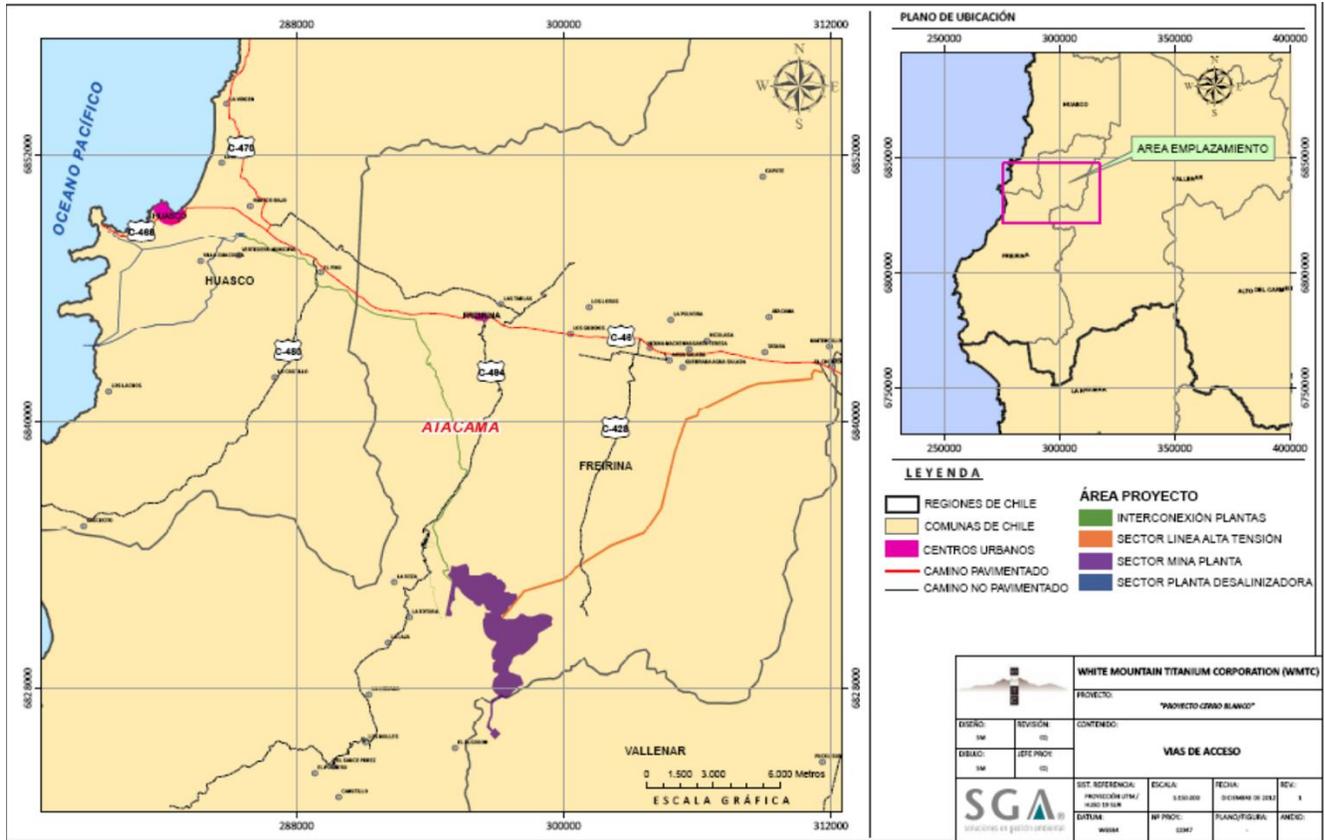


Figura 3-11 Ubicación Proyecto Cerro Blanco y vías de acceso

Fuente: Descripción proyecto, EIA "Proyecto Cerro Blanco"

El sector en el que se emplazaría la planta desalinizadora está ubicado a 3 km al suroriente de la ciudad de Huasco, como se muestra en la Figura 3-12, y se encuentra dentro de la zona declarada latente por MP10, a diferencia del resto de las obras consideradas por el proyecto. La planta considera un sistema de captación de agua de mar, conducida a través de una tubería hasta la succión de una bomba ubicada en la sentina emplazada en la costa, que constituye la primera estación de bombeo. En el extremo opuesto a la captación de agua de mar se ubicarán las bombas sumergibles. La impulsión del agua de mar desde la sentina de bombas hasta la planta desalinizadora se realizará mediante dos tuberías paralelas, y luego será descargada a estanques de acumulación ubicados a un costado de la planta.

Una vez en la planta, el agua de mar será impulsada mediante bombas centrífugas desde los estanques de acumulación hasta las líneas del sistema de pre-tratamiento. Posteriormente, se trata por medio de ósmosis inversa, al ser impulsada a una alta presión para pasar a través de tuberías con membranas. El agua desalinizada será químicamente estabilizada mediante la inyección de agentes químicos, y luego será descargada en estanques de acumulación junto a los cuales se encuentra la estación de bombeo, desde donde es impulsada al sector de la mina. Por otro lado, el agua salada generada como producto remanente será devuelta al mar mediante tuberías.

Las emisiones atmosféricas generadas en el sector corresponden principalmente a actividades de escarpe y excavación durante la fase de construcción de la planta. Adicionalmente, si bien no habrían emisiones de MP10 provenientes de fuentes fijas dentro de la zona latente, sí consideraría la circulación de camiones y maquinaria por caminos pavimentados y no pavimentados. En particular, en la fase de operación se considera el tránsito de camiones $\frac{3}{4}$ o camionetas para el transporte de repuestos y materiales varios por 30 km de trayecto, de los cuales 23 km están pavimentados y los restantes con bischofita. Para el control de las emisiones de MP10, se contempla cubrir con bischofita todos los caminos no pavimentados asociados al proyecto, y en su caso, se contempla la humectación de algunos tramos de caminos.

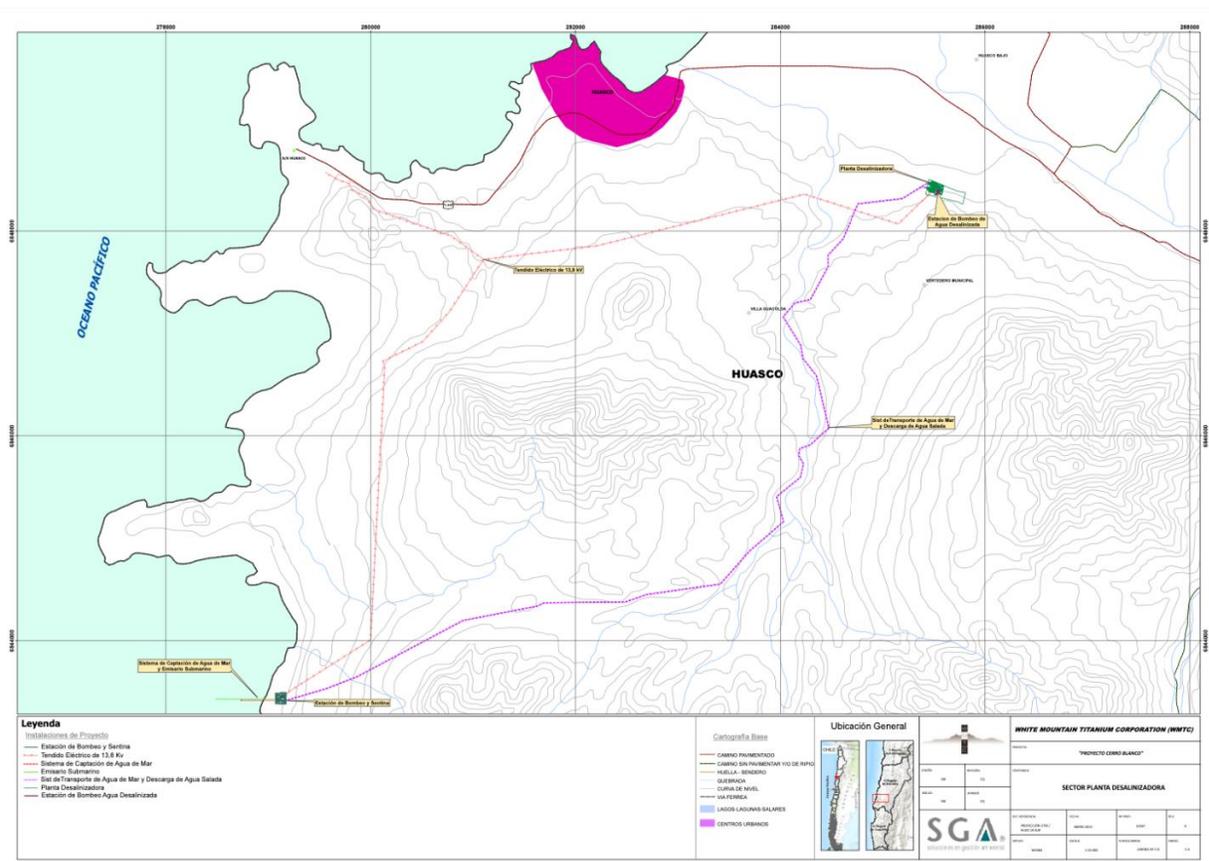


Figura 3-12 Ubicación de partes, acciones y obras físicas asociadas a Planta Desalinizadora
Fuente: Anexo Láminas, EIA "Proyecto Cerro Blanco"

El año 2019 el Proyecto Planta Desalinizadora de Cerro Blanco fue ingresado al SEIA en reemplazo del proyecto anterior, pero fue rechazado por la RCA N°139/2020. Además, el proyecto Cerro Blanco no posee fiscalizaciones o seguimiento ambiental asociado, y tampoco existe información disponible acerca de su estado actual o menciones respecto a si efectivamente será llevado a cabo. A pesar de lo anterior, bajo un criterio conservador desde el punto de vista ambiental, se decidió incluir el proyecto como potencial fuente futura en la proyección del inventario.

3.2.7 Otras fuentes puntuales

Para la identificación de otras fuentes puntuales emisoras de material particulado o de sus precursores, se utilizó el RFyP (Registro de Fuentes y Procesos) y el RUEA (Registro Único de Emisiones Atmosféricas) del RETC (Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes) del año 2020. En estas bases de datos se encuentra un registro detallado de fuentes de emisión puntuales (tales como grupos electrógenos, calderas, hornos, etc.) por empresa y establecimiento. Para cada una de las fuentes se indica el tipo de fuente a la que corresponde, código único, ubicación, nombre de la fuente, marca, modelo, año de fabricación, combustible que utiliza y el consumo anual de este, entre otros datos.

En primer lugar, para identificar las fuentes que se encuentran en la zona latente delimitada (ver Sección 1.1), se filtraron los establecimientos del RFyP pertenecientes a la comuna de Huasco que operan fuentes emisoras puntuales. En total, se identificaron diez establecimientos registrados que se ubican en la comuna, presentados en la siguiente tabla.

Tabla 3-7 Establecimientos que operan fuentes emisoras puntuales en la comuna de Huasco

Empresa	Establecimiento	Coordenada Este	Coordenada Norte	Huso
AGUAS CHANAR S A	EMISARIO HUASCO	281.503	6.849.196	19
	PEAS CONCHERIA	281.926	6.849.651	19
	PEAS EL FARO	282.849	6.849.524	19
	PEAS HUASCO BAJO	283.626	6.849.446	19
CIA MINERA DEL PACIFICO S A	MINA LOS COLORADOS	321.218	6.868.721	19
	PLANTA DE PELLETS	279.810	6.848.483	19
ENEL GENERACION CHILE S.A.	HUASCO	279.555	6.848.674	19
GUACOLDA ENERGIA S.A	GUACOLDA	279.279	6.848.815	19
PUERTO LAS LOSAS S.A.	PUERTO LAS LOSAS	280.573	6.848.555	19
TRANSELEC S A	SE Huasco	NA	NA	NA

Fuente: Elaboración propia

Estos datos fueron cargados al sistema de información geográfica QGIS, junto con las coordenadas de los puntos definidos para delimitar la zona latente (ver Sección 1.1). El resultado se presenta en la Figura 3-13.

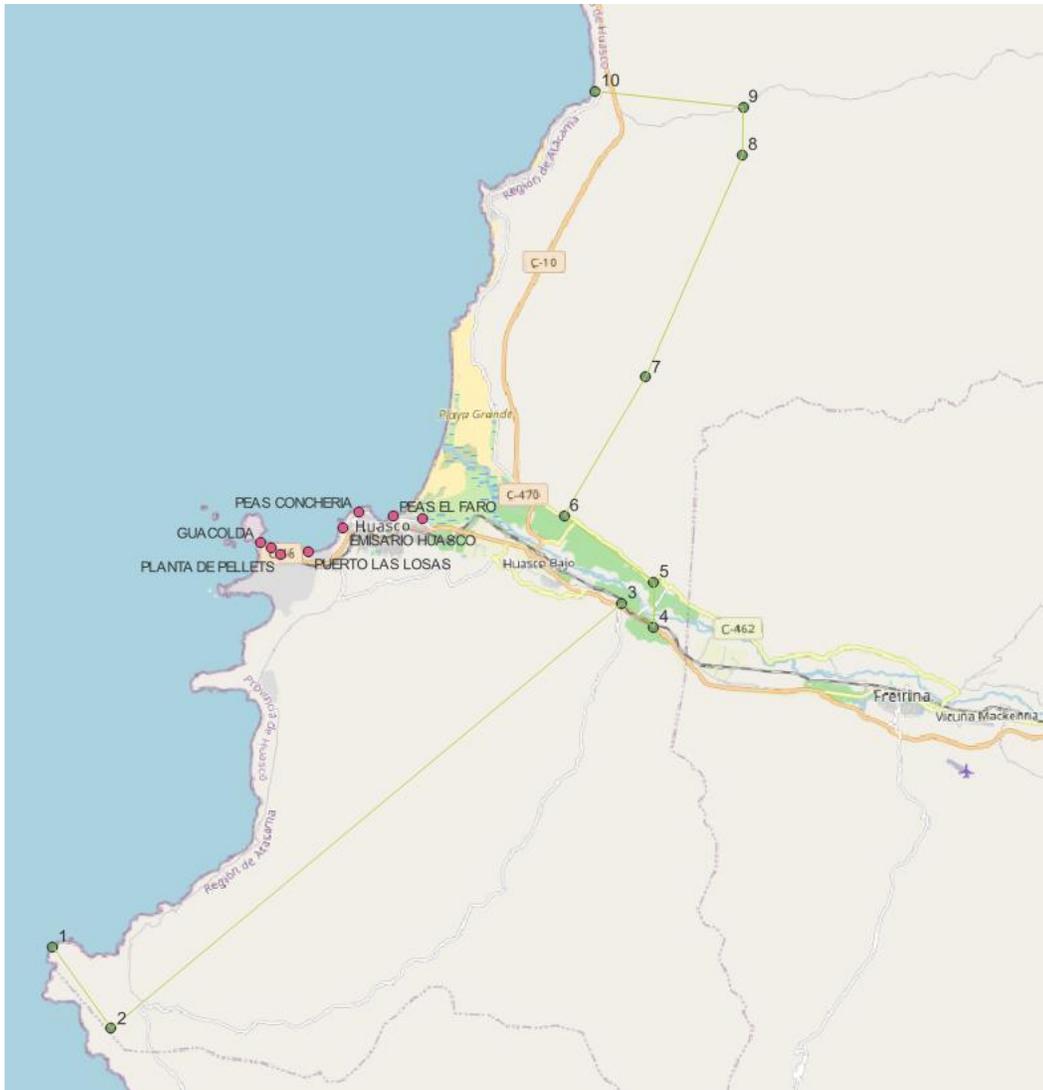


Figura 3-13 Identificación de fuentes dentro de la zona latente en QGIS

Fuente: Elaboración propia mediante QGIS

A partir de este ejercicio se identifica que, de los 10 establecimientos identificados que contienen fuentes emisoras, 9⁹ se encuentran en el área de estudio.

De esta forma, se obtuvo un listado de fuentes acotado a la zona latente. Este se resume en la Tabla 3-8, en donde se identifican los tipos de fuentes y la cantidad identificada de cada una de ellas. Es posible observar que la mayor parte de las fuentes corresponde a grupos electrógenos (66%).

⁹ No se dispone de información sobre la ubicación del establecimiento SE Huasco de Transelec S.A., pero se asume que se encuentra en la localidad de Huasco. Este establecimiento sólo opera un grupo electrógeno.

Tabla 3-8 Tipos de fuentes identificadas en la zona latente

Tipo de fuente	Número de fuentes
Caldera de Generación Eléctrica	5
Caldera Industrial (Generadora de Vapor o Agua Caliente)	1
Grupo Electrónico	19
Horno Rotatorio	1
Turbina de Gas	3
Total	29

Fuente: Elaboración propia

Para determinar los tipos de contaminantes emitidos por cada uno de estos tipos de fuentes, se realizó una búsqueda bibliográfica de contaminantes emitidos por tipo de combustible utilizado, lo que se muestra en la siguiente Tabla 3-9.

Tabla 3-9 Contaminantes emitidos por tipo de combustible

Combustible	Contaminantes	Fuente
Bencina	MP, NO _x , CO, HC	(U.S. Energy Information Administration, 2021)
Gas Licuado de Petróleo	MP, NO _x , CO, COVs, SO ₂	(EPA, 2008)
Gas Natural	MP, NO _x , CO, COVs, SO ₂ , CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	(EPA, 1998c)
Petróleo N°2 (Diésel)	MP, NO _x , CO, COVs, SO _x	(EPA, 1999)
Petróleo N°6	MP, NO _x , CO, COVs, SO _x	(EPA, 1999)
Carbón Bituminoso	MP, NO _x , CO, COVs, SO _x , As, Hg, Ni, Pb, Cd	(EPA, 1998b)
Carbón Bituminoso Pulverizado	MP, NO _x , CO, COVs, SO _x , As, Hg, Ni, Pb, Cd	(EPA, 1998b)

Fuente: Elaboración propia

De esta forma, es posible determinar los tipos de contaminantes emitidos por los diferentes tipos de fuentes (ver Tabla 3-10). Se observa que todas las fuentes emiten material particulado y precursores de este (SO_x, NO_x y COVs), y que el combustible utilizado con mayor frecuencia es el Petróleo N°2.

Tabla 3-10 Tipos de fuentes identificadas en la zona latente por tipo de combustible y contaminantes emitidos

Tipo de fuente	Combustible primario	Contaminantes	Número de fuentes
Caldera de Generación Eléctrica	Carbón Bituminoso Pulverizado	MP, NOx, CO, COVs, SOx	5
Caldera Industrial (Generadora de Vapor o Agua Caliente)	Petróleo N 2 (Diesel)	MP, NOx, CO, COVs, SOx	1
Grupo Electrónico	Petróleo N 2 (Diesel)	MP, NOx, CO, COVs, SOx	19
Horno Rotatorio	Carbón Bituminoso	MP, NOx, CO, COVs, SOx	1
Turbina de Gas	Petróleo N 2 (Diesel)	MP, NOx, CO, COVs, SOx	3
Total			29

Fuente: Elaboración propia

Por último, se identifican los tipos de fuentes emisoras por establecimiento. Se observa que la Compañía Minera del Pacífico concentra la mayor cantidad de fuentes emisoras, donde la mayor parte son grupos eléctricos.

Tabla 3-11 Principales empresas dueñas de fuentes emisoras

Empresa	Número de establecimientos	Tipo de fuente	Número de fuentes	Porcentaje del total
AGUAS CHANAR SA	4	Grupo Electrónico	4	13,8%
CIA MINERA DEL PACIFICO S A	1	Caldera Industrial (Generadora de Vapor o Agua Caliente)	1	3,4%
		Grupo Electrónico	8	27,6%
		Horno Rotatorio	1	3,4%
ENEL GENERACION CHILE S.A.	1	Turbina de Gas	3	10,3%
GUACOLDA ENERGIA S.A	1	Caldera de Generación Eléctrica	5	17,2%
		Grupo Electrónico	5	17,2%
PUERTO LAS LOSAS S.A.	1	Grupo Electrónico	1	3,4%
TRANSELEC S A	1	Grupo Electrónico	1	3,4%
Total			29	100%

Nota: La suma de los porcentajes presentados por empresa puede ser distinta a 100% por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

La base de datos completa, con la identificación de las fuentes, empresas, establecimientos, ubicación, contaminantes, tipo de combustible y consumo de combustible se encuentra en formato de planilla Excel disponible en el Anexo Digital "PPAHusco2 – Caracterización Otras Fuentes.xlsx".

Por otra parte, también se identificó un relave abandonado en la comuna de Huasco, presentado en la Tabla 3-12. Este dato fue obtenido del SERNEAGEOMIN¹⁰ y su ubicación se muestra en la Figura 3-14.

Tabla 3-12 Relaves abandonados Huasco

Empresa	Nombre de la planta	Nombre de la instalación	Toneladas autorizadas	Coordenadas UTM	
				Norte	Este
SOC. CAPOTE	CAPOTE	CAPOTE	80.305	6.866.349,64	308.856,93

Fuente: (SERNAGEOMIN, 2022)

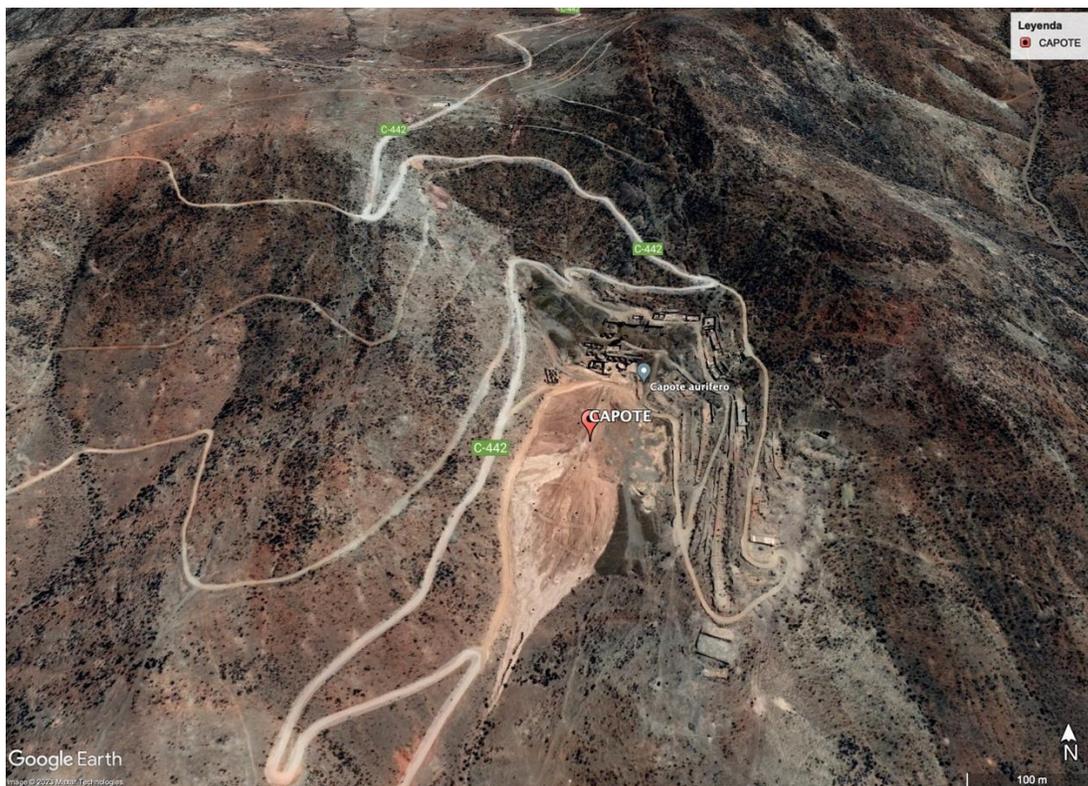


Figura 3-14 Ubicación geográfica de relave abandonado Capote

Fuente: Google Earth

3.2.8 Fuentes Difusas

Por otra parte, se identifican las diferentes fuentes difusas en la zona, correspondientes a emisiones de quemas agrícolas, incendios urbanos, incendios forestales y consumo de leña. El RETC ha registrado datos de nivel de actividad y ha estimado las emisiones de estas fuentes desde el año 2005. A continuación, se presenta una breve identificación y descripción de cada una de estas fuentes.

¹⁰ Actualizados el 19 de octubre 2022.

3.2.8.1 Quemadas agrícolas

Corresponden a emisiones producidas por la quema de residuos de cultivos. Las emisiones dependen del tipo de cultivo que se esté quemando y de la cantidad de materia orgánica que contengan los residuos. Para realizar las estimaciones de emisiones se utilizan los registros de superficie afectada de la CONAF. Los tipos de contaminantes emitidos por esta fuente corresponden a PTS, MP10, MP2,5, NH₃, CN, NO_x, SO_x, CO₂, CH₄, N₂O, CO y COVs.

A modo de referencia, se presentan las hectáreas quemadas por tipo de cultivo para el periodo 2018-2021 en la comuna de Huasco. Se observa que no hay registros de quemadas agrícolas el año 2020, y que predominan las quemadas de desechos de explotación de otras especies¹¹.

Tabla 3-13 Superficie de quemadas agrícolas en la comuna de Huasco, 2018-2021 [ha]

Año	Otros cultivos	Vegetación	Ramas	Desechos de Explotación de otras especies ¹	Total
2018	2,35	0,24	4,05	7,95	14,59
2019	1,80	-	0,01	5,50	7,31
2020	-	-	-	-	-
2021	-	0,77	1,09	-	1,85
Total	4,15	1,01	5,15	13,45	23,75

1. Quema de desechos de podas, raleos y explotación de otras especies diferentes a pino y eucaliptus

Fuente: Elaboración propia en base a la base de datos de CONAF¹²

3.2.8.2 Incendios urbanos

Estas corresponden a las emisiones provenientes de incendios ocurridos en la ciudad. Se estiman a partir del catastro de siniestros realizado por Carabineros de Chile. Los contaminantes provenientes de esta fuente corresponden a PTS, MP10, MP2,5, CO₂, NO_x, CO, COV, As, Hg y Pb.

A modo de referencia, se presentan los siniestros totales registrados por tipo en la comuna de Huasco para el periodo 2018-2021.

Tabla 3-14 Siniestros registrados en la comuna de Huasco, 2018-2021

Año	Incendio con peligro para las personas	Incendio con resultado de muerte y/o lesiones	Incendio solo con daños o sin peligro de propagación	Total
2018	0	0	7	7
2019	1	1	4	6
2020	0	0	4	4
2021	1	0	10	11
Total	2	1	25	28

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Carabineros de Chile

¹¹ Desechos de explotación de otras especies hace referencia a la quema de desechos de podas, raleos y explotación de otras especies diferentes a pino y eucaliptus

¹² Disponible en: <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>

3.2.8.3 Incendios forestales

Corresponden a emisiones provenientes de incendios en vegetación, estimadas a partir de los registros de superficies afectadas de la CONAF. Dado que la zona de estudio es árida, de las diferentes categorías de tipos de vegetación que presenta la base de datos de la CONAF¹³, sólo se identifican incendios en matorrales. Los contaminantes provenientes de esta fuente corresponden a PTS, MP10, MP2,5, CO₂, CO, COV, NO_x, SO_x, NH₃, CH₄, N₂O y CN.

A modo de referencia, se presentan las hectáreas incendiadas de matorrales en la comuna de Huasco para el periodo 2018-2021. Se observa que las superficies incendiadas no son extensas, y que los años 2019 y 2020 no hay registros de incendios en matorrales.

Tabla 3-15 Superficie de incendios forestales en la comuna de Huasco, 2018-2021 [ha]

Año	Matorral
2018	4
2019	0
2020	0
2021	0,25
Total	4,25

Fuente: Elaboración propia en base a la base de datos de CONAF¹⁴

3.2.8.4 Consumo de leña

Estas emisiones provienen de la combustión residencial de leña. Si bien el consumo de leña predomina en la zona sur del país, de todas formas, se identifica la combustión de este material con el fin de obtener un inventario completo. Las emisiones se estiman a partir de la información de consumo de leña levantada por el INFOR, y los contaminantes emitidos corresponden a PTS, MP10, MP2,5, NO_x, SO_x, CO, COVs, CO₂, CH₄, N₂O, NH₃ y CN.

A modo de referencia, para los años 2018 y 2019¹⁵ el INFOR indica los siguientes consumos de leña para la comuna de Huasco:

¹³ De la base de datos se identifican las categorías Pino, Eucaliptus, Arboleado, Matorral, Pastizal y Desechos Forestales.

¹⁴ Disponible en: <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>

¹⁵ La base de datos del INFOR contiene datos y estimaciones de consumo de leña sólo hasta el año 2019

Tabla 3-16 Consumo de leña en la comuna de Huasco, 2018-2019 [m³ sólidos/año]

Año	Urbana	Rural	Total
2018	142	125	267
2019	146	126	272
Total	288	251	539

Fuente: Elaboración propia en base a base de datos del INFOR¹⁶

3.2.8.5 Transporte en ruta

Las emisiones de esta fuente provienen del tubo de escape de los automóviles, del desgaste de frenos y neumáticos, emisiones evaporativas y del polvo resuspendido de caminos no pavimentados. Estas estimaciones se realizan utilizando el programa MODEM¹⁷, y la “metodología consiste en estimar los niveles de actividad de las diferentes categorías vehiculares y asociarle a cada una de ellas un factor de emisión. Para los vehículos motorizados, el nivel de actividad es representado, principalmente, por el kilometraje recorrido por el vehículo en el tiempo y el área donde se desarrolla el inventario, mientras que los factores de emisión se expresan en unidades de gramos por kilómetro recorrido” (MMA, 2021). Dado que estas estimaciones se realizan sólo para 21 ciudades del país, se propone estimar las emisiones de Huasco y su zona circundante a partir de lo señalado en el Manual de Inventarios (MMA, 2021). En este, se propone utilizar una metodología similar a la utilizada por MODEM, con una metodología *Top-Down* para estimar el nivel de actividad.

El RETC realiza las estimaciones de las emisiones de los siguientes contaminantes: PTS, MP10, MP2,5, CO, NOx, N₂O, SO₂, COVs, NH₃, CO₂ y COV.

Por otra parte, las categorías de vehículos consideradas en la estimación corresponden a:

- Buses
- Camiones
- Motocicletas
- Taxis-colectivos
- Vehículos comerciales
- Vehículos medianos
- Vehículos particulares

A modo de referencia, el año 2021 el INE registra un total de 4.707 vehículos motorizados en la comuna de Huasco.

¹⁶ Disponible en: https://simef.infor.cl/reporte_lenia/

¹⁷ Modelo de cálculo de emisiones vehiculares, desarrollado por Programa de Vialidad y Transporte Urbano de SECTRA, dependiente del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

3.2.9 Síntesis fuentes existentes

A partir de la revisión de información de los DIA y EIA, resumidos en la Tabla 3-17, junto con las consultas de pertinencia en caso de proponer modificaciones en los niveles de actividad, se realiza una base de datos con las fuentes de emisión de los proyectos de las instalaciones ubicadas al interior de la zona declarada latente por norma anual de MP10. Esta información se encuentra en una planilla Excel disponible en el Anexo Digital “PPAHuasco2 - Caracterización fuentes.xlsx”.

El archivo contiene un “Léeme” introductorio que explica el mismo archivo en sí, y una tabla síntesis de la base de datos (BD) la cual tiene los siguientes ítems:

- ID de la fuente
- Nombre de la instalación (planta de pellets o central termoeléctrica)
- Titular de la instalación
- Comuna donde se encuentra la instalación
- Rubro de la compañía
- Etapa del proyecto (si la fuente que emite es de fase de construcción, en operación o el caso base)
- Duración de la etapa del proyecto (años totales de duración de la fase en la que la fuente emite)
- Proceso emisor (si es del proceso, tránsito, combustión o erosión)
- Caracterización Fuente (actividad genérica que está emitiendo los contaminantes atmosféricos)
- Fuente (fuente específica cuya actividad emite los contaminantes atmosféricos)
- Detalle (aspectos relevantes en la descripción de la fuente y su nivel de actividad)
- Número de trabajadores de la etapa del proyecto
- Datum UTM este
- Datum UTM norte
- Tipo de combustible
- Nivel de actividad
- Unidad del nivel de actividad
- Sistema de abatimiento
- Eficiencia del sistema de abatimiento
- Tipo de emisiones
- Referencias de dónde se obtuvo la información, como el nombre del proyecto, el año, el número de RCA en el caso de estar aprobada, de qué parte de los documentos del proyecto se obtuvo y observaciones.

Tabla 3-17 Proyectos aprobados por el SEIA de las principales fuentes emisoras en Huasco

Año	Tipo	Titular	Nombre	Estado
2006	EIA	Guacolda Energía S.A.	Central Guacolda Unidad N° 3	Operación
2008	DIA	Puerto Las Losas S.A.	Sitio 2 Puerto Las Losas	Operación
2010	EIA	Compañía Minera del Pacífico S.A.	Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets	Fase I: Operación Fase II: No iniciada
2017	DIA	Guacolda Energía S.A.	Eliminación del uso de petcoke en Central Guacolda y ajuste de la capacidad de generación eléctrica	Operación
2018	DIA	Compañía Minera del Pacífico S.A.	Sistema de Control de Emisiones Planta de Pellets de Huasco	Operación

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, las otras fuentes puntuales identificadas fueron compiladas en una planilla Excel distinta, disponible en el Anexo Digital "PPAHuasco2-Characterización Otras Fuentes.xlsx". Este archivo también contiene un "Léeme" introductorio que explica los ítems contenidos en la base de datos (BD), los cuales son:

- ID de la fuente
- Código RETC del establecimiento al que pertenece la fuente
- Empresa a la que pertenece la fuente
- Establecimiento donde se encuentra la fuente
- Tipo de fuente (Grupo electrógeno, caldera industrial, horno, etc.)
- Grupo de fuente (Caldera, Horno, Grupo electrógeno, etc.)
- Código único de fuente
- Datum UTM este
- Datum UTM norte
- Huso horario
- Contaminantes emitidos por la fuente
- Combustible que consume la fuente (de acuerdo a registro de combustible primario RFyP)
- Combustible consumido el año 2020 (en toneladas)
- Identificación de las fuentes que se encuentran dentro de la zona saturada
- Identificación de las fuentes que ya se encuentran en la otra base de datos de caracterización de fuentes ("PPAHuasco2-Characterización Fuentes.xlsx")

3.3 Identificación de potenciales nuevas fuentes de MP10, MP2,5, sus precursores y sustancias tóxicas, y/o futuras ampliaciones de complejos industriales existentes, para los próximos 15 años, en el marco del SEIA

Se realizó una revisión de los proyectos aprobados, en admisión y en calificación en los últimos 5 años en la comuna de Huasco, de los cuales solamente hay: 6 proyectos aprobados desde el 2018 hasta el 2022, pertenecientes a los sectores productivos de saneamiento ambiental, minería e

infraestructura portuaria; 0 en admisión; y 0 en calificación. En la Tabla 3-18 se muestran estos proyectos. Adicionalmente, se considera como potencial fuente futura al Proyecto Cerro Blanco, aprobado por la RCA N°90/2015, cuya fase de construcción aún no ha iniciado (véase Sección 3.2.6).

Dentro del sector minero, los proyectos contemplan control de emisiones, depósito de relaves, modificaciones en plan minero y cese de descargas. Por otra parte, los sectores de saneamiento ambiental y de infraestructura portuaria tienen contemplado proyectos que también aportan fuentes de material particulado.

Tabla 3-18 Proyectos aprobados por el SEIA en la comuna de Huasco

Estado	Año	Tipo	Sector productivo	Nombre
Aprobado	2018	DIA	Saneamiento Ambiental	Planta Desalinizadora Guacolda
			Minería	Sistema de Control de Emisiones Planta de Pellets de Huasco
	2019	DIA	Minería	Cese de la descarga de Relaves en Ensenada Chapaco
	2020	DIA	Infraestructura Portuaria	Modificación recepción y embarque graneles minerales
	2021	DIA	Minería	Modificación Plan Minero Mina Los Colorados
		EIA	Minería	Depósito de Relaves Filtrados, Planta de Pellets

Fuente: Elaboración propia

3.4 Recopilación compromisos ambientales, en el marco del SEIA, que tengan relación con el control de emisiones

Para las fuentes emisoras identificadas, tanto para las actuales, nuevas y futuras ampliaciones, se recopilaron los compromisos ambientales de los DIA y EIA de los proyectos revisados, relacionados con el control de emisiones. Se identifican distintos sistemas de abatimiento para el control de las emisiones en cada instalación dentro de la zona latente y, tanto la tecnología como su eficiencia de abatimiento, fueron compilados en la base de datos que queda a disposición de la contraparte, disponible en el Anexo Digital "PPAHuasco2 - Caracterización fuentes.xlsx". En la Tabla 3-19 se presenta un resumen de los sistemas de abatimiento identificados para distintas fuentes en los DIA y EIA revisados.

Dentro de los sistemas de abatimiento se encuentra la utilización de bischofita en caminos, riego de caminos, pavimentación, humectación del material antes de la carga o descarga, productos supresores de polvo, precipitador electrostático, desulfurizador, filtro de manga, entre otros. La eficiencia de abatimiento se especifica para gran parte de las tecnologías de control, y en algunos el valor varía dependiendo del proyecto. Algunos de estos valores o rangos de valores se presentan para la bischofita que posee un 80%, los productos supresores de polvo con un 80%, el precipitador electrostático con aproximadamente 99%, el filtro de manga con una eficiencia de 99,8%, y el desulfurizador que va entre 87,5% a un 91%.

Tabla 3-19 Sistemas de Abatimiento recopilados

Fuente Emisora	Titular	Sistema Abatimiento	Eficiencia [%]
Chimeneas	Compañía Minera del Pacífico S.A.	Precipitador electrostático	98,5
		Desulfurizador húmedo	87
		SNCR	46,8
	Guacolda Energía S.A.	Precipitador electrostático	99
		Filtro de manga	99,8
		Desulfurizador húmedo	90,5
		Desulfurizador seco	91
	SCR	83	
Tránsito caminos no pavimentados	Compañía Minera del Pacífico S.A.	Bischofita	80
	Puerto Las Losas S.A.	Supresor polvo	80
	Guacolda Energía S.A.	Bischofita	80
Erosión eólica en canchas de acopio	Compañía Minera del Pacífico S.A.	Pantalla eólica	50
		Humectación por aspersores	50
		Malla perimetral	50
	Guacolda Energía S.A.	Humectación por aspersores	90
		Malla perimetral	50
		Aplicación contrante	50
	Puerto Las Losas S.A.	Humectación	50
		Pantalla eólica	50
Correas transportadoras	Compañía Minera del Pacífico S.A.	Cubierta	50
	Guacolda Energía S.A.		98
	Puerto Las Losas S.A.		99
Carga y descarga de material	Compañía Minera del Pacífico S.A.	Humectación material	30
	Guacolda Energía S.A.		50
	Puerto Las Losas S.A.	Manga retráctil	70

Fuente: Elaboración propia

3.5 Entrega recopilación realizada en un formato que permita identificar las variables relevantes

Para las fuentes principales, la recopilación realizada se encuentra en la misma base de datos del Anexo Digital "PPAHusco2 - Caracterización Fuentes.xlsx", donde está complementada por la instalación y el proyecto del cual se obtuvo. Mientras que para las otras fuentes (móviles, residenciales, etc.), se entrega la base de datos en el Anexo Digital "PPAHusco2 - Caracterización de otras fuentes.xlsx".

3.6 Elaboración de inventario de emisiones actualizado y proyectado considerando un horizonte de evaluación de 15 años

Se elaboró un inventario de emisiones actualizado y una proyección considerando un horizonte de evaluación de 15 años, para el MP10, MP2,5, sus precursores (SOx, NOx, NH3, COV's) y sustancias tóxicas. Para esto se desarrollaron las siguientes subactividades.

3.6.1 Estimación del inventario de emisiones

En las siguientes subsecciones se presenta la metodología utilizada para la estimación del inventario de emisiones y los resultados obtenidos.

3.6.1.1 Metodología para la estimación de emisiones

La metodología seguida para la estimación de las emisiones se distingue según las generadas por las grandes fuentes presentes en la zona y las generadas por otras fuentes. Estas son detalladas a continuación.

3.6.1.1.1 Grandes fuentes

La estructura del inventario se realizó siguiendo las recomendaciones oficiales para la elaboración de inventario (MMA, 2017b). Se identificaron las actividades emisoras pertenecientes a las grandes fuentes, desagregándolas en diferentes niveles de agrupación que permita análisis complementarios, como titular, instalación a la que pertenece, proceso emisor, subcategoría (para mayor detalle del proceso) y año. Las emisiones se estimaron en cada año del periodo 2017 a 2021, y se utilizó la siguiente ecuación general para cada actividad emisora¹⁸:

Ecuación 3-1 Estimación de emisiones generadas por una actividad

$$Emisiones_k = FE_k \cdot NA \cdot \left(1 - \frac{Ea}{100}\right)$$

Donde:

$Emisiones_k$: Emisiones del contaminante “k” [t]

FE_k : Factor de emisión para el contaminante “k”

NA : Nivel de actividad

Ea : Eficiencia de abatimiento [%]

Cabe destacar que las chimeneas de evacuación de gases poseen Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS). Por esta razón, en el caso de las chimeneas no se utiliza la Ecuación 3-1 para la estimación de emisiones, sino que se registra directamente la medición reportada por el CEMS para cada contaminante.

Como se mencionó en apartados anteriores, las principales fuentes emisoras de la localidad de Huasco son la Planta de Pellets perteneciente a CMP y la Central Termoeléctrica Guacolda, por lo que se cuenta con gran nivel de detalle de las actividades que generan emisiones en estas instalaciones. Adicionalmente, se incluyen las instalaciones Puerto Las Losas y la Central Térmica Huasco, a pesar de su baja actividad, junto con el transporte ferroviario de preconcentrado desde la Mina Los Colorados hasta la Planta de Pellets. En general, las fuentes identificadas abarcan:

- Carga y descarga de material

¹⁸ Se exceptúan las chimeneas de evacuación de emisiones, las cuales son cuantificadas por sus respectivos CEMS. En este caso, se registra directamente la medición reportada por cada contaminante.

- Transferencia de material
- Erosión eólica
- Correas transportadoras
- Tránsito vehicular por caminos pavimentados y no pavimentados
- Tránsito ferroviario
- Motor de vehículo
- Maquinaria
- Grupos electrógenos
- Harneado
- Chimeneas
- Calderas

Factores de emisión

Las expresiones utilizadas para la estimación de los factores de emisión de material particulado y sus precursores para cada tipo de actividad fueron obtenidos del AP-42 de la US EPA, compilado de factores de emisión para contaminantes atmosféricos realizada por la agencia estadounidense. En la Tabla 3-20 se presenta la ecuación utilizada para calcular el factor de emisión de cada contaminante para cada fuente emisora, junto con la unidad del factor, los parámetros y su referencia.

Tabla 3-20 Factores de emisión utilizados para los distintos tipos de fuentes emisoras

Fuente Emisora	Contaminante	Factor de Emisión	Unidad	Parámetro	Referencia
Carga y descarga de material	MP10	$k \cdot 0,0016 \cdot \left(\frac{u}{2,2}\right)^{1,3} / \left(\frac{m}{2}\right)^{1,4}$	kg/ton	k: factor tamaño partícula u: velocidad del viento (m/s) m: humedad del material (%)	(US-EPA, 2006a)
	MP2,5				
Correas transportadoras ¹⁹	MP10	0,00041	kg/ton	-	(US-EPA, 1986)
	MP2,5	0,00015			
	MP2,5	0,009			
Harneado	MP10	0,0043	kg/ton	-	(Algoritmos, 2022)
	MP2,5	0,001875			
Fugitiva camino no pavimentado	MP10 MP2,5	$k \cdot \left(\frac{s}{12}\right)^a \cdot \left(\frac{W}{2,72}\right)^b / 1.000$	kg/km	k: factor tamaño partícula s: porcentaje de finos (%) W: Peso promedio de vehículo (ton) a,b: coeficientes	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 2006c)
Fugitiva camino pavimentado	MP10 MP2,5	$k \cdot s^{0,91} \cdot (W \cdot 1,102311)^{1,02} / 1.000$	kg/km	k: factor tamaño partícula sL: carga de finos en superficie (g/m ²) W: Peso promedio de vehículo (ton)	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 2006b)

¹⁹ El proceso de Correas transportadoras considera el transporte de material en estas, con un Nivel de Actividad en ton/año. La erosión en correas transportadoras se incluye en el proceso de Erosión eólica, con un Nivel de Actividad en ha-día/año.

Fuente Emisora	Contaminante	Factor de Emisión	Unidad	Parámetro	Referencia
Fugitiva tránsito ferroviario ²⁰	MP10	0,0998	kg/km	-	(Ferreira et al., 2003)
	MP2,5	0,015			
Motor de maquinaria	MP10 MP2,5 NOx COV	$FP \cdot C \cdot P / 1.000$	kg/h	FP: factor potencia (gr/kW-h) C: carga de la máquina P: potencia de la máquina (kW)	(Algoritmos, 2022; EPA, 2010)
Erosión eólica	MP10 MP2,5	$k \cdot \left(\frac{s}{1,5}\right) \cdot \left(\frac{f}{15}\right)$	kg/ha-día	k: factor tamaño partícula s: porcentaje de finos (%) f: porcentaje del tiempo en que el viento superó los 5,4 m/s	(US-EPA, 2006d)
Grupo Electrónico Diésel de hasta 600 HP	MP10 MP2,5	0,00134	kg/kW-h	-	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 1996b)
		0,0060783	kg/kg		(MMA, 2017b; US-EPA, 1996b)
	SOx	0,00125	kg/kW-h		(Algoritmos, 2022; US-EPA, 1996b)
		0,00568616	kg/kg		(MMA, 2017b; US-EPA, 1996b)
	NOx	0,01880	kg/kW-h		(Algoritmos, 2022; US-EPA, 1996b)
		0,08647	kg/kg		(MMA, 2017b; US-EPA, 1996b)
	COV	0,0005569 ²¹	kg/kW-h		(US-EPA, 1996b)
		0,00706	kg/kg		(MMA, 2017b; US-EPA, 1996b)
	NH3	0,0000546 ²²	kg/kW-h		(US-EPA, 1996b)
		0,000692 ²³	kg/kg		(US-EPA, 1996b)
Grupo Electrónico	MP10 MP2,5	0,00043	kg/kW-h	-	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 1996a)

²⁰ El estudio (Ferreira et al., 2003) utiliza un factor de emisión para material particulado de 5,7 g/km-vagón para trenes sin control. Para estimar los valores para MP10 y MP2,5, se utilizan multiplicadores de 0,5 y 0,075, respectivamente, obtenidos del AP-42 para erosión en acopios industriales. Además, se consideró que un tren tiene 35 vagones.

²¹ Estimado utilizando un poder calorífico de Petróleo N°2 (Diesel) correspondiente a 10.900 kcal/kg.

²² Estimado utilizando un poder calorífico de Petróleo N°2 (Diesel) correspondiente a 10.900 kcal/kg.

²³ Estimado utilizando una densidad de Petróleo N°2 (Diesel) correspondiente a 840 kg/m³.

Fuente Emisora	Contaminante	Factor de Emisión	Unidad	Parámetro	Referencia
Diésel mayor a 600 HP		0,0011235	kg/kg		(MMA, 2017b; US-EPA, 1996a)
	SOx	0,0049 · S	kg/kW-h	S: Contenido de azufre en combustible (%)	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 1996a)
		0,0198 · S	kg/kg		(MMA, 2017b; US-EPA, 1996a)
	NOx	0,01460	kg/kW-h		(Algoritmos, 2022; US-EPA, 1996a)
		0,06274	kg/kg		(MMA, 2017b; US-EPA, 1996a)
	COV	0,0001267 ²⁴	kg/kW-h		(US-EPA, 1996a)
		0,0016059	kg/kg		(MMA, 2017b; US-EPA, 1996a)
	NH ₃	0,0000327 ²⁵	kg/kW-h		(US-EPA, 1996a)
		0,000414 ²⁶	kg/kg		(US-EPA, 1996a)
	Motor de camiones diésel	MP10 MP2,5	$((0,100820480611018+(0,424449762706025 \cdot \exp((-1) \cdot 0,0416436785215947) \cdot V)))+(0,864328026775096 \cdot \exp((-1) \cdot 0,159945936589218) \cdot V))/1.000$	kg/km	V: velocidad del vehículo (km/h)
NOx		$((5,58+(14,57 \cdot \exp((-1) \cdot 0,05) \cdot V)))+(45,65 \cdot \exp((-1) \cdot 0,31) \cdot V))/1.000$			
COV		$((0,14+(0,72 \cdot \exp((-1) \cdot 0,02) \cdot V)))+(2,8 \cdot \exp((-1) \cdot 0,12) \cdot V))/1.000$			
SOx		$((199,1+(496,04 \cdot \exp((-1) \cdot 0,05) \cdot V)))+(3798,31 \cdot \exp((-1) \cdot 0,57) \cdot V))/1.000$			
NH ₃		0,000003	-		
Motor de buses interurbanos diésel	MP10 MP2,5	$(0,08+(1,06/(1+\exp(((-1) \cdot 2,35)+(1,08 \cdot \ln(V)))+(0,01 \cdot V))))/1.000$	kg/km	V: velocidad del vehículo (km/h)	(MMA, 2017b)
	NOx	$((5,31+(21,88 \cdot \exp((-1) \cdot 0,05) \cdot V)))+(90,06 \cdot \exp((-1) \cdot 0,25) \cdot V))/1.000$			
	COV	$(0,23+(15,66/(1+\exp(((-1) \cdot 0,53)+(0,65 \cdot \ln(V)))+(0,03 \cdot V))))/1.000$			
	SOx	$(0,0198 \cdot V^2-2,506 \cdot V+137,42)/1.000$			
	NH ₃	0,000003		-	

²⁴ Estimado utilizando un poder calorífico de Petróleo N°2 (Diesel) correspondiente a 10.900 kcal/kg.

²⁵ Estimado utilizando un poder calorífico de Petróleo N°2 (Diesel) correspondiente a 10.900 kcal/kg.

²⁶ Estimado utilizando una densidad de Petróleo N°2 (Diesel) correspondiente a 840 kg/m³.

Fuente Emisora	Contaminante	Factor de Emisión	Unidad	Parámetro	Referencia
Motor de vehículos comerciales diésel	MP10	$0,67 \cdot (0,000045 \cdot V^2 - 0,005 \cdot V + 0,19) / 1.000$	kg/km	V: velocidad del vehículo (km/h)	(MMA, 2017b)
	MP2,5				
	NOx	$0,84 \cdot (0,0002 \cdot V^2 - 0,03 \cdot V + 2,02) / 1.000$			
	COV	$0,62 \cdot (0,0000175 \cdot V^2 - 0,003 \cdot V + 0,22) / 1.000$			
	SOx	$(0,0198 \cdot V^2 - 2,506 \cdot V + 137,42) / 1.000$			
	NH ₃	0,000001	-		
Calderas Diésel	MP10	0,0002853	kg/kg	-	(MMA, 2017b)
	MP2,5	0,0002853			
	NOx	0,003424			
	SOx	$0,02026 \cdot S$		S: Contenido de azufre en combustible (%)	
	COV	0,000029			
		NH ₃		0,00014	-

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros específicos requeridos para la estimación de los factores de emisión corresponden a características propias del lugar donde se lleva a cabo el proceso, por lo que fueron solicitados a las instalaciones ubicadas en la zona. En caso de no contar con la información, se utilizaron valores apropiados para cada actividad obtenidos de los inventarios de emisiones elaborados por los titulares para el ingreso de proyectos al SEIA, o de estudios como “Manual para desarrollo de inventarios” (MMA, 2017b) y la “Guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales” (MMA, 2019a) cuya principal referencia utilizada es el AP-42 de la US EPA. En la Tabla 3-21 se detalla el valor de los parámetros utilizados para cada fuente emisora por instalación, junto con la referencia desde donde se obtuvo.

Tabla 3-21 Parámetros utilizados para estimación de factor de emisión

Fuente emisora	Instalación	Parámetro	Valor	Referencia
Carga y descarga de material	Común para todas	k: factor tamaño partícula MP10	0,35	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 2006a)
		k: factor tamaño partícula MP2,5	0,053	
	Planta de Pellets	u: velocidad el viento (m/s)	2,7	Ficha información CMP
		m: contenido de humedad pellet feed (%)	6,91	
		m: contenido de humedad pellet chip (%)	1,5	
		m: contenido de humedad escombros (%)	6,5	
		m: contenido de humedad carbón (%)	5,16	
		m: contenido de humedad preconcentrado (%)	0,67	
		m: contenido de humedad cal (%)	0,18	
	Termoeléctrica Guacolda	u: velocidad el viento (m/s)	2,3 ²⁷	Ficha información Guacolda
		m: contenido de humedad carbón (%)	16,4	
		m: contenido de humedad subproductos (%)	9	
	Puerto Las Losas	u: velocidad el viento (m/s)	2,7	

²⁷ Este valor corresponde al promedio de las velocidades del viento de los 5 años (2017-2021) para los cuales Guacolda entrega valores en la ficha de solicitud. En el inventario se utiliza el valor específico de cada año.

Fuente emisora	Instalación	Parámetro	Valor	Referencia
		m: contenido de humedad producto hierro (%)	1,5	Ficha información Puerto Las Losas
		m: contenido de humedad carbón (%)	5,16	Ficha información CMP
		m: contenido de humedad caliza (%)	5	(GreenLabUC, 2014)
Erosión eólica	Común para todas	k: factor tamaño partícula MP10	0,95	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 2006d)
		k: factor tamaño partícula MP2,5	0,14	
	Planta de Pellets	s: contenido de finos pellet feed (%)	92,6	Ficha información CMP
		s: contenido de finos pellet chip (%)	10	
		s: contenido de finos carbón (%)	37,5	
		s: contenido de finos preconcentrado (%)	33,1	
		s: contenido de finos caliza (%)	21,4	
		f: porcentaje del tiempo que el viento supera los 5,4 m/s (%)	13,4	
	Termoeléctrica Guacolda	s: contenido de finos carbón (%)	7,33	(GreenLabUC, 2014)
		s: contenido de finos caliza (%)	1	
		f: porcentaje del tiempo que el viento supera los 5,4 m/s (%)	13,4	Ficha información CMP
Puerto Las Losas	s: contenido de finos graneles minerales (%)	32,4 ²⁸	Ficha información CMP	
	f: porcentaje del tiempo que el viento supera los 5,4 m/s (%)	13,4		
Grupo Electrónico Diésel mayor a 600 HP	Común para todas	S: Contenido de azufre en combustible (%)	0,005	(MMA, 2012)
Motor de maquinaria²⁹	Común para todas	FP: factor potencia MP (gr/kW-h), >130 kW	1,1	(MMA, 2012)
		FP: factor potencia MP (gr/kW-h), 75-130 kW	1,23	
		FP: factor potencia MP (gr/kW-h), 37-75 kW	1,51	
		FP: factor potencia NOx (gr/kW-h)	14,36	
		FP: factor potencia COVs (gr/kW-h), >130 kW	1,35	
		FP: factor potencia COVs (gr/kW-h), 75-130 kW	1,72	
		FP: factor potencia COVs (gr/kW-h), 37-75 kW	2,33	
	C: carga de la máquina	0,59	Ficha información CMP	
Motor de camiones diésel	Planta de Pellets	V: velocidad del vehículo (km/h)	40	Ficha información CMP
	Termoeléctrica Guacolda		50	Ficha información Guacolda
	Puerto Las Losas		50	Ficha información Puerto Las Losas
Motor de buses interurbanos diésel	Planta de Pellets	V: velocidad del vehículo (km/h)	80	Ficha información CMP
	Termoeléctrica Guacolda		50	Ficha información Guacolda

²⁸ Este valor corresponde al promedio de los contenidos de finos de graneles minerales: carbón, calizas y pellets de distintos tipos.

²⁹ El factor de potencia asociado a la emisión de MP (MP10 y MP2,5) y COVs depende de la potencia de la maquinaria.

Fuente emisora	Instalación	Parámetro	Valor	Referencia
Motor de vehículos comerciales diésel	Planta de Pellets	V: velocidad del vehículo (km/h)	80	Ficha información CMP
	Termoeléctrica Guacolda		50	Ficha información Guacolda
Fugitivas camino no pavimentado	Común para todas	k: factor tamaño partícula MP10	422,85	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 2006c)
		k: factor tamaño partícula MP2,5	42,85	
		a: coeficiente	0,9	
		b: coeficiente	0,45	
		s: porcentaje de finos camino (%)	8,5	(MMA, 2012)
Fugitivas camino pavimentado	Común para todas	k: factor tamaño partícula MP10	0,62	(Algoritmos, 2022; US-EPA, 2006b)
		k: factor tamaño partícula MP2,5	0,15	
	Planta de Pellets	sL: carga de finos en superficie (g/m ²)	1	Ficha información CMP
	Termoeléctrica Guacolda		2,4	Ficha información Guacolda
	Puerto Las Losas		0,2	Ficha información Puerto Las Losas
Calderas Diésel	Planta de Pellets	S: Contenido de azufre del combustible [%]	0,005	(MMA, 2012)

Fuente: Elaboración propia

De forma adicional a la estimación de la emisión de material particulado y sus precursores, el inventario desarrollado considera la emisión de otras sustancias tóxicas: Arsénico (As), Vanadio (V), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd). Los factores de emisión de estas sustancias se obtienen del “Air pollutant emission inventory guidebook” (EMEP/EEA, 2016). Las fuentes de emisión de sustancias tóxicas consideran principalmente las emisiones asociadas a combustión en fuentes fijas. En la Tabla 3-22 se presentan los factores de emisión considerados por fuente y contaminante.

Tabla 3-22 Factores de emisión de sustancias tóxicas por tipo de fuente emisora

Fuente Emisora	Contaminante	Factor de Emisión	Unidad	Referencia
Grupo Electrógeno Diésel	As	2,74e-9	kg/kg	(EMEP/EEA, 2016)
		2,16e-10	kg/kWh	
	Hg	5,02e-9	kg/kg	
		3,96e-10	kg/kWh	
	Pb	6,84e-9	kg/kg	
		5,40e-10	kg/kWh	
Cd	4,56e-10	kg/kg		
	3,60e-11	kg/kWh		
Calderas Diésel	As	8,0e-8	kg/kg	
	Hg	6,0e-8	kg/kg	
	Pb	2,0e-7	kg/kg	
	Cd	6,0e-8	kg/kg	

Nota: Para el cálculo de factores de emisión en kg/kWh se utilizaron los poderes caloríficos presentadas en (MMA, 2017b), Tabla 6-5.

Fuente: Elaboración propia

Niveles de actividad

A través de fichas de solicitud de información completadas por las empresas fueron recopiladas las actividades emisoras de cada instalación junto con sus niveles de actividad y la eficiencia de los sistemas de abatimiento implementados. En el caso del transporte ferroviario de preconcentrado, se utilizó los niveles de actividad aprobados ambientalmente en las RCA N° 246/2010³⁰ y N° 215/2010³¹. En el anexo de la Sección 7 se presenta en detalle los niveles de actividad considerados para la estimación de emisiones de grandes fuentes.

3.6.1.1.2 Otras fuentes

Fuentes puntuales de otras industrias

Para la estimación de las emisiones producidas por fuentes puntuales pertenecientes a otras industrias, se utilizaron las estimaciones disponibles en el RETC para las fuentes identificadas de acuerdo a lo presentado en la Sección 3.2.7. Estas estimaciones están realizadas a partir del consumo de combustible de las fuentes, y de los factores de emisión provenientes de la “Guía Metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales” (MMA, 2019b). Estos factores son asignados a cada fuente a partir de su código de clasificación de fuentes (CCF8) y del combustible utilizado (ver el Anexo 7).

Quemas agrícolas

Las emisiones de quemas agrícolas se obtienen a partir de las estimaciones disponibles en el RETC. Estas se estiman a partir de la metodología propuesta en el “Manual para el desarrollo de inventarios” (MMA, 2017b), la que se presenta en la siguiente ecuación.

Ecuación 3-2 Estimación de emisiones de quemas agrícolas

$$Emisiones_k = \sum_i Superficie_i \cdot FE_{i,k} \cdot FCO_i$$

Donde:

$Emisiones_k$: Emisiones del contaminante “k” [t]

$Superficie_i$: Superficie total quemada del tipo de suelo o cultivo “i” [ha]

$FE_{i,k}$: Factor de emisión del tipo de suelo “i” para el contaminante “k” [kg/kg de materia seca]

FCO_i : Factor de carga orgánica del tipo de suelo “i” [t/ha]

Los factores de emisión y de carga orgánica utilizados son los presentados en dicho inventario, mientras que la superficie quemada por cada tipo de cultivo se obtiene a partir de estadísticas entregadas por la CONAF.

³⁰ “Ampliación y mejoras operacionales en mina Los Colorados”. Describe la frecuencia de viajes, número de vagones por tren, y toneladas transportadas entre Mina Los Colorados y Estación Maitencillo.

³¹ “Ampliación y mejoras operacionales en Planta de Pellets”. Describe la frecuencia de viajes, número de vagones por tren, y toneladas transportadas entre Estación Maitencillo y Planta de Pellets.

Incendios urbanos

Las emisiones de incendios urbanos se obtienen a partir de las estimaciones disponibles en el RETC. Estas se estiman a partir de la metodología propuesta en el “Manual para el desarrollo de inventarios” (MMA, 2017b), la que se presenta en la siguiente ecuación.

Ecuación 3-3 Estimación de emisiones de incendios urbanos

$$Emisiones_k = \sum_i FE_{i,k} \cdot NA \cdot \frac{1}{1000}$$

Donde:

$Emisiones_k$: Emisiones del contaminante “k” [t]

FE_k : Factor de emisión para el contaminante “k” [kg/siniestro]

NA : Número de siniestros

Los factores de emisión utilizados son los presentados en dicho inventario, mientras que el número de siniestros se obtuvo a partir de los registros entregados por Carabineros de Chile.

Incendios forestales

Las emisiones de incendios forestales se obtienen a partir de las estimaciones disponibles en el RETC. Estas se estiman a partir de la metodología propuesta en el “Manual para el desarrollo de inventarios” (MMA, 2017b), la que se presenta en la siguiente ecuación.

Ecuación 3-4 Estimación de emisiones de incendios forestales

$$Emisiones_k = \sum_i Superficie_i \cdot FE_{i,k} \cdot FCO_i$$

Donde:

$Emisiones_k$: Emisiones del contaminante “k” [t]

$Superficie_i$: Superficie total quemada del tipo de bosque “i” [ha]

$FE_{i,k}$: Factor de emisión del tipo de bosque “i” para el contaminante “k” [kg/kg de materia seca]

FCO_i : Factor de carga orgánica del tipo de bosque “i” [t/ha]

Los factores de emisión y de carga orgánica utilizados son los presentados en dicho inventario, mientras que la superficie quemada por cada tipo de cultivo se obtiene a partir de estadísticas entregadas por la CONAF.

Consumo residencial de leña

Las emisiones de consumo residencial de leña se obtienen a partir de las estimaciones disponibles en el RETC. Estas se estiman a partir de la metodología propuesta en el “Manual para el desarrollo de inventarios” (MMA, 2017b), la que se presenta en la siguiente ecuación.

Ecuación 3-5 Estimación de emisiones de combustión residencial de leña

$$E_i = \sum_j \sum_k \sum_l (FE_{ijkl} \cdot NA_{jkl})$$

Donde:

E_i : Emisiones del contaminante i [t/año]

FE_{ijkl} : Factor de emisión del contaminante i para un artefacto de tipo j que utiliza leña de tipo k operado de manera l [t/kg de leña]

NA_{jkl} : Nivel de actividad de artefacto de tipo j que utiliza leña de tipo k operado de manera l [kg de leña/año]

Los factores de emisión utilizados son los presentados en dicho inventario, mientras que el consumo de leña se obtuvo a partir de una proyección del consumo de leña estimado en el estudio “Medición del Consumo Nacional de Leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera” (CDT, 2015).

Transporte en ruta

Dado que las estimaciones del RETC se realizan con la metodología para ciudades, se elabora la estimación por medio de metodología para ciudades sin modelo de transporte, correspondiente a la sección 4.1.2 del “Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas” (MMA, 2017b). Cabe destacar que para las zonas sin modelo de transporte se debe estimar el nivel de actividad de kilómetros recorridos con menor detalle, utilizando factores de emisión promedio, lo cual será desarrollado posteriormente en la sección de factores de emisión. En el manual, se encuentran incorporados factores de emisión y las fuentes correspondientes para los niveles de actividad, para obtener el siguiente nivel de desagregación:

- Emisiones por el tubo de escape
- Desgaste de frenos y neumáticos
- Polvo resuspendido
- Detenciones con el motor caliente
- Partidas en frío
- Emisiones evaporativas

Tal como se señala en el estudio del anteproyecto, se nota que las distancias recorridas no se realizan en su totalidad en la localidad de Huasco, si no que gran parte de estas se realizan en el camino a otras localidades (Freirina, Vallenar o Alto del Carmen). En adición a lo anterior, el nivel y déficit de equipamiento y servicios de la localidad de Huasco genera dependencia de las ciudades de Vallenar, Copiapó y La Serena, por lo cual el flujo vehicular se dirige a otras zonas (GORE Atacama, 2019a). También, el flujo de buses y camiones van de la mano con el puerto de embarque comercial, actividad portuaria y balneario. Entonces, cabe destacar el potencial de uso del puerto dada su capacidad de transferencia, almacenaje y oferta portuaria.

Dado lo anterior, se toma como supuesto que un 20%³² de los recorridos de los buses y camiones se realiza en la localidad, mientras que para los demás vehículos (particulares, colectivos, taxis y motos), un 50%³³ es atribuible a Huasco. En particular, para el nivel de actividad se identifica que la localidad de Huasco no tiene similitudes con grandes ciudades del país, por lo cual se utilizan valores promedios y velocidades promedio en ciudades con un parque vehicular menor o igual a 25.000 vehículos (CONAMA, 2009).

Para el año base 2021, se utiliza información disponible en el sitio del INE, el cual cuenta con el parque vehicular de la localidad de Huasco. En la Tabla 3-23, se puede notar el parque vehicular por categoría de vehículo, junto con el parámetro par la distancia recorrida, la velocidad promedio peso promedio y la distancia recorrida final, tras aplicar los supuestos descritos.

Tabla 3-23 Parámetros fuentes móviles para la localidad de Huasco

Vehículos	Parque Vehicular 2021	Distancia recorrida promedio	Distancia Recorrida Final	Peso promedio	Velocidad Promedio (km/h)
Particulares	1658	5592	2796	1,2	35
Comerciales	822	7990	3995	2	36
Taxi	48	31677	15838,5	1,2	27
Motos	61	1796	898	0,2	35
Buses	153	30212	6042,4	17,2	20
Camión liviano-mediano	313	3789	757,8	9,75	31
Camión pesado	1652	24445	4889	45	35

Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Nacional de Estadística (2021) y MMA (2017b).

Luego, para las siguientes emisiones y los factores de emisión, se utilizan las fórmulas:

Ecuación 3-6 Estimación de emisiones en caliente por tubo de escape

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

Donde:

- $E_{i,j,k,t}$: Emisiones según tipo de vehículo i , de combustible j , contaminante k y estándar tecnológico t .
- $Parque_{i,j,t}$: Parque de vehículos según tipo de vehículo i , de combustible j y estándar tecnológico t .
- NA_{jkl} : Nivel de actividad de artefacto de tipo j que utiliza leña de tipo k operado de manera l [kg de leña/año]
- $FE(v)_{i,j,k,t}$: Factor de emisión de escape del motor en función de la velocidad media (v), según tipo de vehículo i , de combustible j , contaminante k y estándar tecnológico t .
- $FA_{i,j,k}$: Factor de ajuste o deterioro según año de fabricación para tipo de vehículo i , de combustible j y estándar tecnológico t .

³² Estimado en base a un recorrido tipo entre Vallenar y Huasco, considerando un circuito de 20 kilómetros atribuibles a la localidad de Huasco.

³³ Estimado en base a un recorrido tipo entre Vallenar y Huasco, con una frecuencia bimensual.

Ecuación 3-7 Estimación por partidas en frío y evaporativas

$$FE_{c,i} = \frac{E_{c,i}}{Parque_i}$$

Donde:

- $E_{c,i}$: Emisiones según tipo de vehículo i, contaminante c.
- $Parque_i$: Parque de vehículos según tipo de vehículo i.
- $FE_{c,i}$: Factor de emisión promedio del contaminante c, para el vehículo tipo i.

Ecuación 3-8 Estimación por polvo resuspendido calles pavimentadas

$$FE = k \cdot (Sp)^{0,91} \cdot (W)^{1,02}$$

Donde:

- k : Multiplicador por tamaño de partícula [g/VKT]; 0,62 para MP10 y 0,15 para MP2,5.
- Sp : Contenido de material fino, fracción de polvo de diámetro <75 micrones [g/m²]; 0,5 para flujo vehicular <500 y 0,2 entre 500-5.000.
- W : Peso promedio de los vehículos en el camino [ton].

Respecto a la estimación de emisiones por partidas en frío y evaporativas, se utiliza la Ecuación 3-7, la cual asocia la aplicación de MODEM de otra ciudad que cuenta con modelo de transporte, por tipo de vehículo. Esta estimación se realizó utilizando la proporción con la ciudad de Copiapó, ya que es la más cercana con el modelo.

3.6.1.2 Resultado de la estimación del inventario de emisiones

En la presente sección, se presentan los resultados de la estimación del inventario de emisiones para la localidad de Huasco. La estimación del inventario se desarrolla en una base de datos que se encuentra disponible en el anexo digital "PPAHusco2-Inventario_Emissiones_Tablas.xlsx", que también incluye las tablas y gráficos presentados en el estudio.

3.6.1.2.1 Emisiones grandes fuentes

En el inventario de emisiones estimado para las grandes fuentes se detallan las fuentes identificadas, los niveles de actividad por año, el cálculo de los factores de emisión de cada contaminante y la estimación de las emisiones anuales de contaminantes por actividad emisora. A continuación se presenta un resumen de la estimación de emisiones anuales generadas por cada instalación para los contaminantes MP10 y MP2,5 en la Tabla 3-24, SOx y NOx en la Tabla 3-25, NH₃ y COVs en la Tabla 3-26, As, Hg y Ni en la Tabla 3-27, y para Pb y Cd en la Tabla 3-28. De forma complementaria, la Figura 3-15 y la Figura 3-16 muestran las emisiones anuales de cada contaminante por instalación, sin considerar sustancias tóxicas debido a sus bajas emisiones.

De la Tabla 3-24 se puede notar que la mayor parte de las emisiones de material particulado son generadas por la Planta de Pellets, cuyas principales fuentes de emisión son las chimeneas de evacuación de gases generados en las líneas de peletización 2A y 2B, seguido por la erosión eólica y la carga y descarga de material. Esta distribución cambia el año 2021, debido a que la chimenea 2B no estuvo operativa hasta noviembre mientras se implementaba el nuevo precipitador electrostático, por lo que ese año el principal proceso emisor fue erosión eólica. Cabe destacar que las emisiones medidas por los CEMS de CMP consideran únicamente la etapa de producción de pellets, y no las etapas de calentamiento, enfriamiento y mantención³⁴. En el caso de Guacolda, la principal fuente emisora es la evacuación de gases por las chimeneas de las unidades generadoras, seguida por el transporte por caminos no pavimentados.

Adicionalmente, en general se observa una tendencia a la disminución de las emisiones totales por año producto de una reducción de las emisiones evacuadas por las chimeneas operativas en las instalaciones, además de la disminución del nivel de actividad de fuentes como las mencionadas anteriormente. En particular, se puede notar que el año 2019 se produce una disminución de las emisiones en comparación con otros años, lo que se debe principalmente a una gran disminución de la cantidad de material tratado en la Planta de Pellets, evidenciado en los niveles de actividad de los procesos de carga y descarga de material, erosión eólica, correa transportadora y la caldera, principalmente. Lo anterior se debe a que el 21 de noviembre del 2018 se produjo un accidente fatal en el Puerto Guacolda II de CAP Minería, hecho que generó el cese temporal de la producción de la planta por varios meses durante 2019, disminuyendo la producción de pellet.

Tabla 3-24 Inventario de emisiones [t/año] de MP10 y MP2,5 por instalación en Huasco

Instalación	2017		2018		2019		2020		2021	
	MP10	MP2,5								
Planta de Pellets	408,31	118,38	596,48	195,16	192,89	66,29	246,97	78,10	155,50	39,97
Guacolda	217,34	72,04	212,87	68,52	181,84	55,39	198,80	63,55	184,20	58,17
Puerto Las Losas	0,02	0,01	0,02	0,02	2,63	0,36	1,89	0,41	0,80	0,30
Central Huasco	0,98	0,10	1,20	0,12	1,32	0,13	1,74	0,17	2,37	0,24
Línea Férrea	11,91	1,79	11,91	1,79	11,91	1,79	11,91	1,79	11,91	1,79
Total	638,54	192,32	822,47	265,60	390,58	123,96	461,30	144,02	354,78	100,46

Nota: La suma de las emisiones por instalación puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 3-25 se observa que Guacolda es responsable de emitir, en promedio, un 90% de las emisiones anuales de SOx y más de un 82% de NOx, provenientes principalmente de las cuatro chimeneas operativas en la central que evacúan las emisiones generadas en la combustión

³⁴ Las emisiones generadas en estas etapas se cuantifican a través de factores de emisión, según la Resolución Exenta N°1438/2021.

del carbón. En el caso de la Planta de Pellets, las principales fuentes emisoras de estos gases también corresponden a las chimeneas.

Tabla 3-25 Inventario de emisiones [t/año] de SO_x y NO_x por instalación en Huasco

Instalación	2017		2018		2019		2020		2021	
	SO _x	NO _x								
Planta de Pellets	935,66	999,01	130,09	1.085,73	308,95	327,66	250,69	373,67	132,77	287,69
Guacolda	2.643,16	2.925,67	3.903,77	3.650,99	4.581,99	4.236,71	3.592,37	3.985,67	4.128,17	877,50
Puerto Las Losas	0,01	0,20	0,01	0,21	30,70	1,22	30,70	3,58	45,98	3,64
Central Huasco	0,33	0,01	0,40	0,01	0,44	0,01	0,59	0,02	0,79	0,02
Total	3.579,16	3.924,90	4.034,28	4.736,94	4.922,08	4.565,61	3.874,34	4.362,93	4.307,72	4.379,08

Nota: La suma de las emisiones por instalación puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las emisiones estimadas para los contaminantes NH₃ y COVs, la Tabla 3-26 muestra que la Planta de Pellets es la fuente predominante de NH₃, esto a causa de la combustión llevada a cabo en grupos electrógenos y calderas a diésel, y de COVs debido a maquinaria y grupos electrógenos. En el caso de Guacolda, la principal fuente emisora de NH₃ es la combustión interna en motores de vehículos y de COVs la combustión en maquinarias.

Tabla 3-26 Inventario de emisiones [t/año] de NH₃ y COVs por instalación en Huasco

Instalación	2017		2018		2019		2020		2021	
	NH ₃	COVs	NH ₃	COVs	NH ₃	COVs	NH ₃	COVs	NH ₃	COVs
Planta de Pellets	0,27	1,85	0,25	9,90	0,07	6,72	0,17	13,76	0,19	11,67
Guacolda	0,00	1,47	0,00	1,55	0,00	1,60	0,00	1,70	0,00	1,61
Puerto Las Losas	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,06	0,00	0,28	0,00	0,28
Central Huasco	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	0,27	3,33	0,25	11,46	0,07	8,39	0,17	15,74	0,19	13,55

Nota: La suma de las emisiones por instalación puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se estimaron las emisiones de sustancias tóxicas, las cuales se presentan en kg/año. En la Tabla 3-27 se reportan las emisiones anuales de As, Hg y Ni, sin embargo, es relevante tener en cuenta que los CEMS de la Planta de Pellets no miden ninguna de estas sustancias, a diferencia del caso de Guacolda, donde se pudo obtener información de Hg. De esta forma, se puede notar que la Termoeléctrica Guacolda es predominante en emisiones de Hg, a

causa de las chimeneas de evacuación de gases. En cuanto a las emisiones de As y Ni, la caldera de la Planta de Pellets es la principal fuente emisora, seguida por los grupos electrógenos.

Tabla 3-27 Inventario de emisiones [kg/año] de As, Hg y Ni por instalación en Huasco

Instalación	2017			2018			2019			2020			2021		
	As	Hg	Ni	As	Hg	Ni	As	Hg	Ni	As	Hg	Ni	As	Hg	Ni
Planta de Pellets	0,06	0,05	10,36	0,06	0,04	9,42	0,02	0,01	2,62	0,04	0,03	6,33	0,04	0,03	7,25
Guacolda	0,00	37,07	0,00	0,00	13,54	0,00	0,00	37,67	0,00	0,00	30,37	0,00	0,00	20,09	0,00
Puerto Las Losas	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02
Total	0,06	37,12	10,37	0,06	13,58	9,44	0,02	37,69	2,64	0,04	30,40	6,36	0,04	20,13	7,27

Nota: La suma de las emisiones por instalación puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

Por último, la Tabla 3-28 presenta las emisiones anuales de las sustancias tóxicas Pb y Cd, generadas principalmente por la caldera de la Planta de Pellets y los grupos electrógenos.

Tabla 3-28 Inventario de emisiones [kg/año] de Pb y Cd por instalación en Huasco

Instalación	2017		2018		2019		2020		2021	
	Pb	Cd								
Planta de Pellets	0,16	0,05	0,15	0,04	0,04	0,01	0,10	0,03	0,11	0,03
Guacolda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Puerto Las Losas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	0,16	0,05	0,15	0,04	0,04	0,01	0,10	0,03	0,11	0,03

Nota: La suma de las emisiones por instalación puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

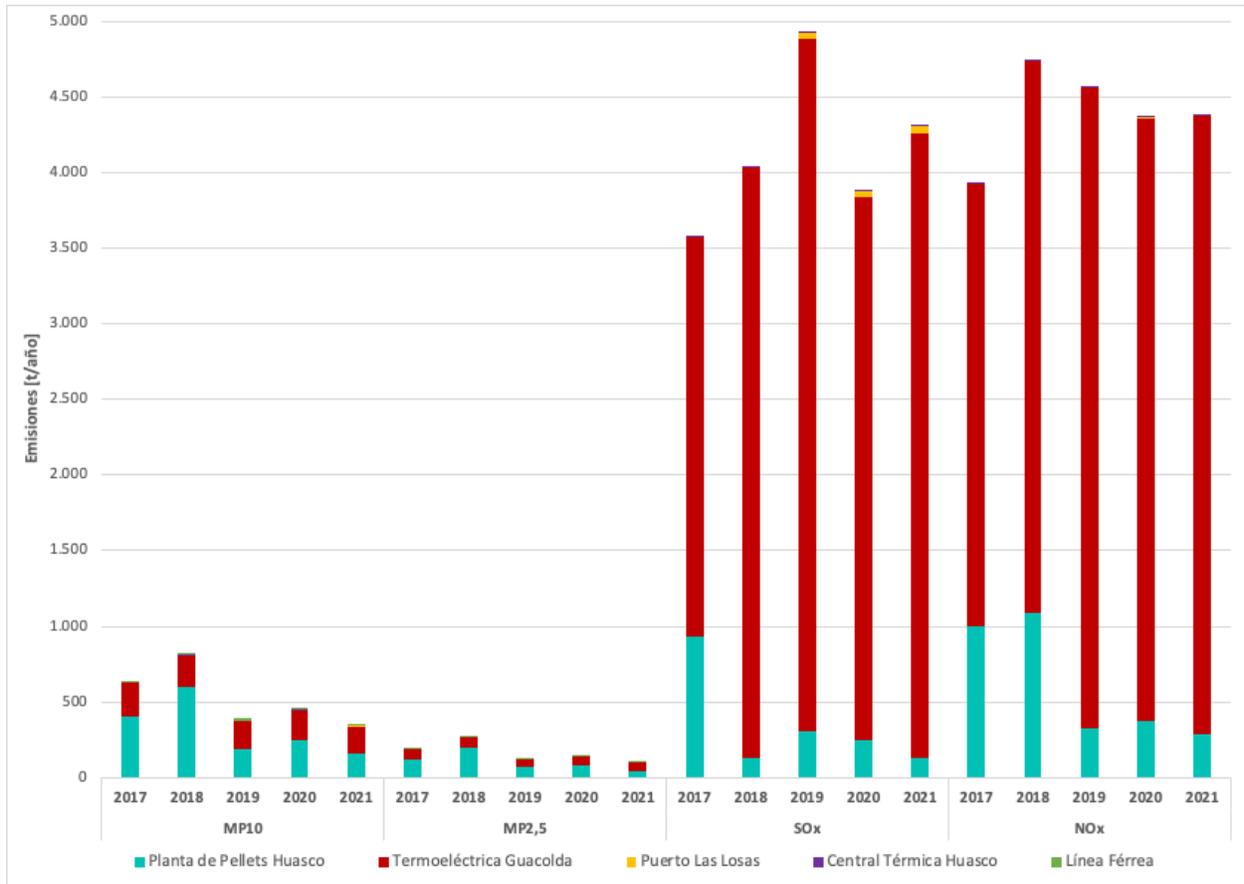


Figura 3-15 Emisiones anuales de MP10, MP2,5, SOx y NOx por instalación [t/año]

Fuente: Elaboración propia

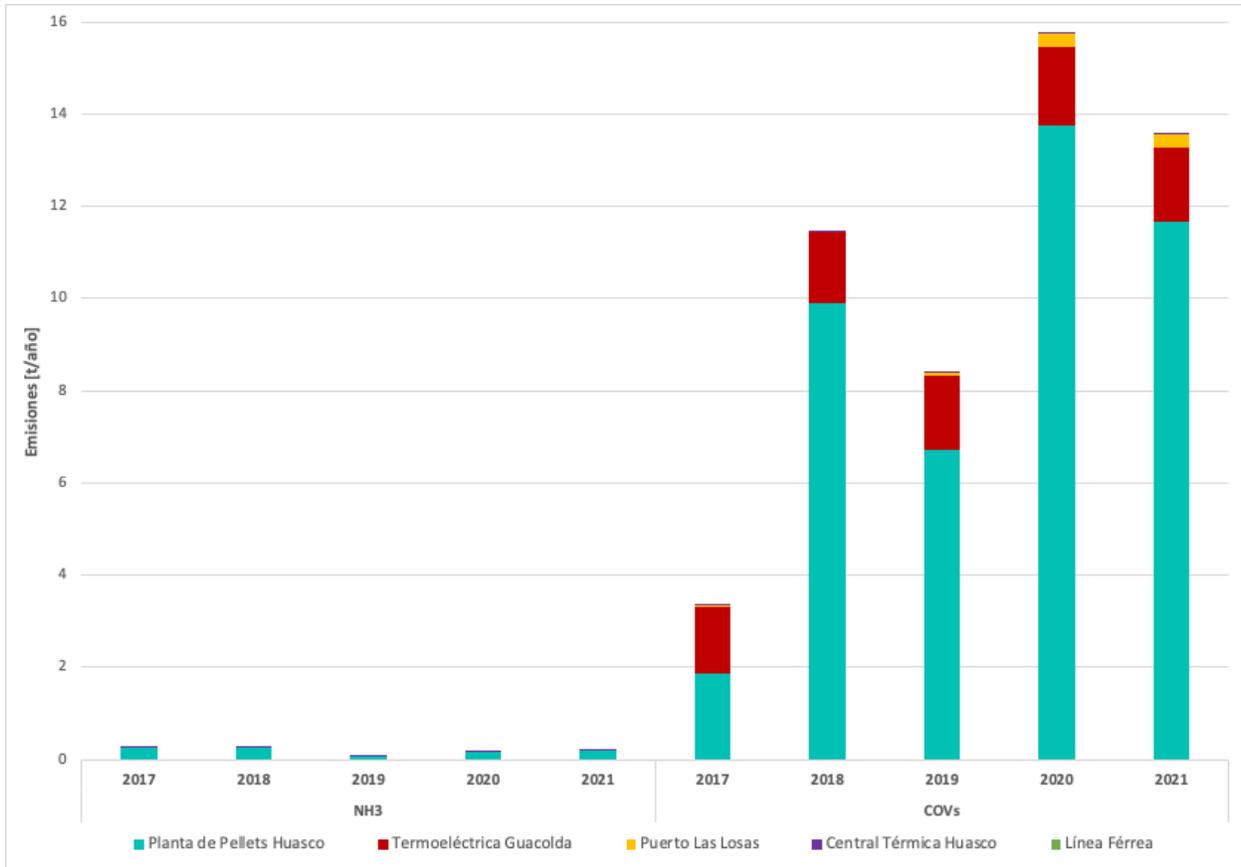


Figura 3-16 Emisiones anuales de NH3 y COVs por instalación [t/año]

Fuente: Elaboración propia

Complementario a lo anterior, en las siguientes tablas, entre la Tabla 3-29 a Tabla 3-34 se presentan para la Planta de Pellets y la Termoeléctrica Guacolda las emisiones anuales estimadas de fuentes con combustión y sin combustión. Se observa que, en el caso de CMP, gran parte de las emisiones de material particulado son debido a fuentes fijas con combustión, seguidas por fuentes fijas fugitivas (ver Tabla 3-29). El año 2019 se observa una disminución de las emisiones en todas las fuentes, lo que se explica por un accidente ocurrido a fines de 2018, lo que implicó el cese de forma temporal de la operación de la planta y, por consiguiente, una disminución de la producción de pellet, tal como se mencionó anteriormente. Además, se puede notar una disminución de las emisiones de fuentes con combustión en 2021, lo cual se explica por un cese del funcionamiento de la chimenea 2B hasta noviembre de ese año mientras se implementaba el precipitador electrostático.

Por otro lado, en Guacolda la principal fuente emisora es por combustión, destacando las chimeneas que evacúan las emisiones producidas en las distintas unidades de generación eléctrica. Adicionalmente, en ambas instalaciones las emisiones de SOx y NOx son generadas predominantemente por fuentes fijas con combustión (ver Tabla 3-33), mientras que en el caso de NH₃ y COVs por fuentes móviles con combustión (ver Tabla 3-34).

Tabla 3-29 Emisiones de MP10 y MP2,5 por combustión y sin combustión de Planta de Pellets [t/año]

Categoría Fuente	Tipo Emisión	2017		2018		2019		2020		2021	
		MP10	MP2,5	MP10	MP2,5	MP10	MP2,5	MP10	MP2,5	MP10	MP2,5
Fija	Combustión	240,60	90,05	437,50	162,81	145,61	54,14	134,86	50,53	29,17	11,51
	Fugitiva	159,20	26,12	144,55	23,65	40,05	6,52	96,65	15,97	111,94	18,48
Móvil	Combustión	0,20	0,20	6,87	6,87	5,12	5,12	10,38	10,38	8,58	8,58
	Fugitiva	8,31	2,01	7,56	1,83	2,10	0,51	5,08	1,23	5,81	1,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-30 Emisiones de SOx y NOx por combustión y sin combustión de Planta de Pellets [t/año]

Categoría Fuente	Tipo Emisión	2017		2018		2019		2020		2021	
		SOx	NOx	SOx	NOx	SOx	NOx	SOx	NOx	SOx	NOx
Fija	Combustión	845,89	992,13	48,41	992,29	286,24	260,02	195,80	235,94	69,96	172,97
	Fugitiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Móvil	Combustión	89,77	6,88	81,68	93,44	22,71	67,64	54,89	137,73	62,81	114,73
	Fugitiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-31 Emisiones de NH₃ y COVs por combustión y sin combustión de Planta de Pellets [t/año]

Categoría Fuente	Tipo Emisión	2017		2018		2019		2020		2021	
		NH ₃	COVs	NH ₃	COVs						
Fija	Combustión	0,27	1,65	0,25	1,50	0,07	0,42	0,17	1,01	0,19	1,16
	Fugitiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Móvil	Combustión	0,00	0,20	0,00	8,40	0,00	6,31	0,00	12,75	0,00	10,51
	Fugitiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-32 Emisiones de MP10 y MP2,5 por combustión y sin combustión de la Termoeléctrica Guacolda [t/año]

Categoría Fuente	Tipo Emisión	2017		2018		2019		2020		2021	
		MP10	MP2,5								
Fija	Combustión	172,55	63,84	161,02	59,58	124,82	46,19	147,61	54,62	133,09	49,25
	Fugitiva	9,09	1,35	9,11	1,36	9,12	1,36	9,10	1,35	9,10	1,35
Móvil	Combustión	3,40	3,40	3,44	3,44	3,43	3,43	3,49	3,49	3,49	3,49

Categoría Fuente	Tipo Emisión	2017		2018		2019		2020		2021	
		MP10	MP2,5								
	Fugitiva	32,29	3,45	39,30	4,15	44,47	4,42	38,60	4,09	38,51	4,08

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-33 Emisiones de SOx y NOx por combustión y sin combustión de la Termoeléctrica Guacolda [t/año]

Categoría Fuente	Tipo Emisión	2017		2018		2019		2020		2021	
		SOx	NOx								
Fija	Combustión	2.577,76	2.910,69	3.826,55	3.635,33	4.491,80	4.220,49	3.513,23	3.969,07	4.049,51	4.071,67
	Fugitiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Móvil	Combustión	65,41	14,99	77,22	15,66	90,20	16,22	79,14	16,60	78,66	16,06
	Fugitiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-34 Emisiones de NH₃ y COVs por combustión y sin combustión de la Termoeléctrica Guacolda [t/año]

Categoría Fuente	Tipo Emisión	2017		2018		2019		2020		2021	
		NH ₃	COVs								
Fija	Combustión	0,0001	0,0003	0,0001	0,0003	0,0001	0,0003	0,0001	0,0003	0,0001	0,0003
	Fugitiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Móvil	Combustión	0,0008	1,4723	0,0009	1,5487	0,0011	1,6029	0,0010	1,6949	0,0010	1,6091
	Fugitiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-17 y la Figura 3-18 muestran las emisiones por contaminante generadas durante el año 2021, debido a que es el último año del inventario, y sus datos asociados se presentan en la Tabla 3-35. Se puede observar que gran parte de las emisiones de NOx son emitidas por chimeneas, principalmente la chimenea de la Unidad 1&2 de la central Guacolda. Similar situación ocurre para el SOx, cuyas emisiones son generadas por chimeneas, la combustión de motores de vehículos y, en tercer lugar, la caldera de CMP.

Tabla 3-35 Emisiones por contaminante y fuente, año 2021 [t]

Fuente emisora/Contaminante	MP10	MP2,5	SOx	NOx	NH3	COVs
Caldera	0,16	0,16	0,06	1,89	0,08	0,02
Carga y descarga de material	39,65	6,00	0	0	0	0
Chimenea	161,12	59,62	4.118,50	4.228,75	0,00	0,00
Correa transportadora	8,45	3,09	0	0	0	0
Erosión eólica	73,20	10,79	0	0	0	0
Grupo electrógeno	1,01	1,01	0,94	14,35	0,11	1,15
Harneado	0,01	0,00	0	0	0	0
Maquinaria	9,76	9,76	0	126,31	0	12,09
Motor vehículo	2,49	2,49	188,22	7,77	0,00	0,30
Tránsito - no pavimentado	42,86	4,42	0	0	0	0
Tránsito - pavimentado	4,18	1,34	0	0	0	0
Tránsito - línea férrea	11,91	1,79	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

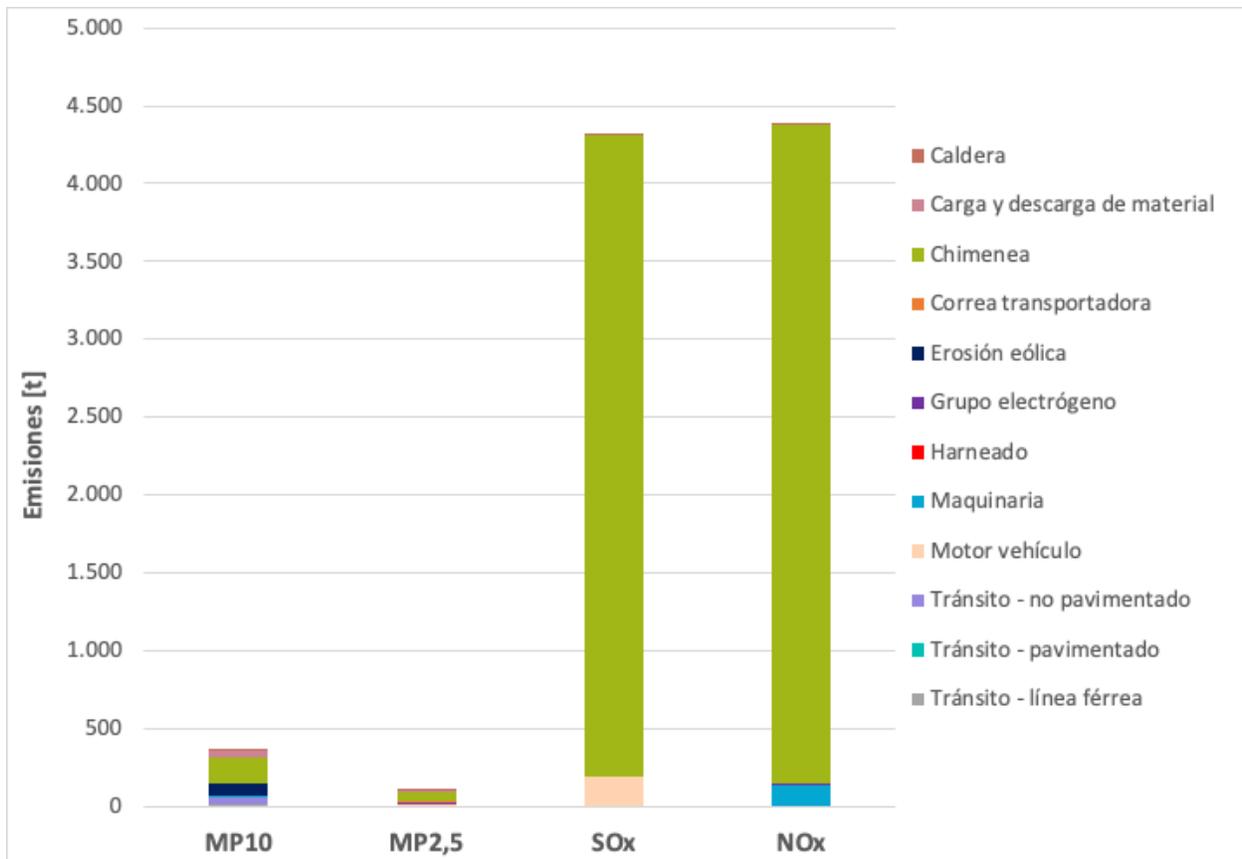


Figura 3-17 Emisiones de MP10, MP2,5, SOx y NOx por fuente, año 2021 [t]

Fuente: Elaboración propia

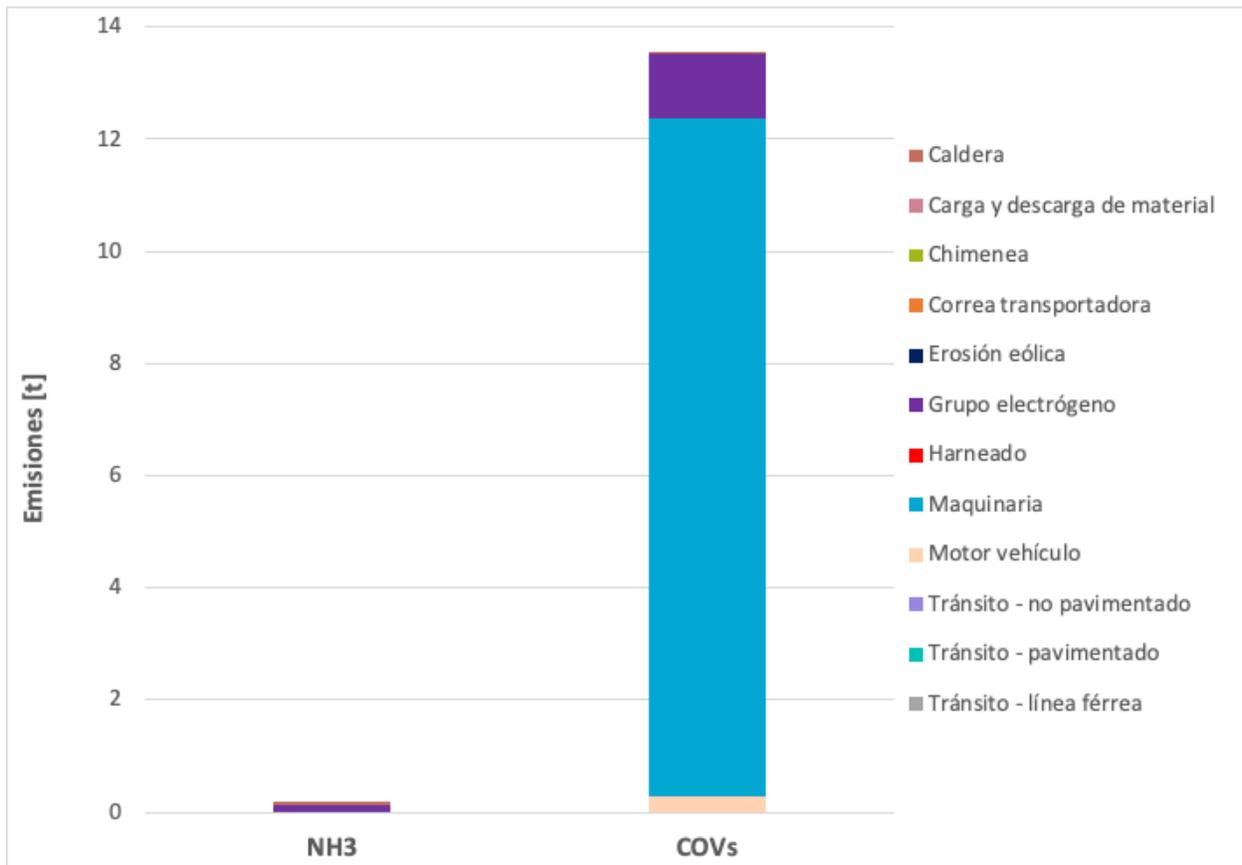


Figura 3-18 Emisiones de NH3 y COVs por fuente, año 2021 [t]

Fuente: Elaboración propia

Adicional a los resultados anteriores, se analizan particularmente las emisiones estimadas de material particulado debido a su relevancia en la zona de estudio. La Figura 3-19 y la Figura 3-21 muestran la distribución de las emisiones por fuente de MP10 para la Planta de Pellets y Guacolda, respectivamente, y la Figura 3-21 y Figura 3-22 de MP2,5, para el año 2021. En la Planta de Pellets, es posible observar una notoria responsabilidad del proceso de erosión eólica en las canchas de acopio de pellets y en correas transportadoras, seguido por la carga y descarga de grandes cantidades de material. También destacan las emisiones evacuadas por las chimeneas durante el proceso de peletización, cuyo funcionamiento quema carbón bituminoso³⁵. Por otro lado, en el caso de Guacolda, las emisiones son principalmente en las chimeneas de las unidades generadoras, y por la resuspensión de polvo en el tránsito por caminos no pavimentados.

³⁵ Cabe recordar que durante gran parte del año 2021 la chimenea 2B no estuvo operativa.

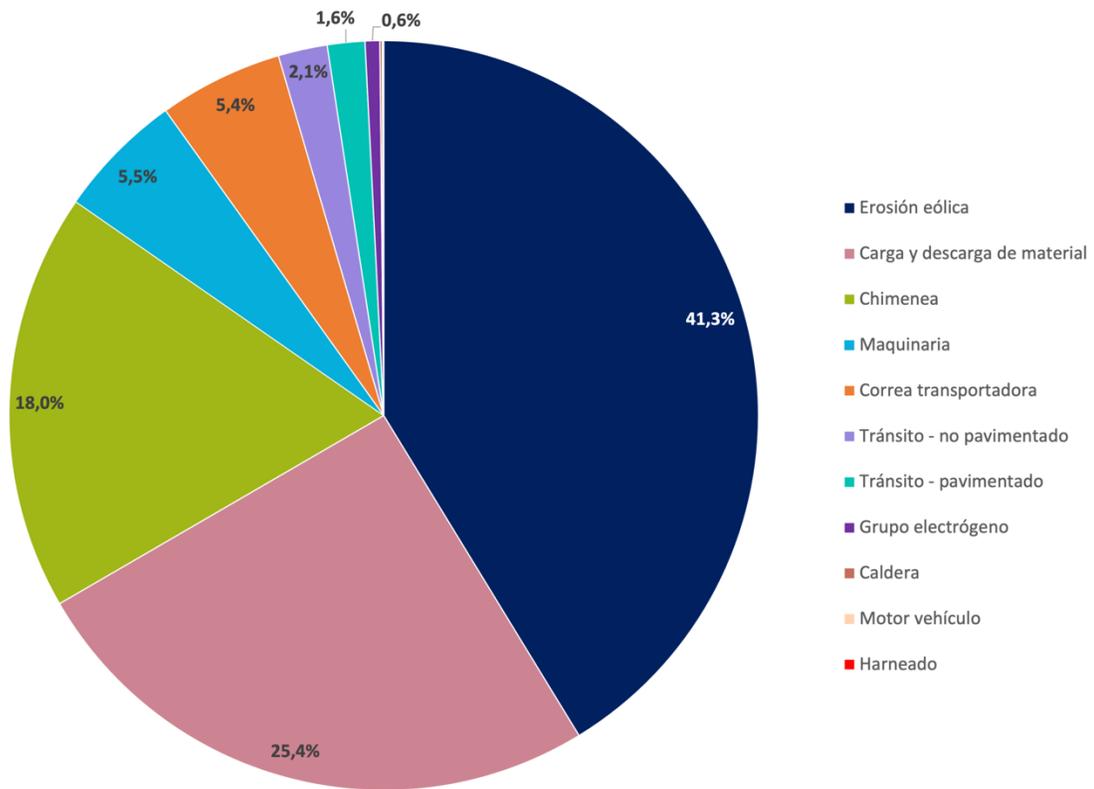


Figura 3-19 Distribución emisiones de MP10 por fuentes de Planta de Pellets, año 2021 [%]

Fuente: Elaboración propia

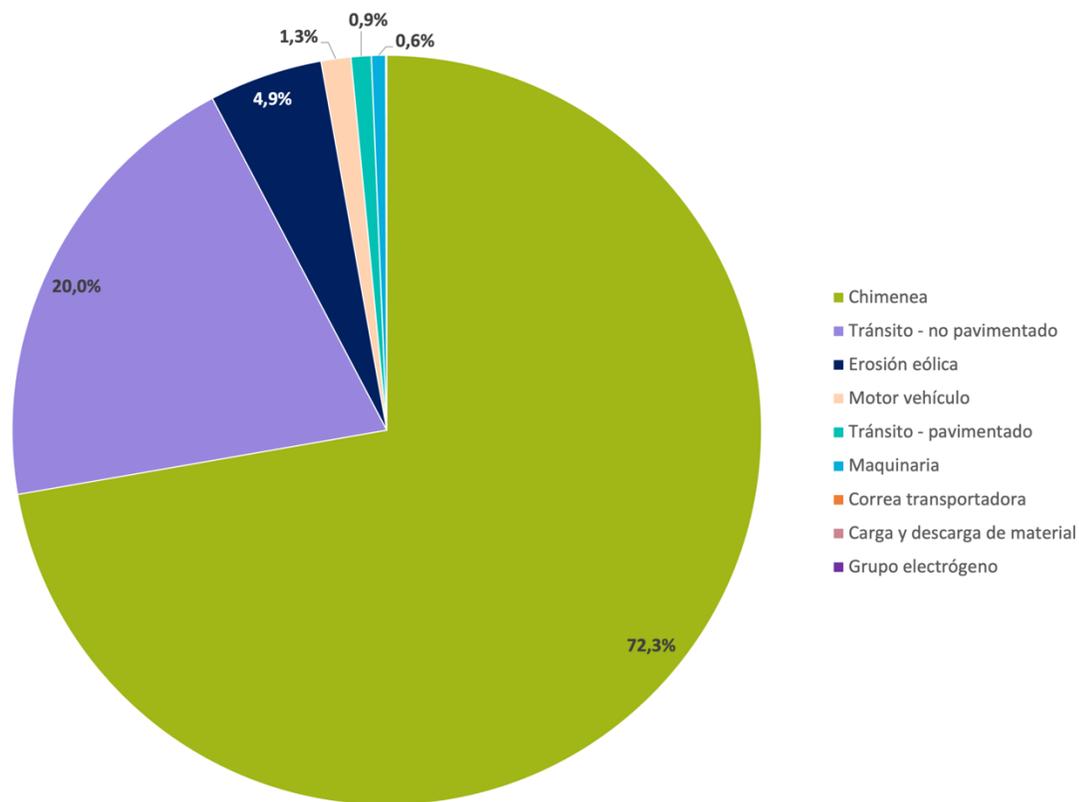


Figura 3-20 Distribución emisiones de MP10 por fuentes de Termoelectrica Guacolda, año 2021 [%]

Fuente: Elaboración propia

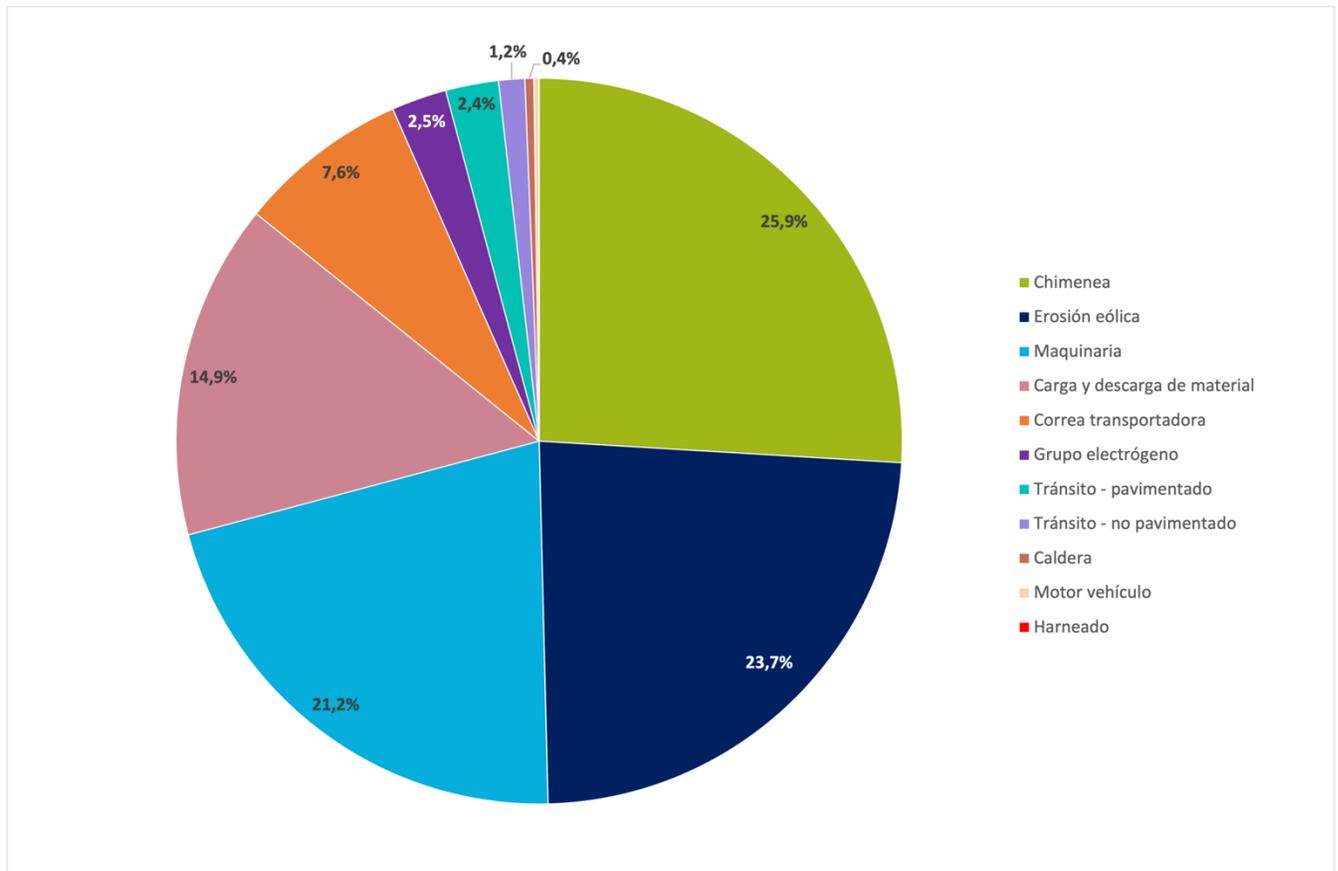


Figura 3-21 Distribución emisiones de MP2,5 por fuentes de Planta de Pellets, año 2021 [%]

Fuente: Elaboración propia

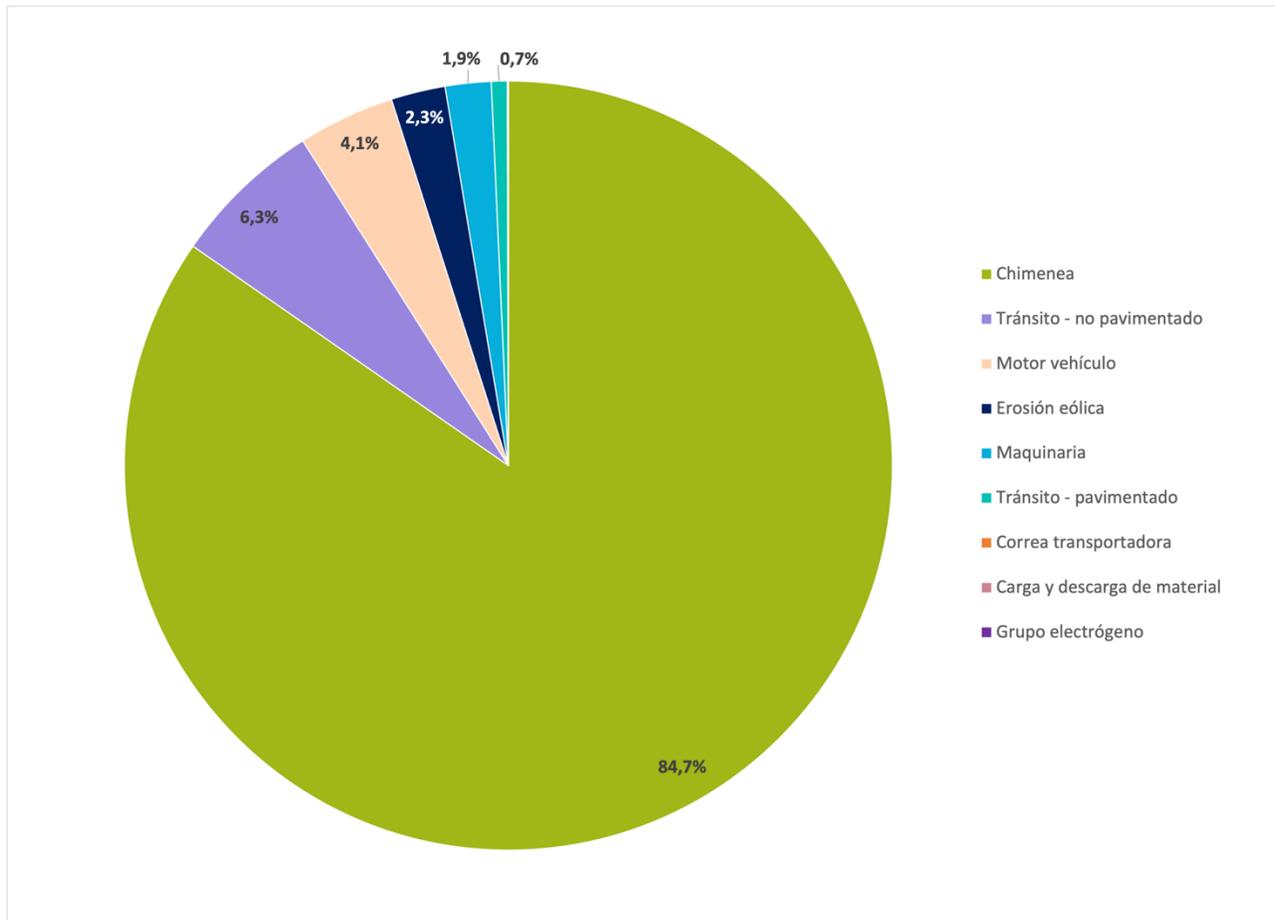


Figura 3-22 Distribución emisiones de MP2,5 por fuentes de Termoelectrica Guacolda, año 2021 [%]

Fuente: Elaboración propia

3.6.1.2.2 Emisiones otras fuentes

Por otra parte, se presentan las emisiones estimadas para las categorías de fuentes difusas correspondientes a combustión residencial de leña e incendios urbanos, además de las emisiones provenientes del transporte en ruta en la comuna de Huasco, disponibles en el anexo digital “PPAHUASCO2-Inventario_Emisiones_Otras_Fuentes.xlsx” (ver Tabla 3-36 y Tabla 3-37).

En estas, se puede observar que el mayor aporte a las emisiones de MP10 proviene de la re-suspensión de polvo producto del transporte de vehículos en rutas, representando un porcentaje mayor al 45% de las emisiones totales de estas tres categorías para todos los años, exceptuando el año 2021 en donde su participación se ve disminuida debido al aumento de las emisiones de la combustión residencial de leña.

Por otra parte, las mayores emisiones de los gases precursores NOx y NH3 provienen de las fuentes las turbinas y la combustión interna las que tienen mayor participación en la estimación

de emisiones, respectivamente. Finalmente, las emisiones de COV provienen principalmente de la combustión residencial de leña y de la combustión interna de vehículos.

Tabla 3-36 Inventario de emisiones anuales de MP10 y MP2,5 por subcategoría de la comuna de Huasco [t]

Categoría	Subcategoría	2018		2019		2020		2021	
		MP10	MP2,5	MP10	MP2,5	MP10	MP2,5	MP10	MP2,5
Combustión de Leña Residencial	Combustión de Leña Residencial Rural	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	1,4	1,3
	Combustión de Leña Residencial Urbana	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8
Incendios Forestales	Incendios Forestales	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Incendios Urbanos	Incendios Urbanos	1,0	1,0	0,9	0,9	0,6	0,6	1,6	1,6
Otras Industrias	Grupo electrógeno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Quemas Agrícolas	0,1	0,1	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
	Turbina de gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Transporte en Ruta	Combustión vehículos	2,8	2,5	2,5	2,2	1,6	1,6	4,5	4,2
	Otras emisiones vehículos	0,6	0,3	0,7	0,4	0,6	0,3	0,9	0,5
	Resuspensión de polvo	5,0	1,2	4,3	1,2	4,7	1,4	4,5	1,1
Total		11,1	6,7	9,8	6,2	8,8	5,3	13,6	9,5

Nota: La suma de las emisiones por subcategoría puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-37 Inventario de emisiones anuales de COV, NH3, NOx y SOx por subcategoría de la comuna de Huasco [t]

Categoría	Subcategoría	2018				2019				2020				2021			
		COV	NH3	NOx	SO2												
Combustión de Leña Residencial	Combustión de Leña Residencial Rural	9,3	0,0	0,1	0,0	8,7	0,1	0,1	0,0	9,1	0,1	0,1	0,0	14,0	0,1	0,2	0,0
	Combustión de Leña Residencial Urbana	4,4	0,0	0,1	0,0	4,2	0,0	0,1	0,0	5,2	0,0	0,1	0,0	8,1	0,1	0,1	0,0
Incendios Forestales	Incendios Forestales	0,9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Incendios Urbanos	Incendios Urbanos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
Otras Industrias	Grupo electrógeno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
	Quemas Agrícolas	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Turbina de gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0	6,6	0,0
Transporte en Ruta	Combustión vehículos	0,0	1,6	1,2	0,1	0,0	1,5	1,2	0,1	0,0	1,1	1,1	0,1	0,0	0,4	1,2	0,1
	Otras emisiones vehículos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Resuspensión de polvo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total		14,7	1,6	1,5	0,1	13,0	1,6	4,4	0,1	14,3	1,2	7,9	0,1	22,3	0,6	8,3	0,1

Nota: La suma de las emisiones por subcategoría puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

A modo de resumen, en la Figura 3-23 se presentan las estimaciones de emisiones anuales por categoría de cada uno de los contaminantes, tanto para emisiones de otras industrias como de fuentes asociadas a la comuna de Huasco. Respecto los óxidos nitrosos, son las otras industrias las que tienen mayor presencia en la zona, provenientes de las turbinas de gas. Ahora bien, se puede identificar que la el NH₃, el transporte en ruta tiene la mayor presencia, mientras que para COVs, la combustión de leña es el principal contribuyente a las emisiones.

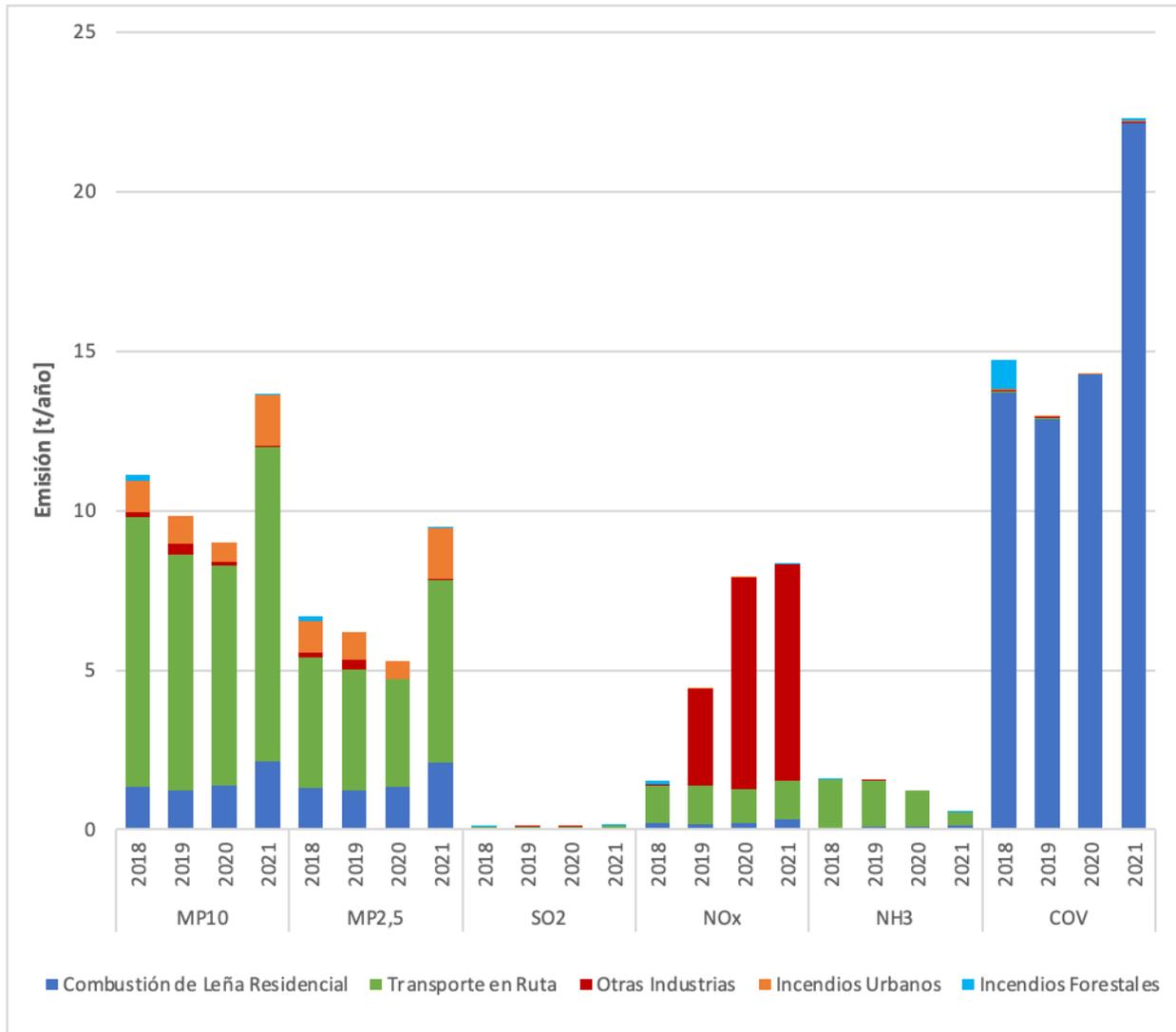


Figura 3-23 Emisiones anuales por contaminante y categoría (otras industrias y comuna de Huasco) [t/año]

Fuente: Elaboración propia

Para analizar el aporte por subcategoría, en la Figura 3-24 se revisa en detalle las emisiones del año 2021. Se puede observar que el mayor aporte de material particulado proviene de la resuspensión de polvo y la combustión de vehículos, mientras que la mayor parte del NOx

proviene de las turbinas a gas, y las emisiones de COVs proviene de la combustión de leña residencial. Por su parte, las emisiones de SO2 tienen como fuente principal la combustión interna de vehículos, al igual que para las de NH3.

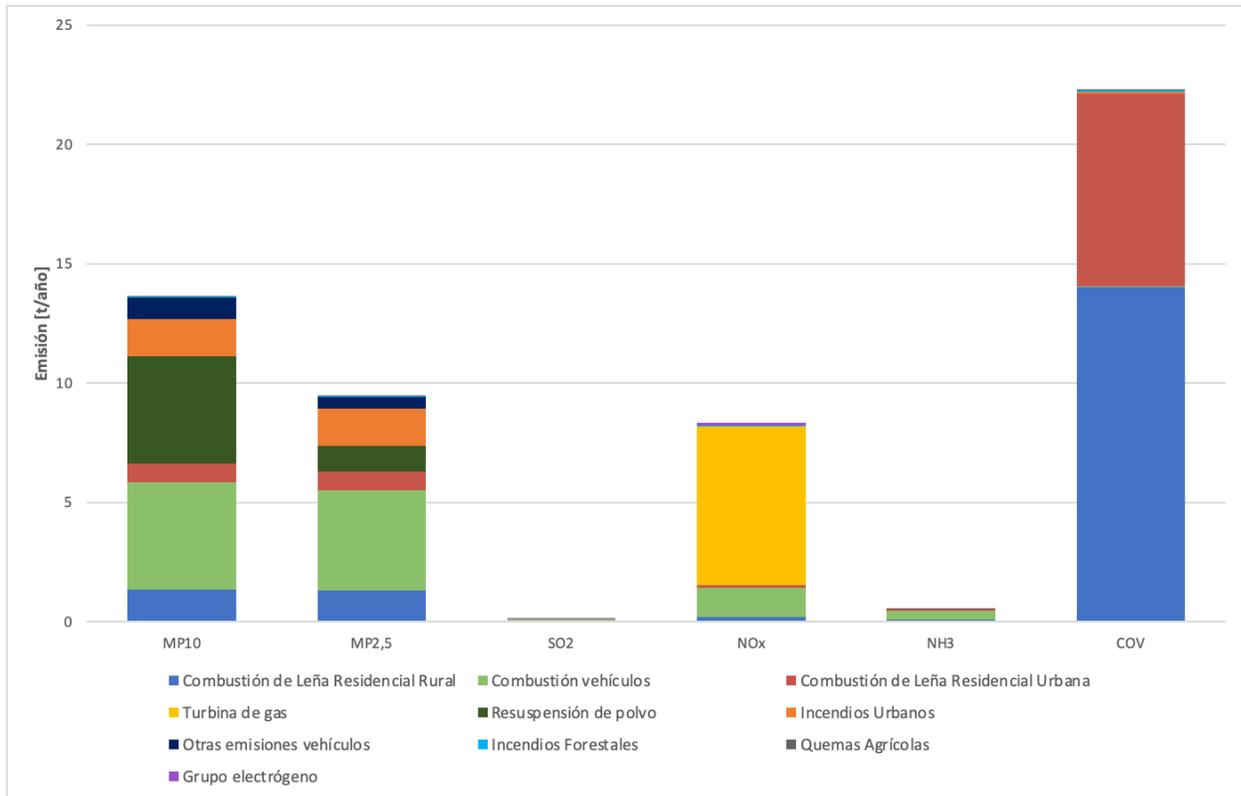


Figura 3-24 Emisiones por contaminante y subcategoría, año 2021 [t]

Fuente: Elaboración propia

Por último, se presentan las emisiones estimadas de MP10 (Figura 3-25) y MP2,5 (Figura 3-26). Se puede observar en mayor detalle que un 66% de las emisiones provienen del transporte en ruta, distribuidas entre resuspensión de polvo y combustión de vehículos, mientras que en el caso del MP2,5 un 55% proviene del transporte, teniendo una mayor participación las emisiones de la combustión de leña (22%) e incendios urbanos (16%). Esta diferencia se da por las distintas composiciones de las emisiones de las diferentes fuentes.

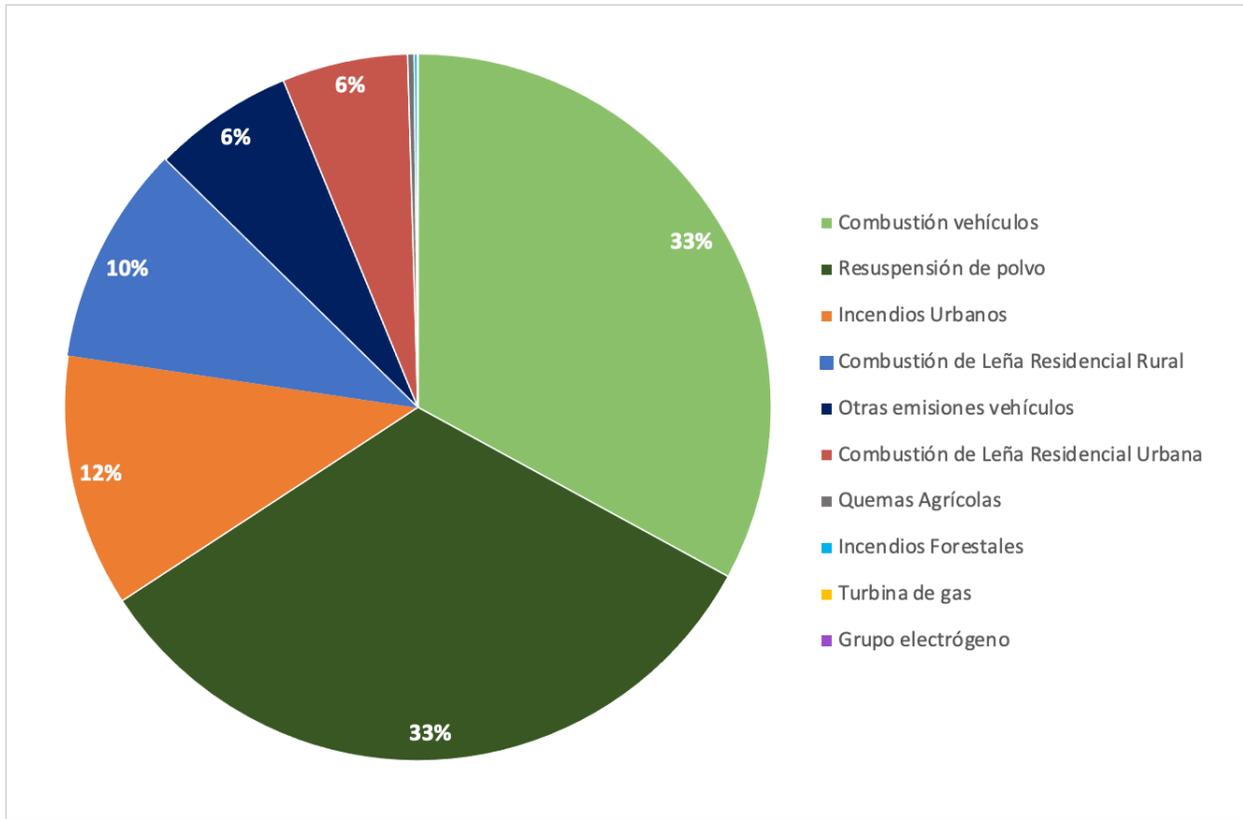


Figura 3-25 Distribución emisiones de MP10 por subcategoría, año 2021 [%]

Fuente: Elaboración propia

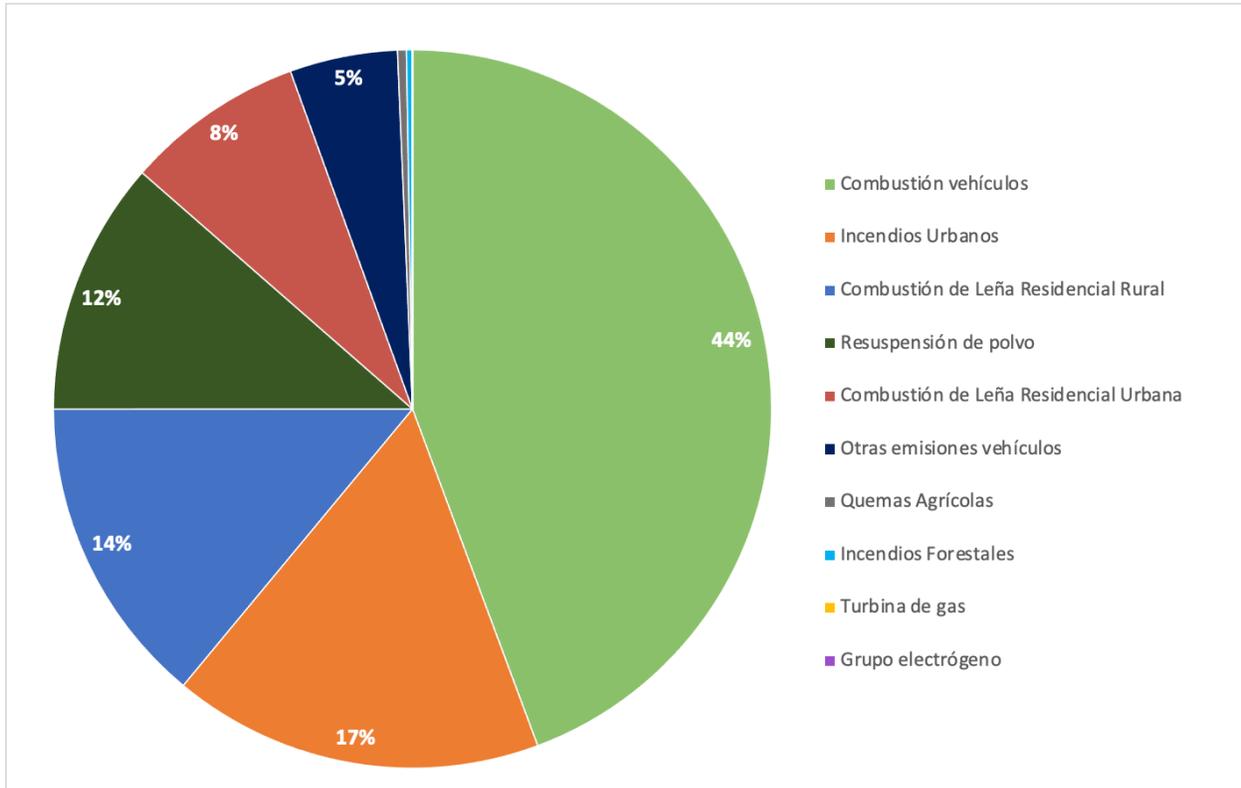


Figura 3-26 Distribución emisiones de MP2,5 por subcategoría, año 2021 [%]

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Proyección del inventario de emisiones

Para la proyección del inventario de emisiones, se realiza una recopilación de antecedentes que signifiquen una alteración en las actividades de operación normal de las instalaciones emisoras. Para aquello, se consultan las RCAs aprobadas y los antecedentes ingresados al SEIA que tengan efecto en las emisiones atmosféricas de los contaminantes pertinentes a este estudio, considerando un horizonte de evaluación de 15 años a partir de 2021³⁶, para MP10, MP2,5, sus precursores (SO_x, NO_x, NH₃ y COVs) y sustancias tóxicas, identificando nuevas fuentes y futuras ampliaciones de fuentes existentes. Adicionalmente, se incorporan aspectos como los compromisos ambientales, medidas y condiciones contenidas en las RCAs aprobadas de las distintas instalaciones consideradas en el inventario de emisiones.

En las siguientes subsecciones se presenta la metodología utilizada para la proyección del inventario de emisiones y los resultados obtenidos.

³⁶ Se escoge como año base por ser el año más actual del inventario de emisiones estimado.

3.6.2.1 Metodología para la proyección de emisiones

Se realizó una proyección de emisiones para un periodo de 15 años a partir del año base del inventario, en un escenario “*business as usual*” que no considera la implementación de compensaciones o mejoras adicionales a aquellas que puedan estar ya comprometidas por las empresas (ej. RCAs). De acuerdo con la Ecuación 3-1 presentada en la Sección 3.6.1.1, la estimación de la emisión depende del nivel de actividad, el factor de emisión y la eficiencia de abatimiento. En términos generales, la variación temporal para cada componente de la ecuación se ve influenciada por:

- NA: Cambios en el tiempo se relacionan con variaciones económicas o demográficas de la zona.
- FE o eficiencia de abatimiento: Cambios en el tiempo ocurren debido a mejoras tecnológicas, recambios o deterioro en la eficiencia de equipos.

Para proyectar las emisiones en el tiempo se proyecta el nivel de actividad (NA), factor de emisión (FE) de cada sector o fuente emisora, y su eficiencia de abatimiento. Respecto a la proyección de la eficiencia de abatimiento de las distintas fuentes, ante la falta de información respecto al deterioro natural de las fuentes, se mantendrán constantes, a excepción de casos en que existe información sobre recambios tecnológicos comprometidos. Esto último se presenta en el caso de la línea de peletización 2B de la Planta de Pellets a partir de 2022, donde el scrubber es reemplazado por un precipitador electrostático, desulfurizador húmedo y sistema SCNR, cuyas eficiencias se presentan en la Tabla 3-5.

Adicional a estos cambios, se consideran reducciones en emisiones producto del plan de descarbonización de la matriz energética, y de la incorporación de medidas comprometidas por RCA. También se consideran nuevas emisiones por potenciales nuevas fuentes, a partir de información obtenida desde el SEIA de los proyectos con RCA favorable que contemplan instalarse en la zona de estudio en los próximos años y que puedan tener algún impacto por MP.

A continuación, se detalla la metodología de proyección del nivel de actividad y del factor de emisión.

3.6.2.1.1 Proyección del Nivel de Actividad

Para aquellas fuentes que cuentan con una proyección propia desarrollada en el marco del SEIA se utiliza dicha estimación, considerando que estas ya fueron revisadas y aprobadas en el proceso de tramitación de la RCA. Para fuentes que no cuentan con una proyección establecida en las RCA, se realiza una proyección propia. Para proyectar el nivel de actividad en el tiempo se utiliza una tasa de crecimiento³⁷ anual, mediante la cual se elaboran vectores para el nivel de actividad. La proyección para cada sector se realiza de acuerdo a la siguiente ecuación, utilizando un nivel de actividad base y una tasa de crecimiento:

³⁷ La cual puede ser negativa (en ese caso sería decrecimiento).

Ecuación 3-9 Ecuación general proyección nivel de actividad

$$NA_{s,t+n} = NA_{s,t} * (1 + r_s)^n$$

Donde:

- $NA_{s,t}$: Nivel de actividad del sector “s” en el periodo “t”
- r_s : Tasa de crecimiento del nivel de actividad del sector “s”
- n : Periodos entre el nivel de actividad base y el nivel de actividad proyectado

Para determinar qué tasa de crecimiento utilizar en la proyección de los niveles de actividad sectoriales que no cuenten con RCA, el orden de preferencia entre las alternativas posibles se muestra a continuación, de mayor a menor confiabilidad:

1. Utilizar alguna proyección oficial de otro estudio del nivel de actividad o algún *proxy*³⁸ similar, tales como estudios de mercado u proyecciones de organismos oficiales como Cochilco o el INE.
2. Utilizar alguna proyección oficial del crecimiento del PIB o sector económico asociado al sector del nivel de actividad, tales como estudios elaborados por entidades como el Banco Central (Banco Central de Chile, n.d.).
3. Utilizar el crecimiento promedio de los últimos años del nivel de actividad.
4. Utilizar el crecimiento promedio de los últimos años del PIB asociado al sector económico.

Siguiendo la metodología descrita, los antecedentes utilizados para la proyección del nivel de actividad se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3-38 Referencias utilizadas para la proyección del inventario de emisiones

Tipo de fuente	Subtipo	Referencia utilizada para tasa de crecimiento
Industria hierro	Planta de Pellets	Proyección del PIB de Asia del Pacífico, ajustado a la proporción que representa la región de Atacama en la producción nacional.
Generación eléctrica	Central Termoeléctrica Guacolda	Proyección de la generación eléctrica en base a carbón, considerando el retiro de centrales a carbón al 2040 (Ministerio de Energía, 2023).
	Central Térmica Huasco	
Industria portuaria	Puerto Las Losas	Se mantiene constante por su bajo aporte en emisiones.
Transporte ferroviario	Línea férrea	Se mantiene constante por su bajo aporte en emisiones.
Otras fuentes	Combustión de Leña Residencial	Proyección viviendas por comuna y zona (urbana/rural) (INE, 2018).
	Incendios Urbanos	Proyección viviendas por comuna y zona (urbana/rural) (INE, 2018).
	Transporte en Ruta	Proyección población por comuna (INE, 2018).

Fuente: Elaboración propia

³⁸ Entiéndase *proxy* como un indicador u otra actividad con proyección similar al nivel de actividad de interés.

Respecto a las potenciales nuevas fuentes, se destacan las siguientes: el proyecto Cerro Blanco, la operación de la planta desalinizadora de Guacolda, el depósito de relaves filtrados de la Planta de Pellets, y una tercera chimenea en la Planta de Pellets aprobada por la RCA 215/2010. Para la inclusión de estas fuentes en la proyección del inventario, se utilizaron las emisiones declaradas en las RCAs correspondientes, las cuales son:

- 215/2010 - Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets
- 90/2015 - Proyecto Cerro Blanco
- 84/2018 - Planta Desalinizadora Guacolda
- 158/2021 - Depósito de Relaves Filtrados, Planta de Pellets

3.6.2.1.2 Proyección del Factor de Emisión

Los cambios en el FE se asocian a mejoras tecnológicas, recambio de equipos o deterioro de estos (que pueden estar en los compromisos de las RCAs o como respuesta ante la puesta en marcha de una norma de emisión a una fuente en particular). Comúnmente no se han proyectado ni existen lineamientos claros de cómo proyectarlos. Únicamente MODEM incorpora factores de deterioro por tipo de vehículo para el sector de transporte en ruta. Así, para la proyección se decide mantener constantes los factores de emisión, con excepción de transporte en ruta, y modificarlos solo en caso de alguna medida o situación específica que se dé dentro del contexto de la normativa que se está evaluando.

3.6.2.2 Resultado de la proyección del inventario de emisiones

A continuación, se presentan los resultados de la proyección de emisiones obtenida a partir de la metodología presentada en la sección anterior (ver Sección 3.6.2.1). Junto con el informe, se entrega la base de datos completa de la proyección del inventario de emisiones, disponible en el anexo digital “PPAHuasco2-Proyeccion_Inventario_Emissiones.xlsx”.

Es relevante mencionar que la proyección de emisiones es un ejercicio que tiene aún más incertidumbre que el inventario base. Esto, puesto que el nivel de actividad tiene una incertidumbre asociada mayor que el nivel de actividad de un inventario. En este sentido, se puede mencionar que la incertidumbre aumenta en la medida que la proyección se aleja del año base, pues es más susceptible a verse afectado por factores externos.

3.6.2.2.1 Proyección emisiones grandes fuentes

En la Tabla 3-39 y la Tabla 3-40 se presenta la proyección de emisiones de MP10 y MP2,5, respectivamente, por instalación para el periodo 2021 a 2036. De forma complementaria, en la Figura 3-27 y la Figura 3-28 se grafican estos datos. Se puede notar que las emisiones anuales generadas en Huasco disminuyen, en promedio, un 4% anual, a excepción de 2024 y 2025 en donde aumentan las emisiones. Se observa un aumento en la responsabilidad de la Planta de Pellets respecto a material particulado debido al aumento de sus emisiones, en promedio, en un 7% anual. Esto último se debe, en parte, al aumento proyectado en la industria del hierro que se

utiliza para la proyección. También se consideró como nueva fuente el depósito de relaves filtrados, cuya operación inicia el año 2024 y posee una vida útil aprobada de 8 años. Además de esto, se considera la entrada en operación de la chimenea 3 en 2025. Sin embargo, es relevante destacar que es poco probable su construcción, dada la antigüedad de su RCA y la falta de avances.

En el caso de Guacolda, a pesar de que se incluyen las emisiones que generará la planta desalinizadora, se puede notar una disminución promedio de 14% anual en sus emisiones de material particulado, explicada por el retiro gradual de centrales a carbón a 2040, comprometido a nivel país. Esto mismo explica la disminución de las emisiones generadas por la Central Térmica Huasco.

Como se explica en la Sección 3.6.2.1, debido a su baja actividad, los niveles de actividad del Puerto Las Losas y la Línea Férrea se mantienen constantes y, por consiguiente, las emisiones también. Por otro lado, se observa una potencial nueva instalación emisora de material particulado, correspondiente al Proyecto Cerro Blanco. Las emisiones de este proyecto minero iniciarían con su construcción en 2024, y su posterior operación. Sin embargo, dada la evidencia, es probable que Cerro Blanco no se construya.

Tabla 3-39 Proyección emisiones MP10 por instalación, 2021-2036 [t/año]

Instalación	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Planta de Pellets	155,50	161,40	158,80	249,22	407,26	407,70	408,14	408,59	409,04	409,49	409,92	318,12	318,45	318,91	319,36	319,82
Guacolda	184,20	168,81	165,08	157,42	128,88	104,85	102,24	89,37	66,43	53,11	46,62	40,14	33,66	27,17	20,69	16,70
Puerto Las Losas	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Central Huasco	2,37	2,17	2,06	1,99	1,63	1,35	1,31	1,15	0,85	0,68	0,60	0,52	0,43	0,35	0,27	0,21
Línea Férrea	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91
Cerro Blanco		0,00	0,00	25,54	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Total	354,78	345,09	338,66	446,87	550,66	526,79	524,59	512,00	489,22	476,17	470,04	371,66	365,43	359,32	353,21	349,63

Nota: La suma de las emisiones por instalación puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-40 Proyección emisiones M2,5 por instalación, 2021-2036 [t/año]

Instalación	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Planta de Pellets	39,97	42,87	41,64	51,13	208,84	208,95	209,07	209,18	209,30	209,41	209,53	198,94	198,95	199,06	199,18	199,30
Guacolda	58,17	53,31	52,51	51,28	41,73	33,11	32,29	28,22	20,98	16,77	14,72	12,68	10,63	8,58	6,53	5,27
Puerto Las Losas	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Central Huasco	0,24	0,22	0,21	0,20	0,16	0,14	0,13	0,12	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02
Línea Férrea	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
Cerro Blanco		0,00	0,00	6,42	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Total	100,46	98,48	96,44	111,11	252,84	244,31	243,59	239,63	232,47	228,36	226,42	213,78	211,73	209,79	207,85	206,70

Nota: La suma de las emisiones por instalación puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

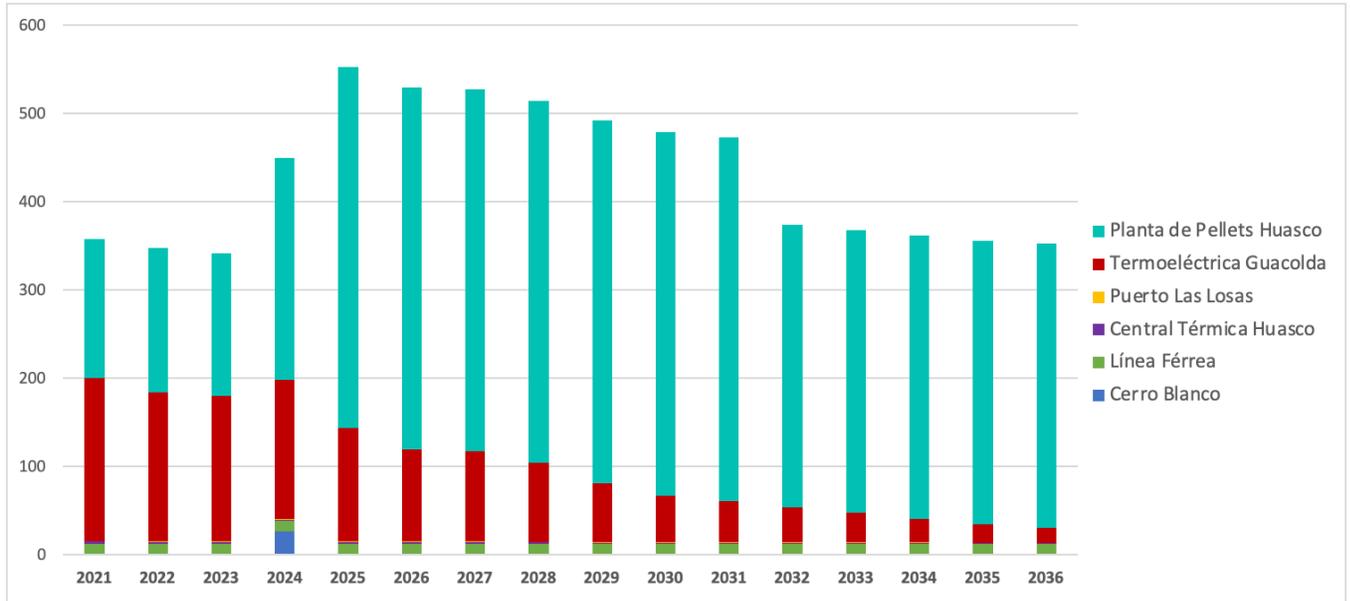


Figura 3-27 Proyección de emisiones MP10 [t/año], 2021-2036
Fuente: Elaboración propia

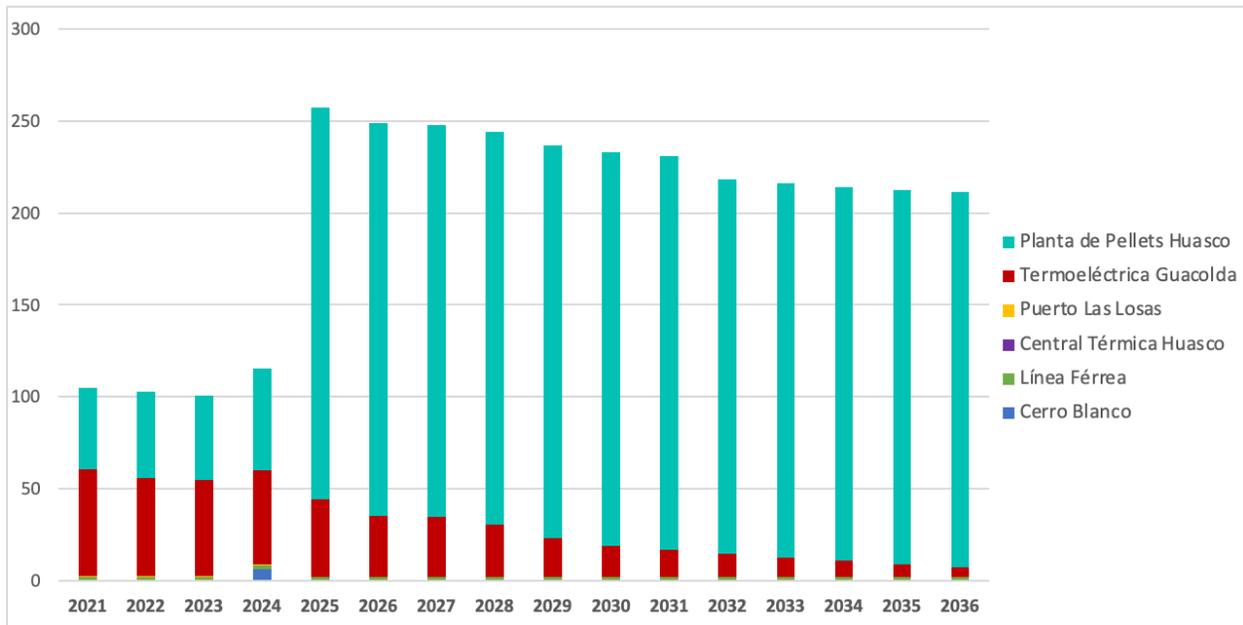


Figura 3-28 Proyección de emisiones MP2,5 [t/año], 2021-2036
Fuente: Elaboración propia

3.6.2.2.2 Proyección emisiones otras fuentes

A continuación, se presentan los resultados de la proyección de emisiones obtenida a partir de la metodología presentada en la sección anterior (ver Sección 3.6.2.1). Junto con el informe, se

entrega la base de datos completa de la proyección del inventario de emisiones, disponible en el anexo digital “PPAHUASCO2-Inventario_Emisiones_Otras_Fuentes.xlsx”.

En la Figura 3-29 se presenta la proyección de emisiones de MP10 para el periodo 2021 a 2035, en toneladas. Se observa un leve aumento para las emisiones de la categoría de transporte en ruta. Ahora bien, las emisiones provenientes de la combustión de leña e incendios urbanos irán al alza. Luego, los incendios forestales tenderían a disminuir, así como la participación de otras industrias, para este contaminante.

Respecto a las emisiones de MP2,5, en la Figura 3-30 se presenta la proyección de emisiones para el periodo 2021 a 2035, expresado en toneladas. En esta, se observa que el transporte en ruta tendrá un aumento en la proyección, así también la combustión de leña e incendios urbanos. Es relevante mencionar que en ambos casos es posible observar que esta categoría de “otras fuentes”, tienen un aporte despreciable comparado con las fuentes de grandes industrias.

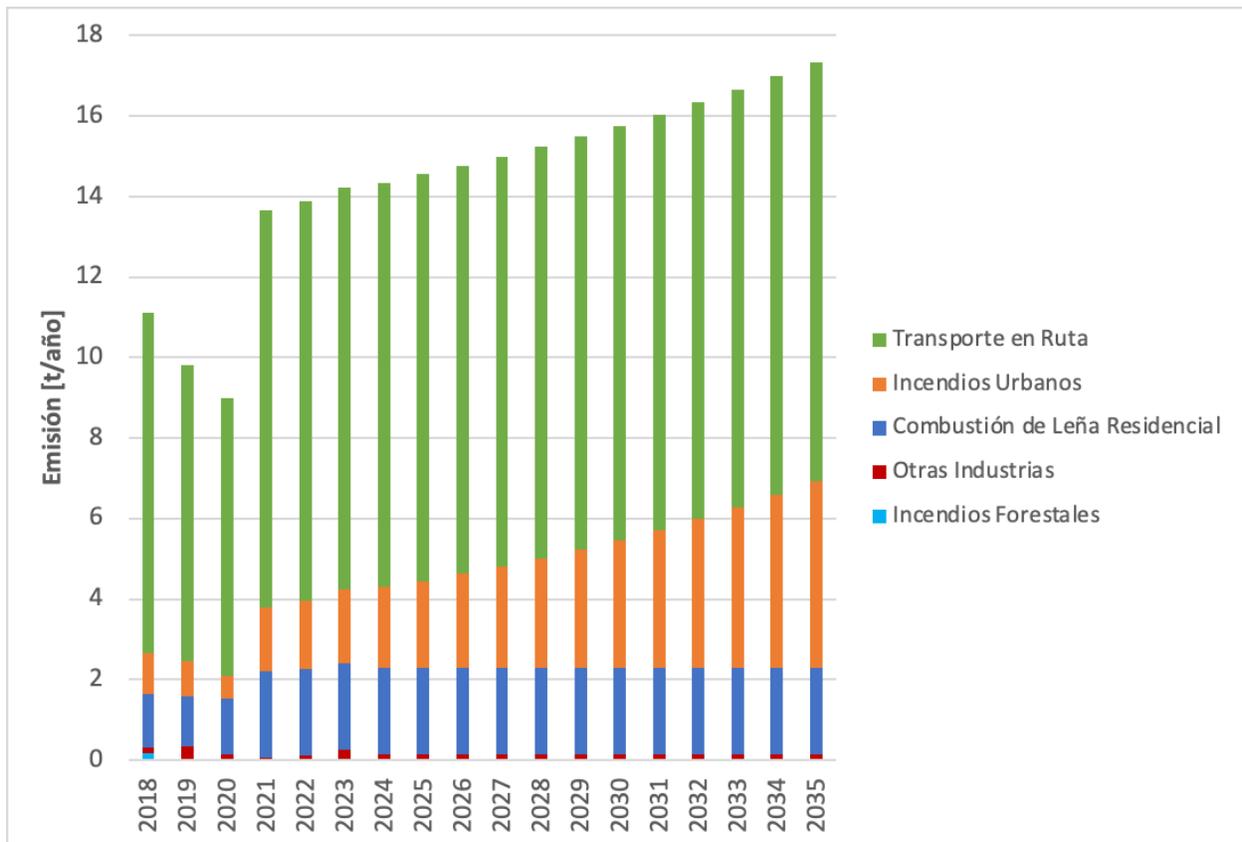


Figura 3-29 Proyección emisiones MP10 Otras fuentes [t/año], 2018-2035

Fuente: Elaboración propia

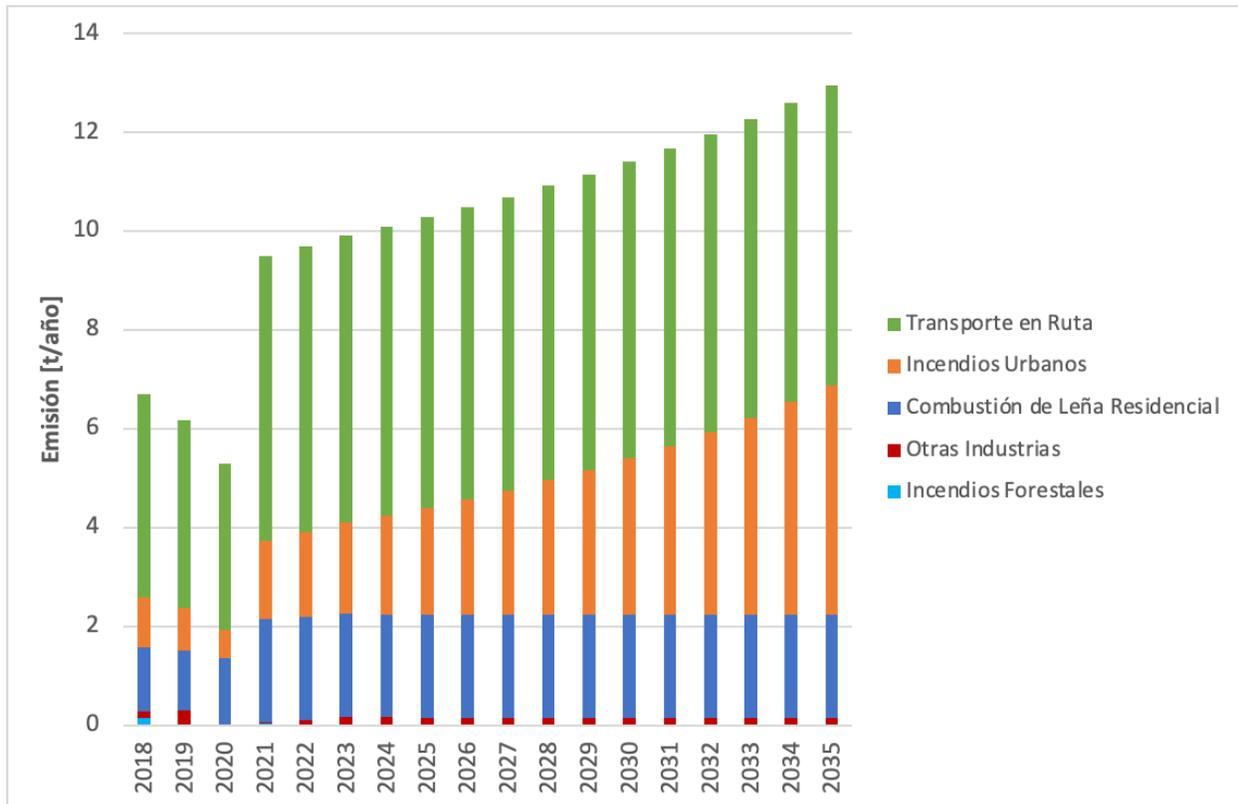


Figura 3-30 Proyección emisiones MP2,5 Otras fuentes [t/año], 2018-2035

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Comparación del inventario de emisiones actualizado y el inventario utilizado en la elaboración del anteproyecto del PPA Huasco

El inventario de emisiones actualizado en el presente estudio fue comparado con el inventario utilizado como antecedente para la elaboración del anteproyecto del PPA Huasco (2015), con el propósito de detectar y estudiar las causas de variaciones en las emisiones. Para esto, el análisis se realizó identificando las fuentes, variaciones en las emisiones anuales estimadas y sus posibles causas, tal como la eficiencia de nuevos sistemas de abatimiento, disminución en la producción de las fuentes industriales, mantenencias, entre otras. El anteproyecto del PPA Huasco presenta las emisiones estimadas para el año 2013 y proyectadas para los años 2020 y 2025, por lo que se contrastaron los resultados del año 2020.

La Tabla 3-41 presenta la comparación de las emisiones estimadas en el contexto del anteproyecto del PPA y en el presente estudio para el año 2020, desagregadas por categoría de la fuente (fijas o móviles), tipo de emisión (combustión o fugitivas) y por instalación, considerando las dos grandes fuentes de Huasco y el Puerto Las Losas. A nivel general, se puede observar que la distribución de las emisiones entre las instalaciones responsables es consistente

al comparar ambos inventarios, siendo la Planta de Pellets el mayor responsable de las emisiones de material particulado, mientras que Guacolda es la principal emisora de SOx y NOx.

Se puede notar que el inventario actualizado presenta emisiones mucho menores para fuentes fijas de combustión, lo que puede explicarse por los sistemas de abatimiento altamente eficientes que están implementados en las chimeneas y que, en la elaboración del anteproyecto, no fueron considerados para la proyección, correspondientes a precipitador electrostático y/o filtros de manga para el abatimiento de MP, desulfurizador para SOx y SNCR/SCR para NOx. Se espera que las emisiones continúen disminuyendo debido a que, a final del año 2021, se incorporaron mejores sistemas de abatimiento en la chimenea 2B de la Planta de Pellets. Adicionalmente, el anteproyecto asume que efectivamente se llevó a cabo la Fase 2 del proyecto de la Planta de Pellets aprobado por la RCA 215/2010, que incluye la operación de una tercera chimenea, sin embargo, actualmente esta no ha iniciado su construcción.

En el caso de las fuentes fijas fugitivas que incluyen el manejo de material, correas transportadoras y erosión eólica, más del 90% de las emisiones de material particulado son responsabilidad de la Planta de Pellets en ambos inventarios. Además, las emisiones de MP estimadas en el presente estudio son consistentes con las proyectadas en el anteproyecto para la Planta de Pellets, aunque menores. Esto último puede explicarse, por ejemplo, por el encapsulamiento de las correas transportadoras que permiten mitigar las emisiones de MP. También, parte de la disminución se asocia a mejoras en el acopio de materiales, al someterlos a humectación constante mediante aspersores, en el caso de la cancha de carbón en Guacolda.

En cuanto a las fuentes móviles, las emisiones actualizadas son mayores en el caso de la combustión ya que, a diferencia del anteproyecto, incluyen la combustión de maquinaria, lo que representa gran parte de las emisiones de esta categoría. También se observa que las emisiones generadas por fuentes móviles fugitivas son menores en el inventario actualizado, debido a la pavimentación de gran parte de los caminos utilizados en la Planta de Pellets y Guacolda. En el caso de los caminos internos no pavimentados, actualmente todos son tratados con bischofita para controlar la resuspensión de polvo.

Complementario a todo lo anterior, es relevante destacar que el inventario elaborado en el contexto del anteproyecto del PPA tiene como año base el 2013, por lo que su antigüedad puede explicar parte de las diferencias. En esta línea, factores externos pueden haber incidido en que las emisiones, a nivel general, hayan sido menores a las proyectadas por dicho estudio.

Tabla 3-41 Comparación inventario de emisiones de anteproyecto PPA e inventario de emisiones actualizado, año 2020 [t/año]

Categoría Fuente	Tipo Emisión	Instalación	Inventario Anteproyecto PPA				Inventario Actualizado			
			MP10	MP2,5	SOx	NOx	MP10	MP2,5	SOx	NOx
Fuentes Fijas	Combustión	Planta de Pellets	1.446	547	1.701	1.075	134,86	50,53	195,80	235,94

Categoría Fuente	Tipo Emisión	Instalación	Inventario Anteproyecto PPA				Inventario Actualizado			
			MP10	MP2,5	SOx	NOx	MP10	MP2,5	SOx	NOx
Fuentes Móviles	Fugitivas	Guacolda	919	348	8.469	7.535	147,61	54,62	3.513,23	3.969,07
		Planta de Pellets	692	220	0	0	96,65	15,97	0	0
		Guacolda	33	5	0	0	9,10	1,35	0	0
		Puerto Las Losas	9	1	0	0	0,16	0,03	0	0
	Combustión	Planta de Pellets	1,06	0,95	0,04	40,91	10,38	10,38	54,89	137,73
		Guacolda	0,14	0,12	0,02	4,79	3,49	3,49	79,14	16,60
		Puerto Las Losas	0,01	0,01	0	0,27	0,20	0,20	30,67	3,22
Fugitivas	Planta de Pellets	23	4	0	0	5,08	1,23	0	0	
	Guacolda	42	4	0	0	38,60	4,09	0	0	
	Puerto Las Losas	0	0	0	0	1,50	0,15	0	0	
Total			3.164,21	1.130,08	10.170,06	8.655,97	447,63	142,04	3.873,73	4.362,55

Nota: La suma de las emisiones por instalación puede ser distinta del total por redondeo de decimales.

Fuente: Elaboración propia

3.7 Determinación del aporte de las distintas fuentes emisoras en la calidad del aire, para los contaminantes MP10 y MP2,5

En la presente sección se detalla la determinación del aporte de las distintas fuentes emisoras en la calidad del aire de la zona para los contaminantes MP10 y MP2,5 y meteorología, llevado a cabo por medio de las subactividades descritas a continuación.

3.7.1 Análisis de la evolución de la calidad del aire para el MP10 y MP2,5 y meteorología

Se analizó la evolución de la calidad del aire para el MP10 y MP2,5 y meteorología, desde el momento de dictación del PPA Huasco (D.S. N° 38/2016, del MMA), con el propósito de conocer su estado y evolución en el área de estudio.

3.7.1.1 Calidad del aire

Se realizó una recopilación de la información histórica disponible de las concentraciones de MP10 y MP2,5 entre el año 2016 y 2022 en la plataforma del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA). Desde el SINCA se obtienen datos de MP2,5 para las estaciones 21 de Mayo, EME F, EME M y Huasco Sivica, y de MP10 en la estación 21 de Mayo, complementado con las fiscalizaciones

registradas hasta 2021 en el SNIFA para las estaciones EME F, EME M y Huasco II. Todas las estaciones mencionadas se encuentran en la zona urbana de Huasco, y su ubicación geográfica se muestra en la Figura 3-31.



Figura 3-31 Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la zona de Huasco
Fuente: (GreenLabUC, 2014)

Las concentraciones históricas diarias desde el año 2016 a 2022 de los contaminantes analizados fueron compiladas en una base de datos en Excel que queda a disposición de la contraparte en el Anexo Digital “PPAHusco2 – MP10_MP2.5.xlsx”. En la Tabla 3-42 se presenta la cantidad de datos de MP10 y MP2,5 con los que se cuenta por año, para cada una de las estaciones de monitoreo. Respecto al contaminante MP2,5, se puede notar que en los años 2016 y 2017 solo existe registro público en la estación Huasco Sivica, en las estaciones 21 de Mayo, EME F y EME M hay registro a partir del mes de agosto de 2018. Los años siguientes se obtienen mediciones diarias todos los meses, a excepción del último año con datos, correspondiente al recién pasado 2022, en el cual se registran mediciones públicas hasta el mes de agosto.

En cuanto al MP10, la información obtenida desde el SNIFA registra a partir de 2016 concentraciones cada tres días debido a la medición con equipos gravimétricos, reflejado en una menor cantidad de datos disponibles. Además, hay días en que los datos registrados se invalidaron, principalmente por no cumplir el tiempo mínimo de muestreo, por exceso de tiempo de muestreo o por falla general del equipo.

Tabla 3-42 Cantidad de datos de MP10 y MP2,5, por año y estación de monitoreo

Año	MP10				MP2,5			
	Estación 21 de Mayo	Estación EME F	Estación EME M	Estación Huasco II	Estación 21 de Mayo	Estación EME F	Estación EME M	Estación Huasco Sívica
2016	0	122	122	119	0	0	0	366
2017	0	121	120	121	0	0	0	364
2018	118	119	117	120	118	129	124	365
2019	361	94	99	115	361	281	307	365
2020	347	121	122	91	347	366	365	366
2021	365	119	122	115	365	363	364	365
2022	182	0	0	0	182	219	214	219

Fuente: Elaboración propia

El análisis realizado incluye las métricas consideradas en las normas de calidad del aire para MP10 y MP2,5 establecidas en el Decreto N° 12/2021 y Decreto N° 12/2011 del MMA, respectivamente, y se presentan en la Tabla 3-43. En esta, se detalla el valor máximo junto con el periodo, y las condiciones de superación que se aplican a las concentraciones registradas en cualquier estación monitorea calificada como EMRP.

Tabla 3-43 Límites de concentración en normas de calidad primaria para MP10 y MP2,5

Contaminante	Valor Norma [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$]	Periodo	Criterio excedencia
MP10	50	Anual	Promedio tri-anual de las concentraciones anuales, es mayor o igual al valor.
	130	24 horas	a. Percentil 98 de las concentraciones de 24 horas en un año, es mayor o igual al valor. b. Si antes que concluya un año, el número de días con mediciones sobre el valor es mayor que siete.
MP2,5	20	Anual	Promedio tri-anual de las concentraciones anuales es mayor al valor.
	50	24 horas	Percentil 98 de las concentraciones de 24 horas en un año, es mayor al valor.

Fuente: Elaboración propia

Como se ha mencionado anteriormente, la localidad de Huasco fue declarada zona latente por norma anual de MP10 en el D.S. N°40/2011 (MMA, 2012b). Con el propósito de evaluar el estado actual de la zona respecto a este aspecto, la Figura 3-32 presenta el promedio tri-anual de las concentraciones anuales de MP10 registradas en las distintas estaciones. Es decir, en el caso del año 2018, los valores presentados corresponden al promedio de las concentraciones de los años 2016, 2017 y 2018, por cada estación que cuenta con datos en esos años. Además, se muestra el valor máximo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ definido por la norma anual, y el límite de latencia, correspondiente al 80% del valor de la norma. Se puede notar que, actualmente, la localidad de Huasco cuenta con concentraciones de MP10 menores a las que la llevaron a ser declarada zona latente en el 2011. Esto ocurre para todo el periodo analizado a partir de la aplicación del PPA de Huasco, lo que refleja una relación entre el instrumento y la reducción de las concentraciones.

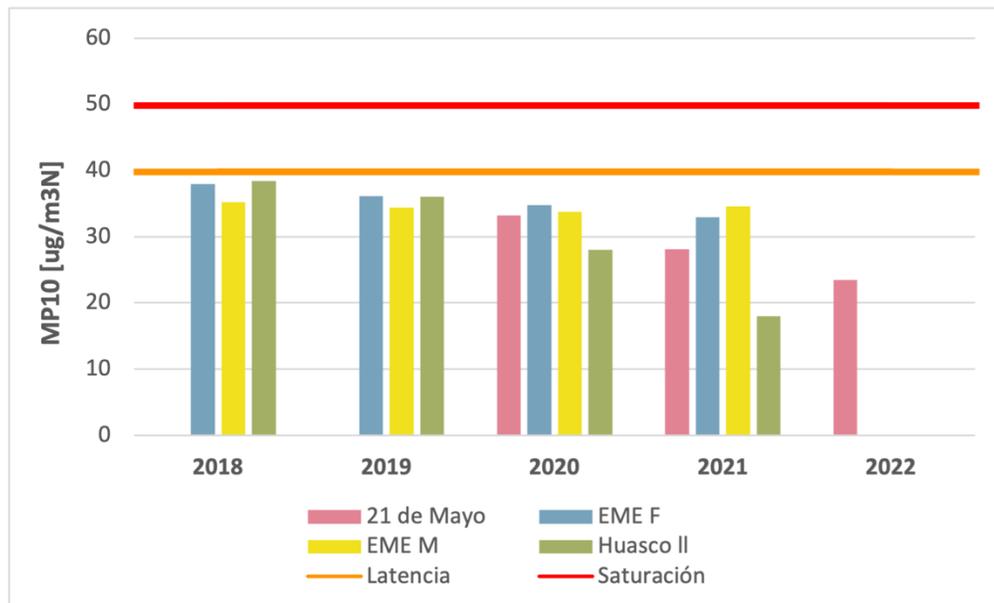


Figura 3-32 Promedio tri-anual de las concentraciones anuales de MP10

Fuente: Elaboración propia

A partir de la información recopilada, en las secciones siguientes se analiza la evolución de las concentraciones históricas de MP10 y MP2,5 en cada una de las estaciones de monitoreo.

3.7.1.1.1 Estación 21 de Mayo

La estación 21 de Mayo, perteneciente a Guacolda, realiza mediciones horarias para MP10 y MP2,5. En la Figura 3-33 se presenta la evolución de la concentración diaria de MP10 y en la Figura 3-34 la concentración de MP2,5. El detalle de los estadígrafos utilizados para la elaboración de los gráficos se resumen en la Tabla 3-44 y Tabla 3-45 para cada contaminante. En el periodo 2018 hasta 2022 se puede observar que existe una tendencia a la baja en las concentraciones, tanto de MP10 como de MP2,5. Las concentraciones medianas de MP10 se encuentran en un rango de 21 a 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, y de 7 a 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP2,5. Además, es posible notar que la concentración diaria máxima de MP10 es de 155 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y se registra en el primer día de agosto del año 2019. El mismo día se registra la concentración máxima de MP2,5 con un valor aproximado de 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

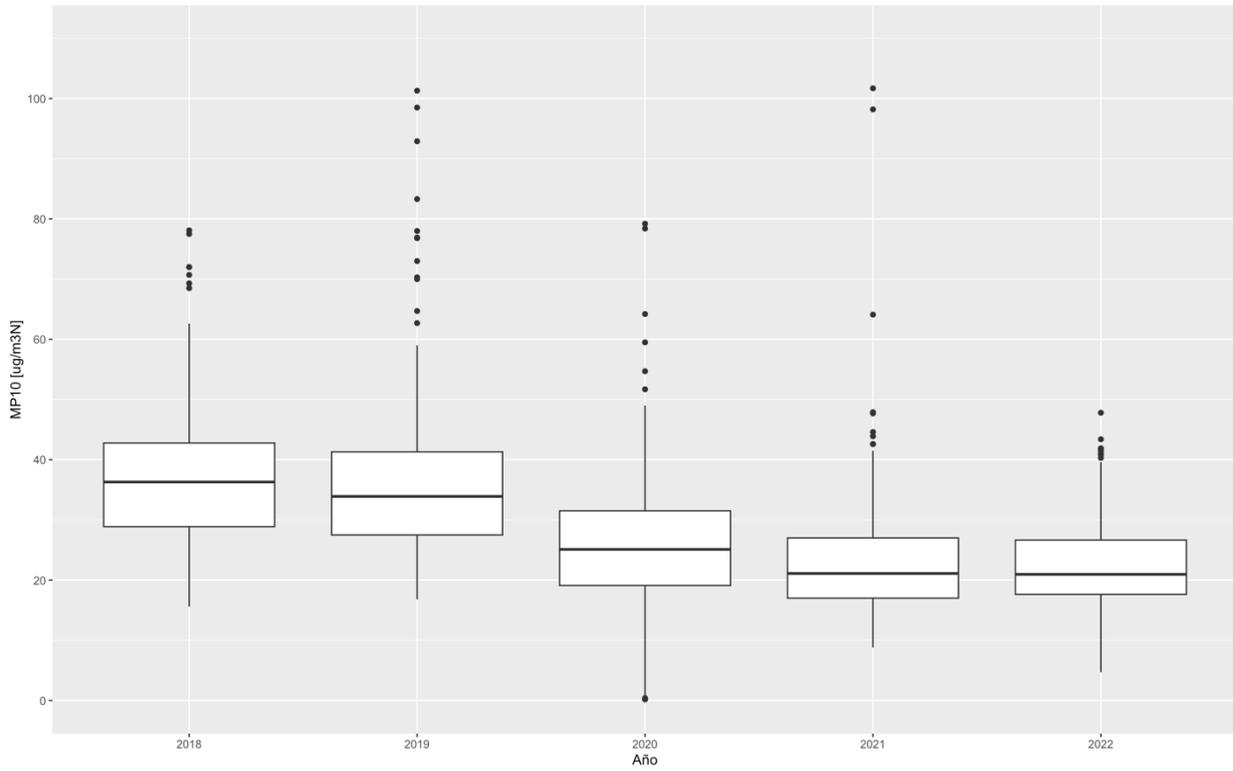


Figura 3-33 Concentraciones de MP10 en estación de monitoreo 21 de Mayo

Fuente: Elaboración propia

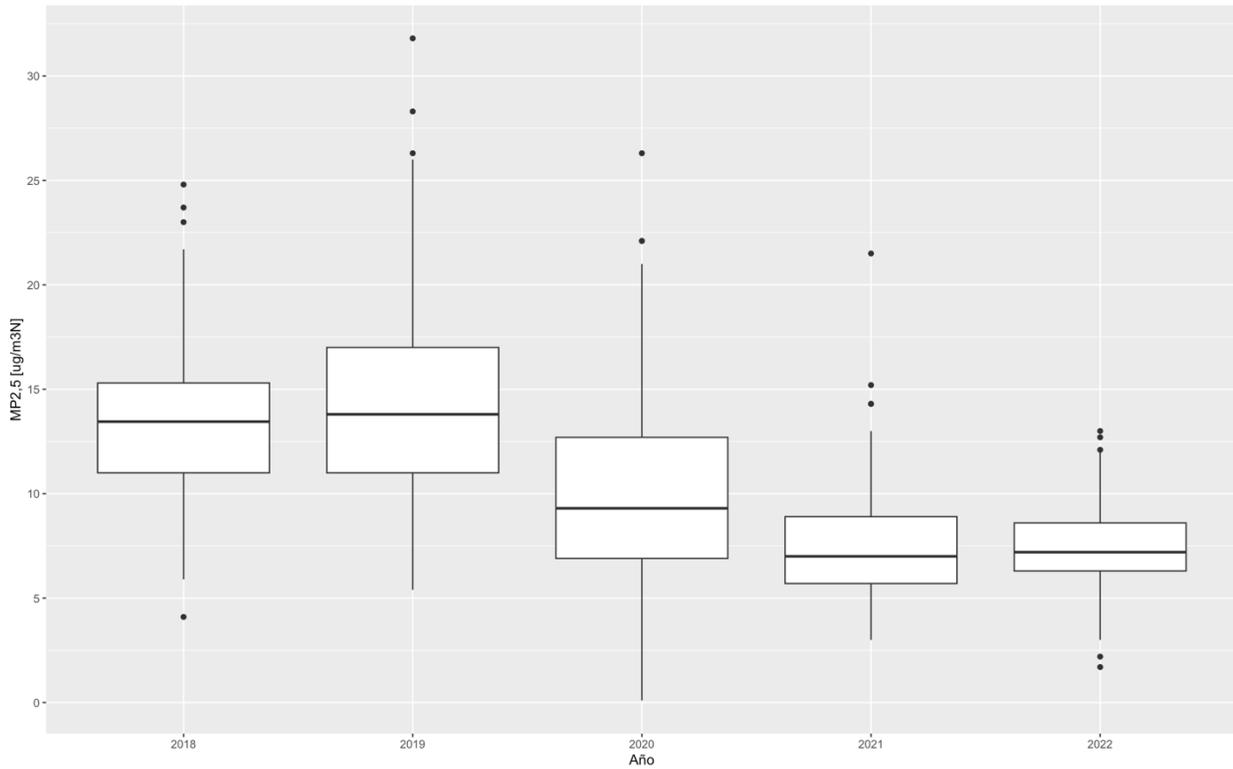


Figura 3-34 Concentraciones de MP2,5 en estación de monitoreo 21 de Mayo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-44 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m³N] en estación 21 de Mayo

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2016	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	-	-
2018	78,1	42,8	36,3	37,9	28,9	15,6
2019	154,7	41,3	33,9	36,2	27,5	16,8
2020	79,2	31,5	25,1	25,4	19,1	0,2
2021	101,7	27,0	21,1	22,6	17,0	8,8
2022	47,8	26,7	21,0	22,4	17,6	4,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-45 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m³N] en estación 21 de Mayo

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2016	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	-	-
2018	24,8	15,3	13,5	13,6	11,0	4,1
2019	31,8	17,0	13,8	14,3	11,0	5,4

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2020	26,3	12,7	9,3	9,8	6,9	0,1
2021	21,5	8,9	7,0	7,4	5,7	3,0
2022	13,0	8,6	7,2	7,4	6,3	1,7

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.1.2 Estación EME F

La estación EME F pertenece a la central termoeléctrica Guacolda, se encuentra ubicada en el sector de la Compañía del Cuerpo de Bomberos de Huasco, y cuenta con representatividad poblacional según la resolución exenta N° 1.179 de 2002 del Servicio de Salud de la Región de Atacama. En la Figura 3-35 y Figura 3-36 se muestra el comportamiento de las concentraciones diarias históricas de MP10 entre 2016 y 2021, y de MP2,5 entre 2018 y 2022, respectivamente. El detalle de los estadígrafos se resume en la Tabla 3-46 y Tabla 3-47.

Es posible notar que las concentraciones de MP10 tienden a disminuir levemente en el periodo registrado, aunque no se refleja una tendencia muy clara, como sí ocurre con las concentraciones de MP2,5 que aumentan en el tiempo. Adicionalmente, las concentraciones medianas de MP10 se encuentran en un rango acotado entre de 29 y 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, mientras que en el caso de MP2,5 estas van desde 10 a 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Respecto a las concentraciones diarias máximas de MP10, los valores están entre 86 y 415 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, donde el máximo fue registrado el 19 de agosto de 2016 y se encuentra muy por encima del rango promedio de mediciones. El contaminante MP2,5 presenta concentraciones diarias máximas en un rango entre 23 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, esta última registrada en febrero del año 2020.

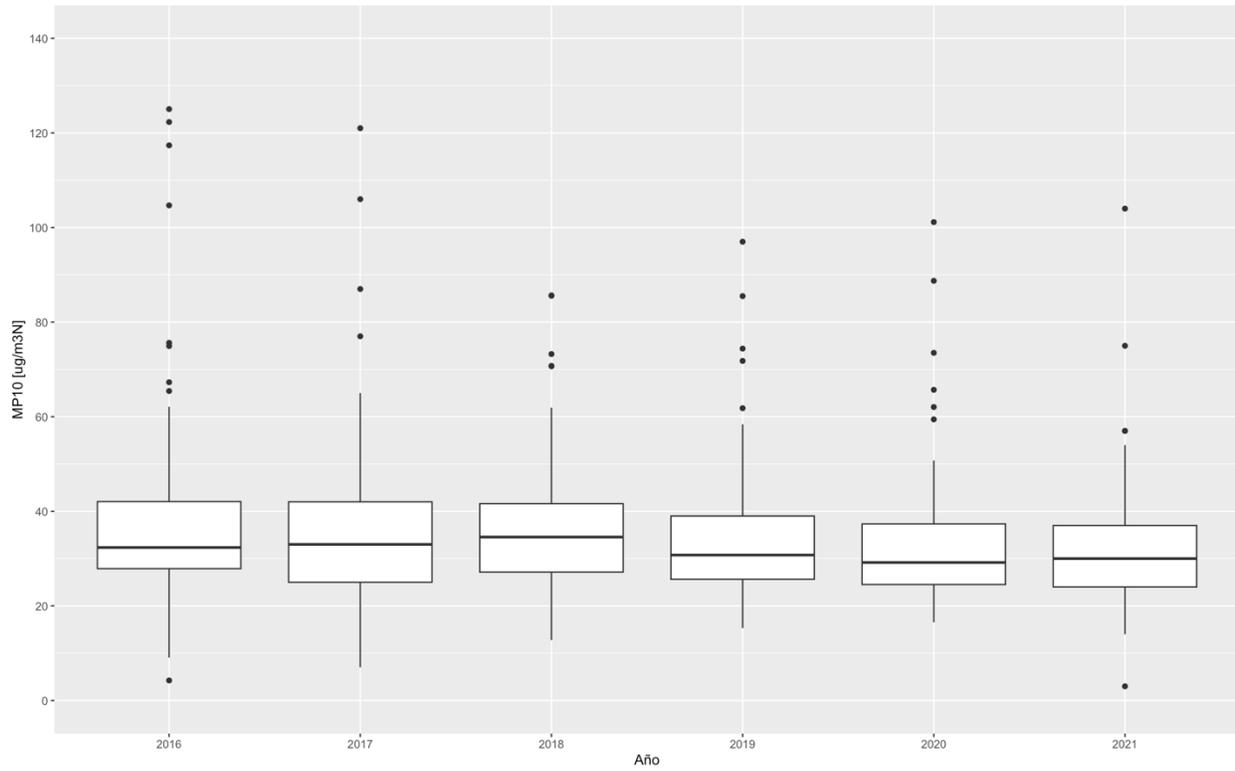


Figura 3-35 Concentraciones de MP10 en estación de monitoreo EME F

Fuente: Elaboración propia

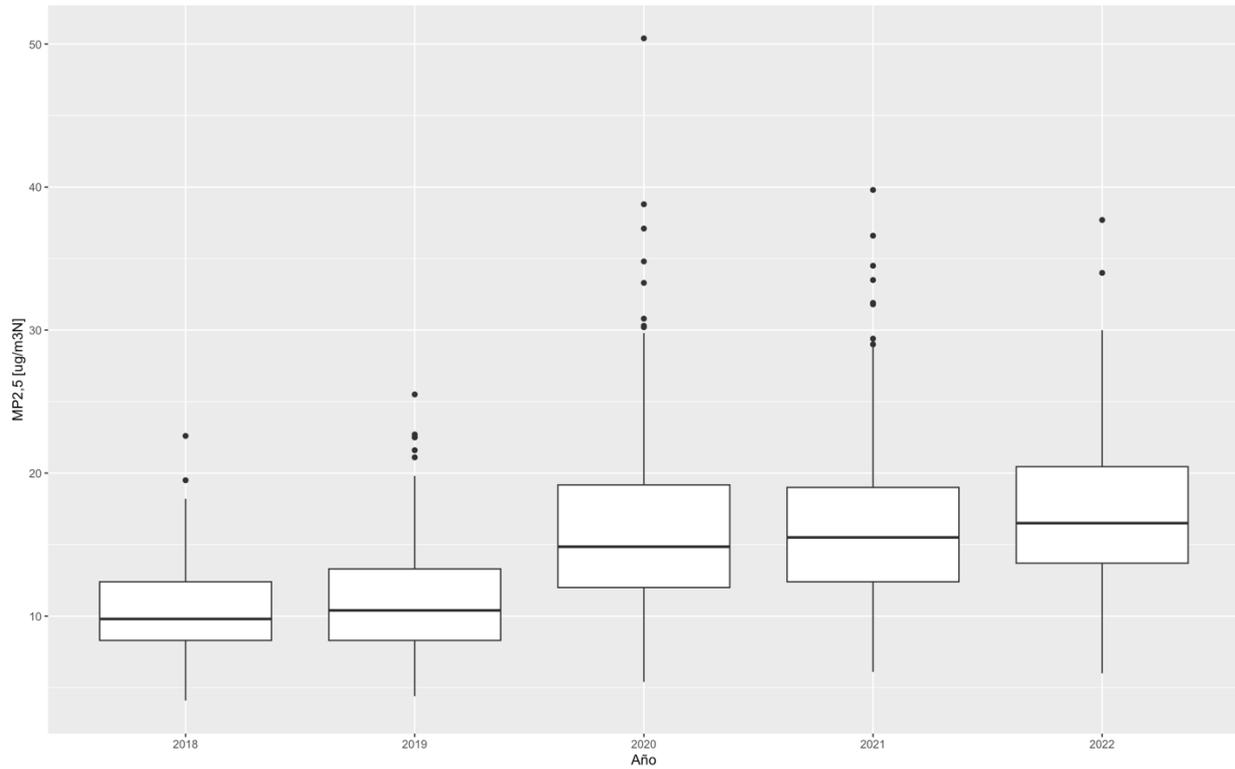


Figura 3-36 Concentraciones de MP2,5 en estación de monitoreo EME F

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-46 Estadígrafos concentraciones de MP10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] en estación EME F

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2016	415,3	42,8	32,8	40,4	27,9	4,2
2017	121,0	42,0	33,0	36,8	25,0	7,0
2018	85,6	41,6	34,6	36,5	27,1	12,8
2019	97,0	39,0	30,8	34,9	25,6	15,3
2020	101,1	37,3	29,2	32,8	24,5	16,5
2021	104,0	37,0	30,0	31,2	24,0	3,0
2022	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-47 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] en estación EME F

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2016	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	-	-
2018	22,6	12,4	9,8	10,4	8,3	4,1
2019	25,5	13,3	10,4	11,1	8,3	4,4

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2020	50,4	19,2	29,2	32,8	24,5	16,5
2021	39,8	19,0	15,5	16,3	12,4	6,1
2022	37,7	20,5	16,5	17,1	13,7	6,0

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.1.3 Estación EME M

Esta estación está ubicada en el sector de la escuela José Miguel Carrera de Huasco y, al igual que la estación anterior, pertenece a la central termoeléctrica Guacolda y cuenta con representatividad poblacional. En la Figura 3-37 y Figura 3-38 se muestran las concentraciones registradas por año de los contaminantes MP10 para el periodo 2016-2021 y MP2,5 para el periodo 2018-2022, respectivamente. De forma complementaria, se presentan los estadígrafos en la Tabla 3-48 y Tabla 3-49. Se observa que el contaminante MP10 no presenta una tendencia clara, mientras que las concentraciones de MP2,5 reflejan una disminución en el periodo evaluado. Las concentraciones medianas de MP10 se encuentran entre 30 y 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, y las concentraciones diarias máximas registran un valor fuera del rango promedio de 299 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ el día 19 de agosto de 2016. Las concentraciones medianas de MP2,5 van desde 7 a 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, y la concentración diaria máxima de todo el periodo se registró en enero de 2020 con un valor de 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

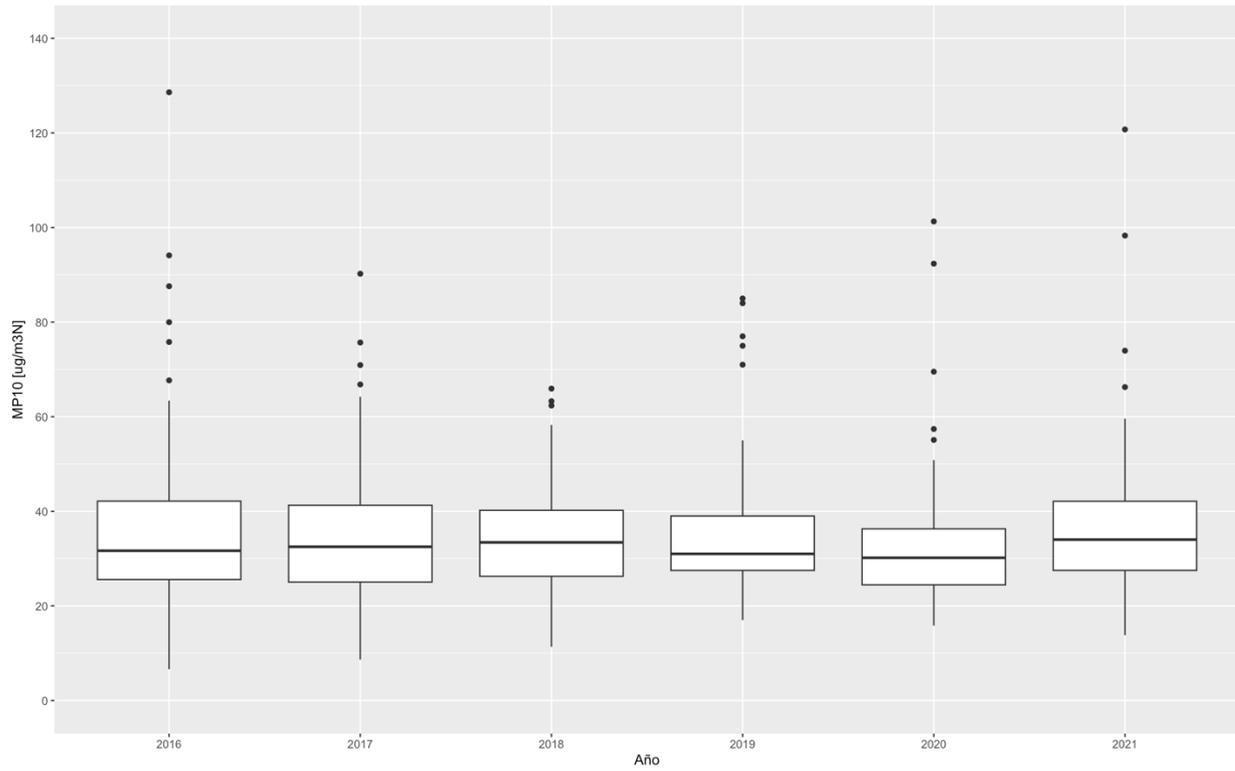


Figura 3-37 Concentraciones de MP10 en estación de monitoreo EME M

Fuente: Elaboración propia

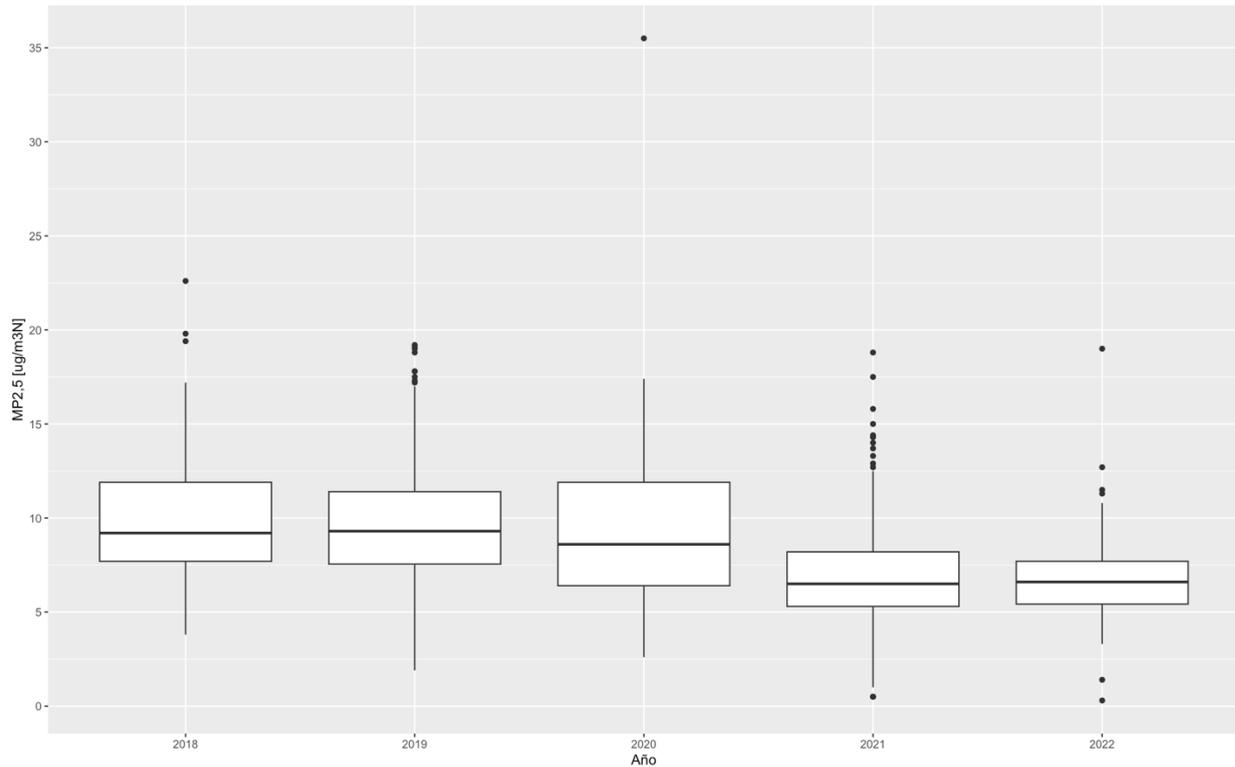


Figura 3-38 Concentraciones de MP2,5 en estación de monitoreo EME M

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-48 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m³N] en estación EME M

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2016	299,3	42,4	31,7	37,3	25,6	6,6
2017	90,2	41,3	32,5	34,4	25,0	8,6
2018	65,9	40,2	33,4	34,0	26,3	11,4
2019	85,0	39,0	31,0	34,8	27,5	17,0
2020	101,3	36,3	30,2	32,3	24,5	15,8
2021	120,7	42,1	34,0	36,5	27,5	13,8
2022	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-49 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m³N] en estación EME M

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2016	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	-	-
2018	22,6	11,9	9,2	10,0	7,7	3,8
2019	19,2	11,4	9,3	9,7	7,6	1,9

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2020	35,5	11,9	8,6	8,9	6,4	2,6
2021	18,8	8,2	6,5	6,9	5,3	0,5
2022	19,0	7,7	6,6	6,8	5,4	0,3

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.1.4 Estación Huasco Sívica

Como se mencionó en un inicio, la estación Huasco Sívica solo realiza monitoreo de MP2,5, realizando mediciones horarias para el periodo entre 2016 y agosto de 2022. Las concentraciones diarias registradas se visualizan por año en la Figura 3-39, en donde se puede notar que, si bien hacia el año 2018 hay un leve aumento de las concentraciones, luego se observa una tendencia a la baja. Las concentraciones medianas se presentan en un rango de 7 a 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, y la concentración diaria máxima se alcanza el 5 de agosto de 2017, con un valor atípico de 117 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Al igual que en las estaciones anteriores, se presenta el detalle de los estadígrafos en la Tabla 3-50.

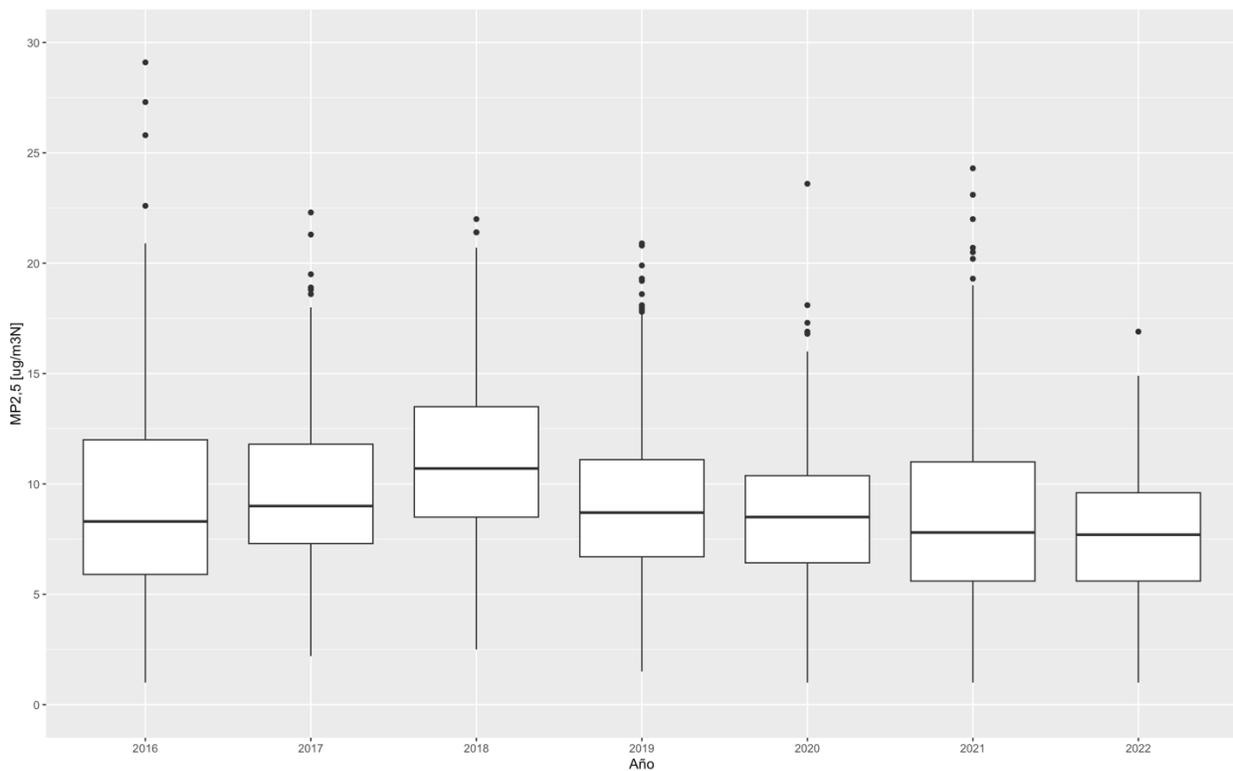


Figura 3-39 Concentraciones de MP2,5 en estación de monitoreo Huasco Sívica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-50 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] en estación Huasco Sívica

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2016	29,1	12,0	8,3	9,2	5,9	1,0
2017	116,6	11,8	9,2	9,9	7,3	2,2
2018	22,0	13,5	10,7	11,1	8,5	2,5
2019	20,9	11,1	8,7	9,2	6,7	1,5
2020	23,6	10,4	8,5	8,6	6,4	1,0
2021	24,3	11,0	7,8	8,7	5,6	1,0
2022	16,9	9,6	7,7	7,7	5,6	1,0

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.1.5 Estación Huasco II

Huasco II está declarada como estación de monitoreo con representatividad poblacional y es propiedad de CAP. La estación registra las concentraciones de MP10 cada tres días entre los años 2016 y 2021, como se muestra en la Figura 3-40, donde se refleja una tendencia a la baja. Se observa que la concentración máxima diaria registrada es de $161 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y fue medida a finales del mes de diciembre del año 2016, valor que resulta alejado de las concentraciones medianas que se encuentran en un rango de 24 a $38 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. La Tabla 3-51 resume los estadígrafos de las concentraciones medidas.

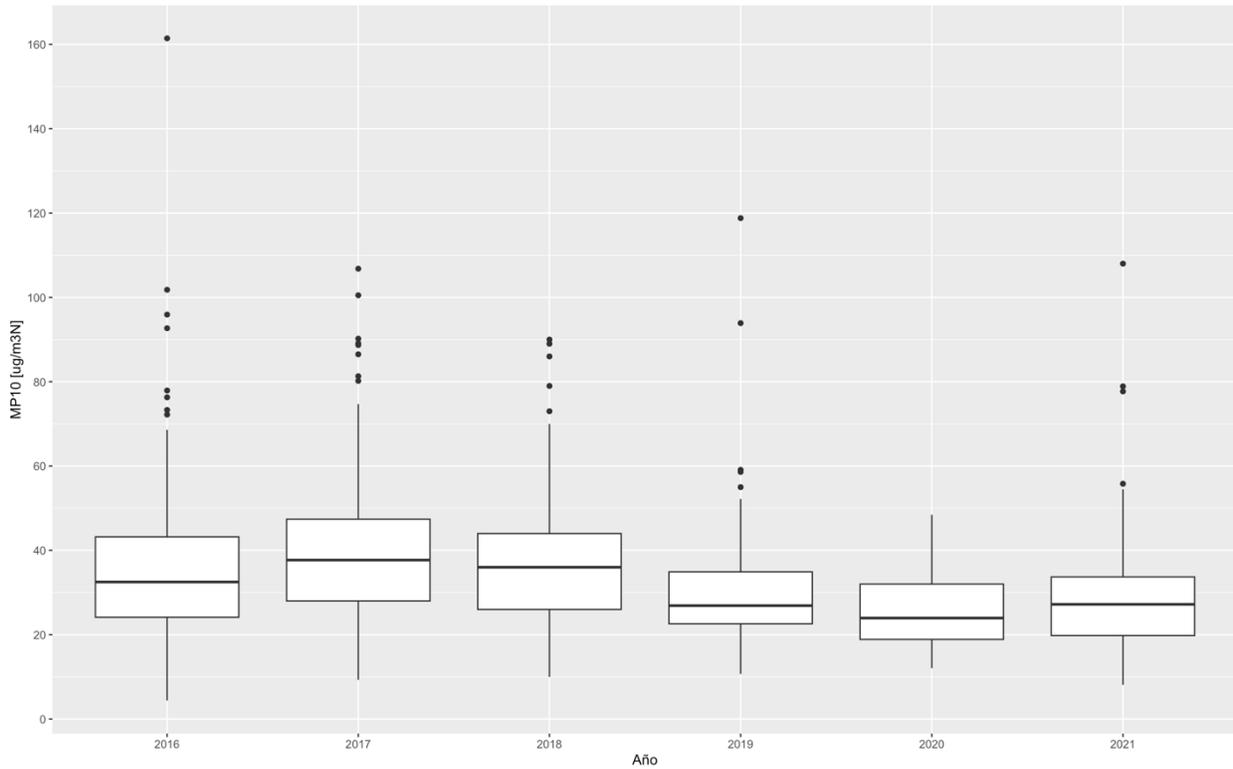


Figura 3-40 Concentraciones de MP10 en estación de monitoreo Huasco II

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-51 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m³N] en estación Huasco II

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2016	161,4	43,2	32,5	37,1	24,1	4,4
2017	106,8	47,4	37,7	41,2	28,0	9,3
2018	90,0	44,0	36,0	36,9	26,0	10,0
2019	118,8	34,9	26,9	30,0	22,6	10,7
2020	48,4	32,0	23,9	25,8	18,9	12,1
2021	108,0	33,7	27,2	28,3	19,8	8,1
2022	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.2 Meteorología observada en la zona

Se realizó una recopilación de la información histórica disponible en el SINCA entre el año 2016 y comienzos del 2023 de seis estaciones meteorológicas: Huasco Sivica, Huasco II, EME F, EME ME, SM4 y SM8. Las ubicaciones geográficas de estas estaciones se detallan en la Tabla 3-52 junto con las variables meteorológicas que poseen datos en cada una, y se presentan en la Figura 3-41.

Tabla 3-52 Variables meteorológicas medidas por estación

Estación	UTM E [m]	UTM N [m]	Variable meteorológica
Huasco Sivica	282.686	6.848.726	Dirección del viento
			Velocidad del viento
			Temperatura
			Humedad relativa
Huasco II	281.653	6.849.248	Dirección del viento
			Velocidad del viento
EME F	282.520	6.849.122	Dirección del viento
			Velocidad del viento
EME ME	282.774	6.848.697	Dirección del viento
			Velocidad del viento
			Temperatura
			Humedad relativa
SM4	287.841	6.847.571	Dirección del viento
			Velocidad del viento
SM8	296.289	6.844.810	Dirección del viento
			Velocidad del viento

Fuente: Elaboración propia

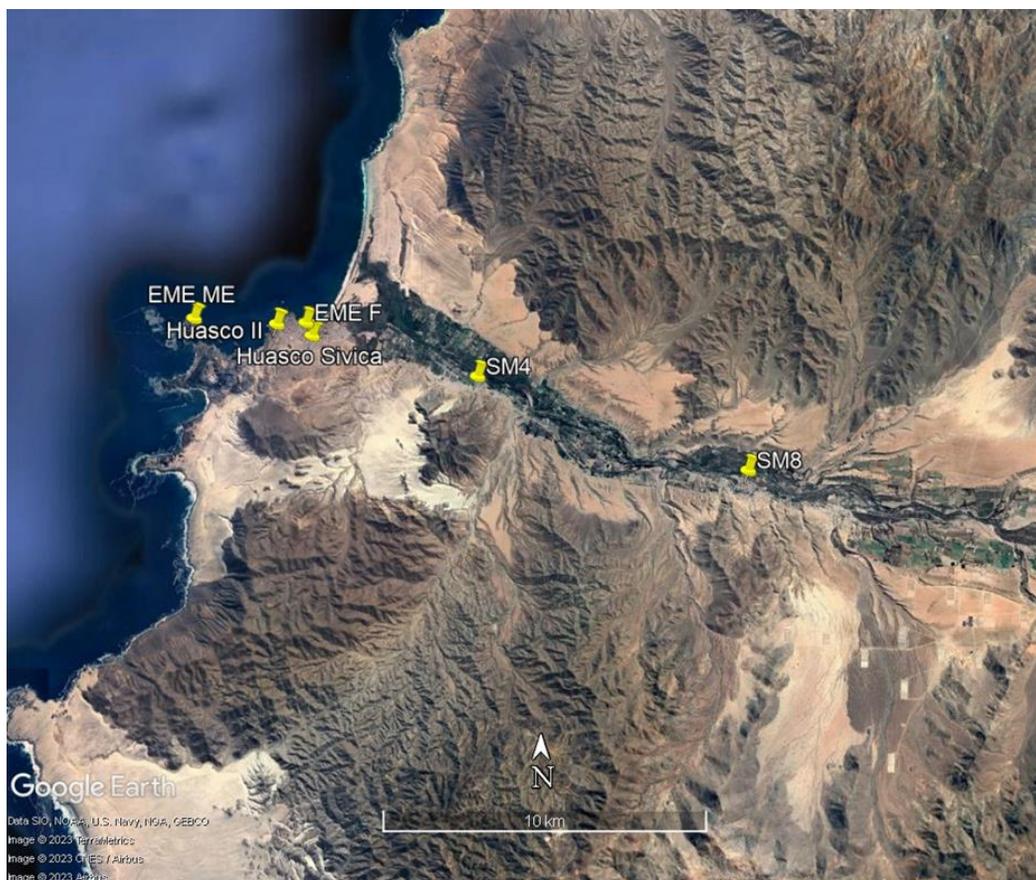


Figura 3-41 Estaciones de monitoreo con meteorología en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

La información meteorológica disponible entre 2016 y febrero del 2023 se muestra en las siguientes figuras. La Figura 3-42 y la Figura 3-45 presenta los datos de las variables velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad relativa registrados en las estaciones Huasco Sívica y EME ME, respectivamente. La Figura 3-43, Figura 3-44, Figura 3-46 y Figura 3-47 muestran las mediciones de velocidad del viento y dirección del viento en las estaciones Huasco II, EME F, SM4 y SM8, respectivamente.

En las series de tiempo se puede observar que en casi todas las estaciones hay registros de datos anómalos, posiblemente causados por problemas en los equipos de medición. Cabe destacar que estos no serán considerados en el análisis meteorológico. Los datos cronológicos de las velocidades del viento muestran un patrón cíclico en todas las estaciones, alcanzando las mayores magnitudes durante los meses de verano. Las temperaturas también presentan datos cíclicos, a diferencia de las humedades relativas, cuyos valores oscilan cerca del 80%.

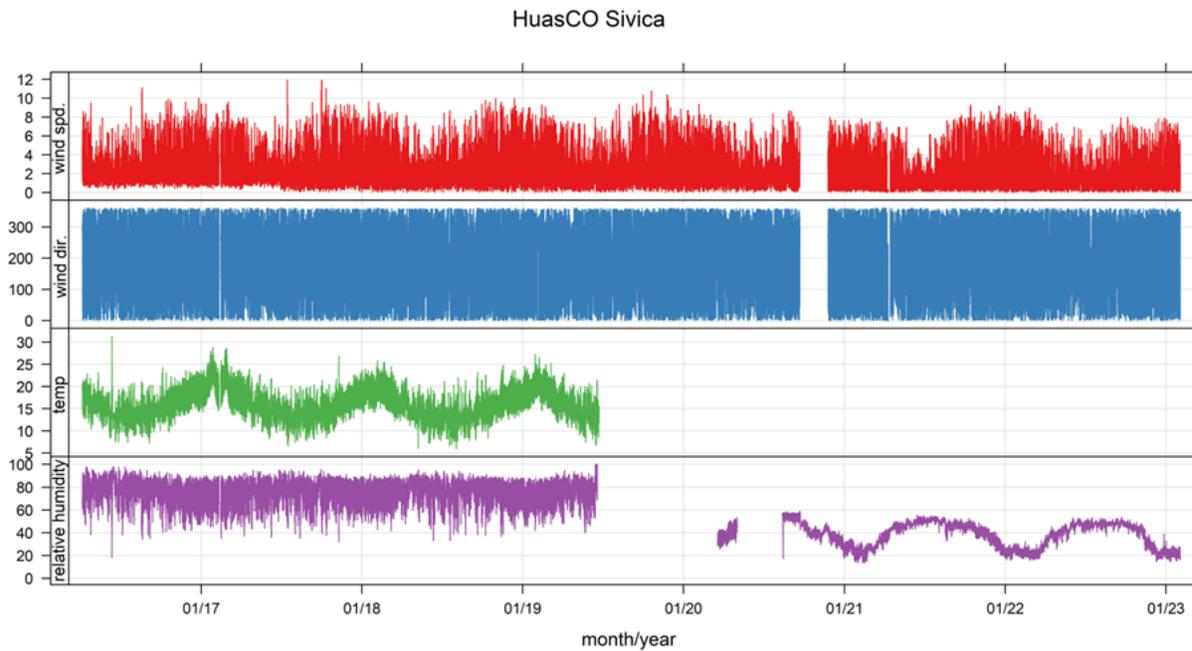


Figura 3-42 Serie de tiempo variables meteorológicas estación Huasco Sívica

Fuente: Elaboración propia

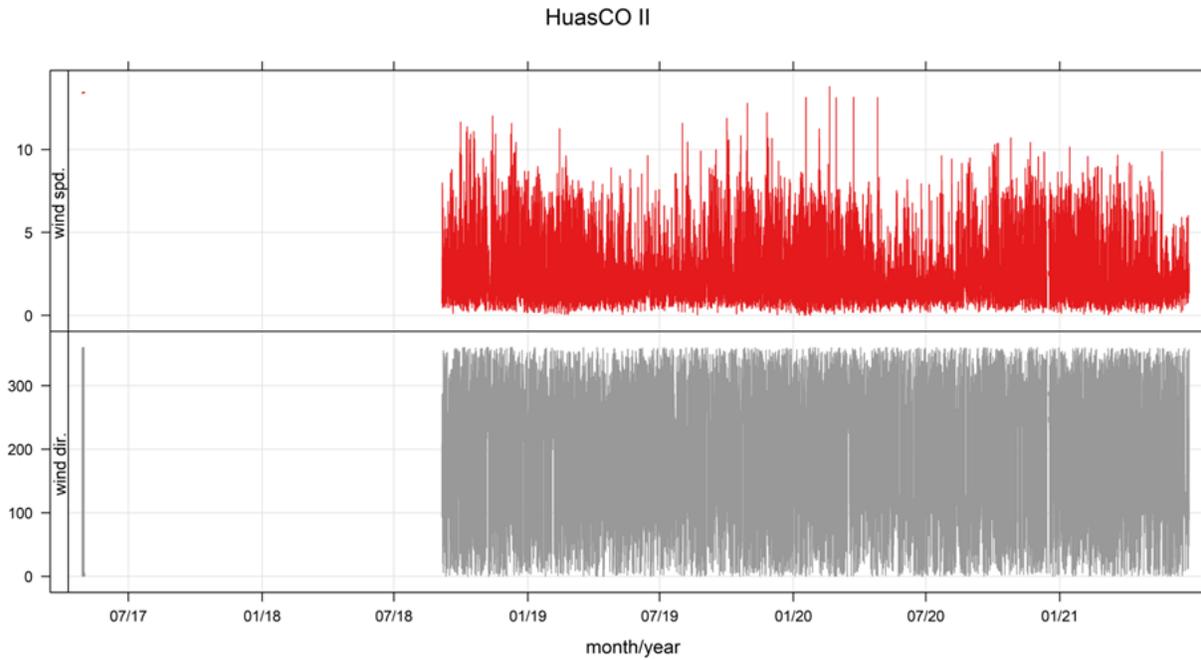


Figura 3-43 Serie de tiempo variables meteorológicas estación Huasco II

Fuente: Elaboración propia

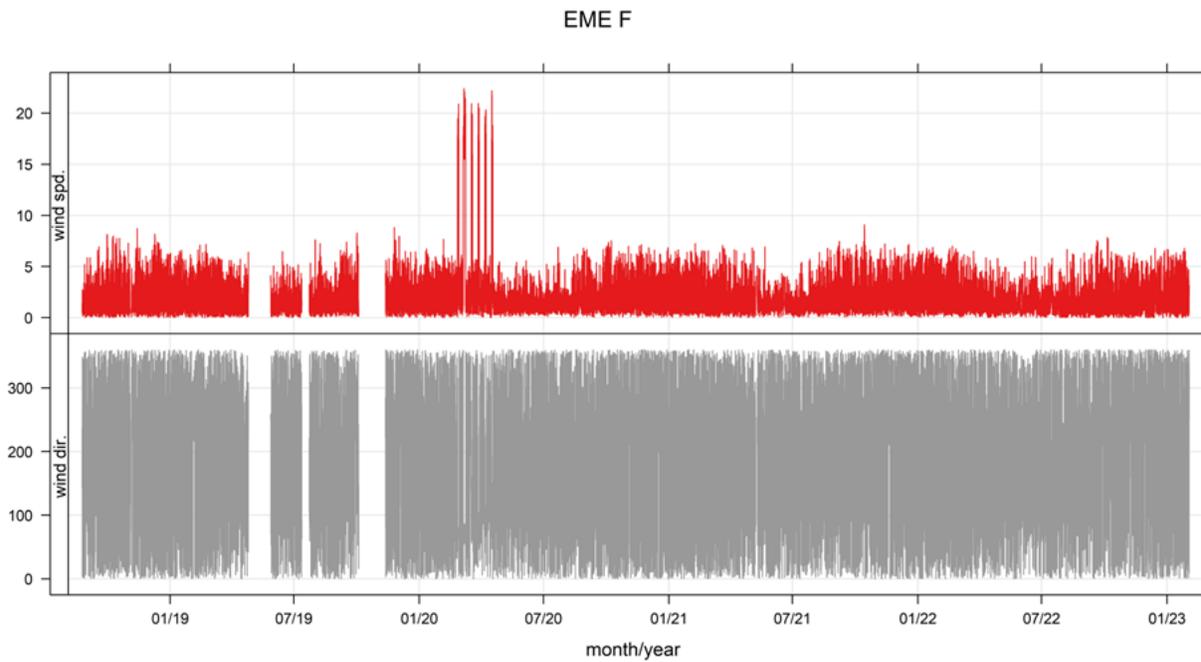


Figura 3-44 Serie de tiempo variables meteorológicas estación EME F

Fuente: Elaboración propia

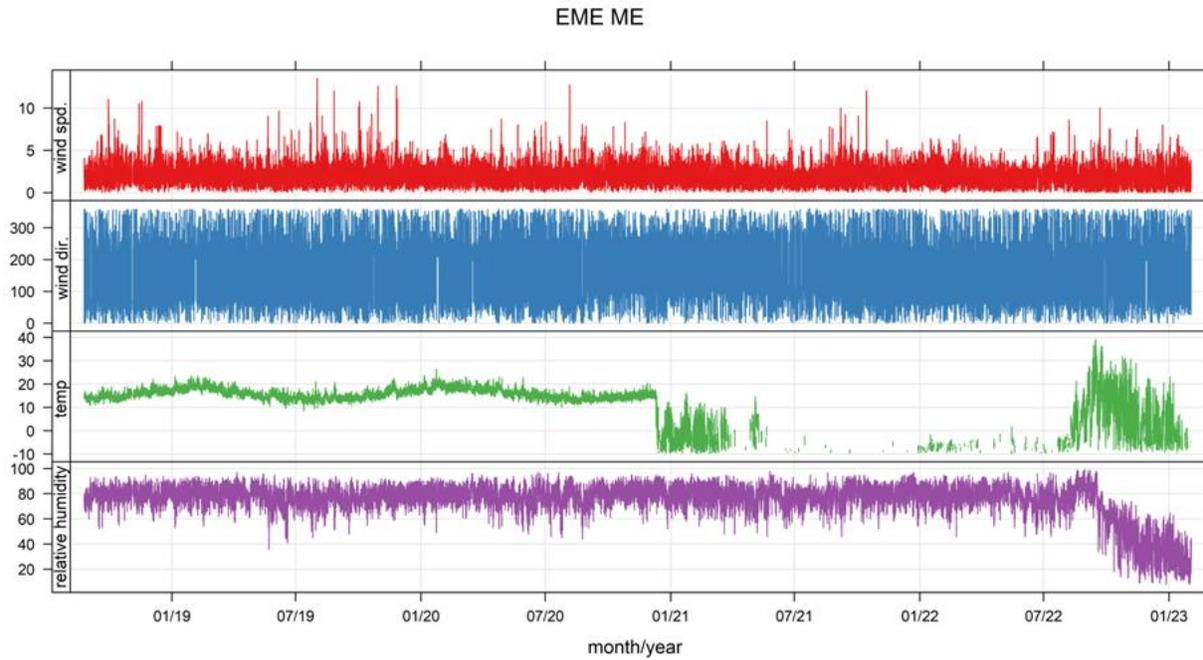


Figura 3-45 Serie de tiempo variables meteorológicas estación EME ME

Fuente: Elaboración propia

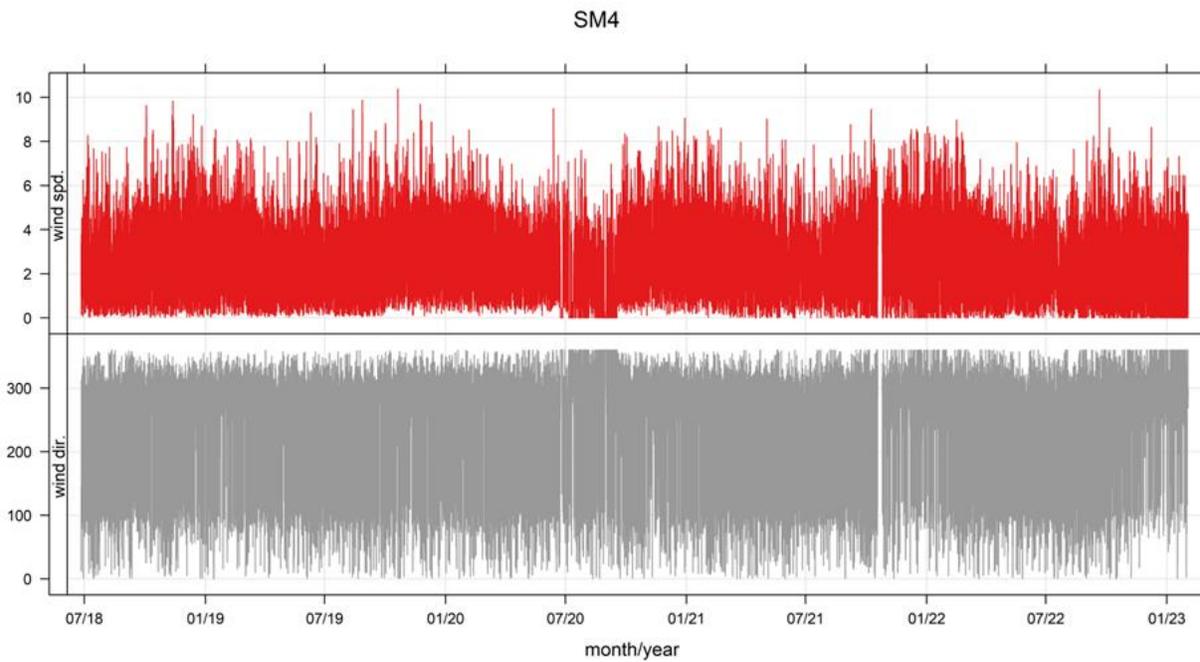


Figura 3-46 Serie de tiempo variables meteorológicas estación SM4

Fuente: Elaboración propia

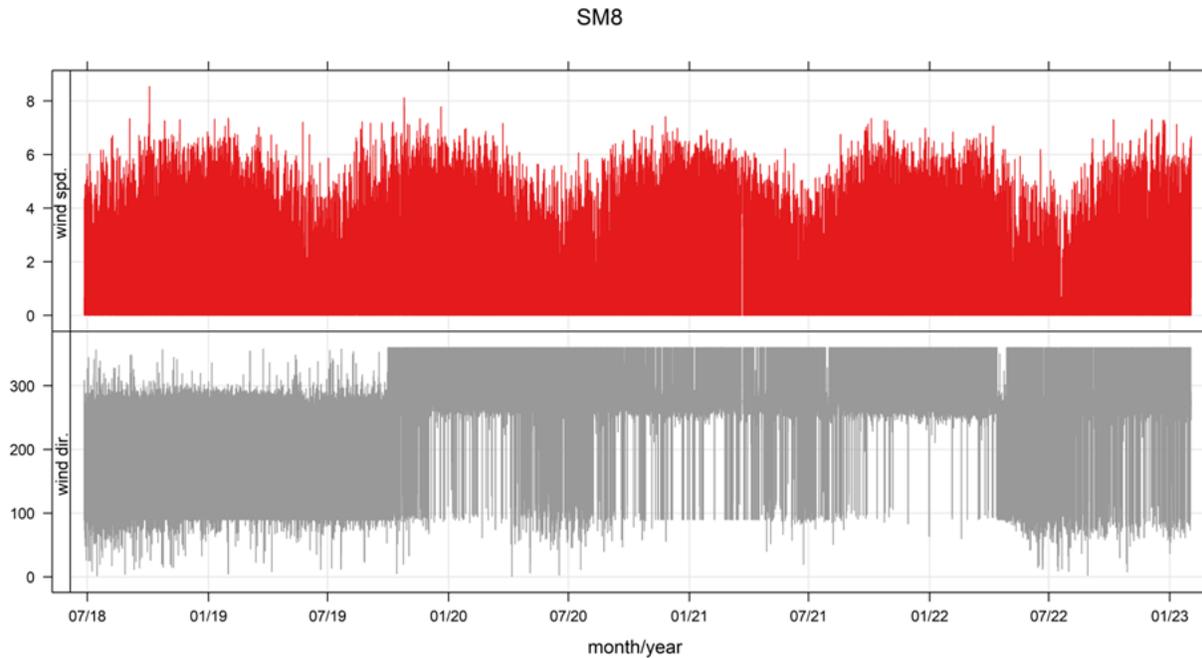


Figura 3-47 Serie de tiempo variables meteorológicas estación SM8

Fuente: Elaboración propia

A continuación, desde la Tabla 3-53 a la Tabla 3-58, se presentan los valores estadísticos de las variables meteorológicas en las distintas estaciones. Como se pudo notar, solo las estaciones Huasco Sivica y EME ME registran datos de temperatura. Los valores en ambas estaciones son similares, oscilando entre 6 y 31 °C. De acuerdo con la información estadística, las estaciones con menores velocidad promedio son EME F y EME ME, registrando velocidades cercanas a 2 m/s, y las mayores velocidades promedio se encuentran en las estaciones Huasco II y SM4, con valores cercanos a 2,7 m/s.

Tabla 3-53 Valores estadísticos estación Huasco Sivica, 2016 – 2023

Variable	Mínimo	Mediana	Promedio	Máximo
Dirección del viento (°)	-	-	270*	-
Velocidad del viento (m/s)	0,00	1,80	2,38	11,92
Temperatura (°C)	6,00	15,30	15,68	31,30
Humedad relativa (%)	18,00	79,00	76,13	100,00

(*) Valor resultante de la dirección del viento

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-54 Valores estadísticos estación Huasco II, 2017 – 2021

Variable	Mínimo	Mediana	Promedio	Máximo
Dirección del viento (°)	-	-	289*	-

Variable	Mínimo	Mediana	Promedio	Máximo
Velocidad del viento (m/s)	0,00	2,01	2,74	13,80

(*) Valor resultante de la dirección del viento

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-55 Valores estadísticos estación EME F, 2018 – 2023

Variable	Mínimo	Mediana	Promedio	Máximo
Dirección del viento (°)	-	-	252*	-
Velocidad del viento (m/s)	0,00	1,49	2,00	9,10

(*) Valor resultante de la dirección del viento

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-56 Valores estadísticos estación EME ME, 2018 – 2023

Variable	Mínimo	Mediana	Promedio	Máximo
Dirección del viento (°)	-	-	230*	-
Velocidad del viento (m/s)	0,00	1,99	2,15	13,52
Temperatura (°C)	8,30	15,50	15,76	26,50
Humedad relativa (%)	36,00	79,00	78,92	99,00

(*) Valor resultante de la dirección del viento

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-57 Valores estadísticos estación SM4, 2018 – 2023

Variable	Mínimo	Mediana	Promedio	Máximo
Dirección del viento (°)	-	-	290*	-
Velocidad del viento (m/s)	0,00	2,54	2,75	10,38

(*) Valor resultante de la dirección del viento

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-58 Valores estadísticos estación SM8, 2018 – 2023

Variable	Mínimo	Mediana	Promedio	Máximo
Dirección del viento (°)	-	-	274*	-
Velocidad del viento (m/s)	0,00	2,04	2,41	8,54

(*) Valor resultante de la dirección del viento

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, la Figura 3-48 presenta los perfiles diarios de la velocidad del viento en las distintas estaciones, para el año 2020. Se seleccionaron los datos del año 2020, ya que es el año más reciente con datos en todas las estaciones de monitoreo. Se puede observar que al inicio del día las velocidades son menores a 2 m/s. Estas comienzan a aumentar alrededor de las 7 de la mañana, y alcanzan un *peak* (entre 3 y 5 m/s) cerca de las 16 horas, para luego comenzar a descender.

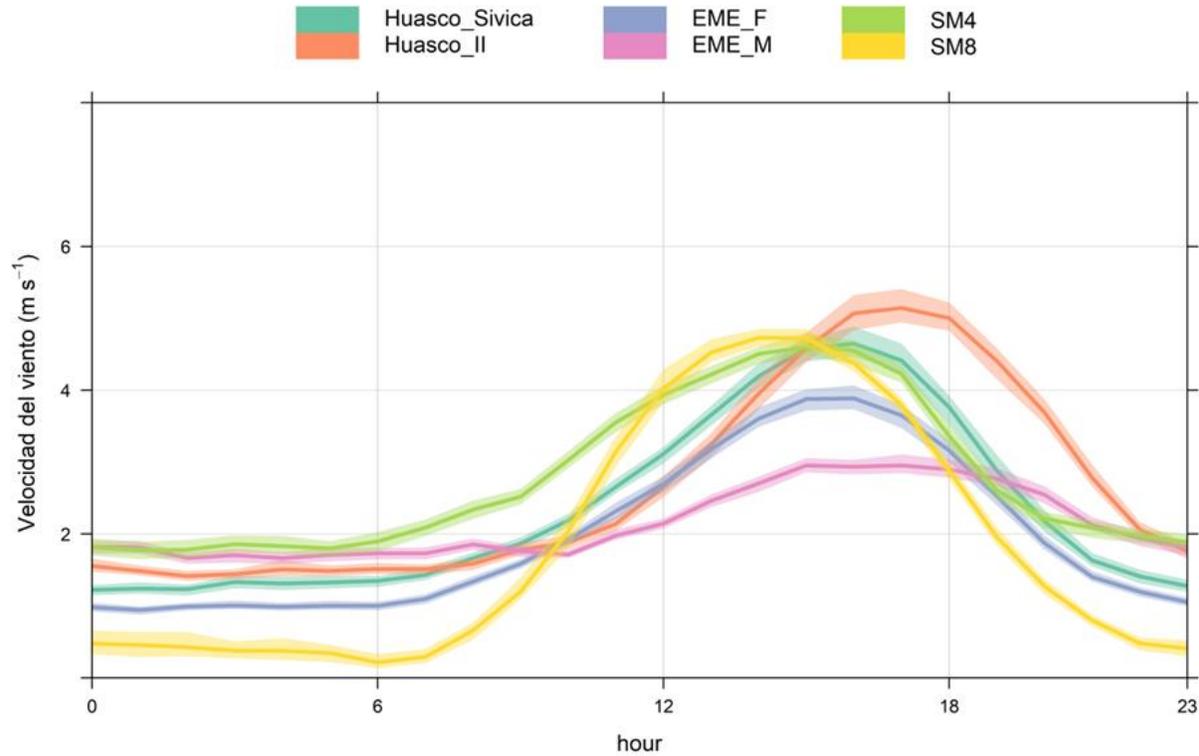


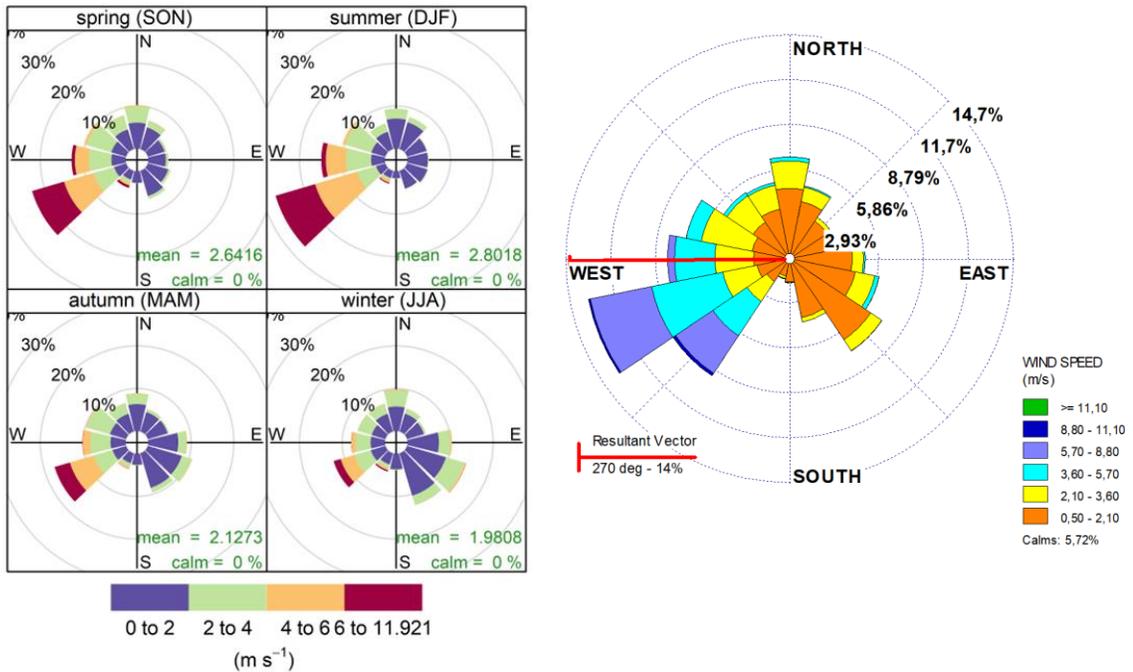
Figura 3-48 Perfiles diarios de la velocidad del viento año 2020

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, en desde la Figura 3-49 a la Figura 3-54 se presentan las rosas de los vientos de cada estación. En la estación Huasco II, representada por la Figura 3-50, se observan vientos predominantes con dirección oeste y sur-oeste en verano y primavera. En otoño e invierno principalmente se observa una componente importante en dirección sur-este. Las rosas de vientos de la estación EME F, en la Figura 3-51, nuevamente muestran vientos sur-oeste predominantes en primavera y verano. En otoño aparece una componente con dirección este y en invierno predominan los vientos con dirección este y sur-este.

En la estación EME ME, mostrada en la Figura 3-52, en todas las estaciones del año los vientos predominantes son sur-oeste y nor-este. En la Figura 3-53, que representa la estación SM4, se puede notar que en primavera y verano predominan los vientos nor-oeste y oeste. En otoño e invierno además aparece una componente sur-este. Adicionalmente, en la Figura 3-54 se observa que en la estación SM8, en todas las estaciones del año, la única dirección predominante del viento es oeste.

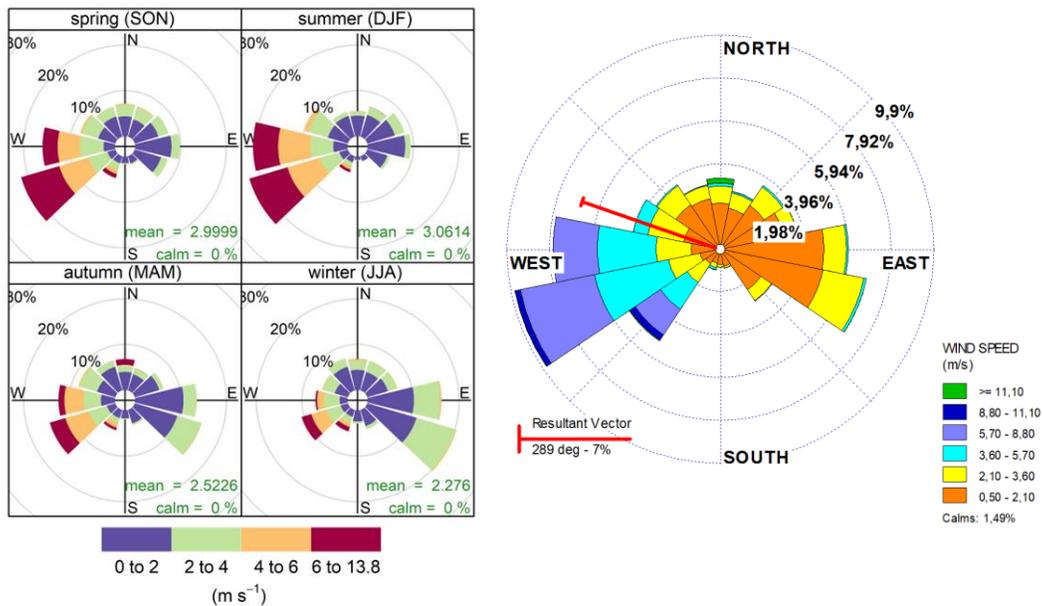
En general, los vientos tienen dirección oeste y suroeste, lo que indica que estos provienen del océano Pacífico y se dirigen hacia el interior. La única excepción es la estación EME ME, que registra vientos sur-oeste y nor-este. Esto se debe a que esta estación se encuentra en una península, donde la heterogeneidad del uso de suelo promueve patrones de vientos más locales.



Frequency of counts by wind direction (%)

Figura 3-49 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación Huasco Sivica (2016 -2023)

Fuente: Elaboración propia



Frequency of counts by wind direction (%)

Figura 3-50 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación Huasco II (2017-2021)

Fuente: Elaboración propia

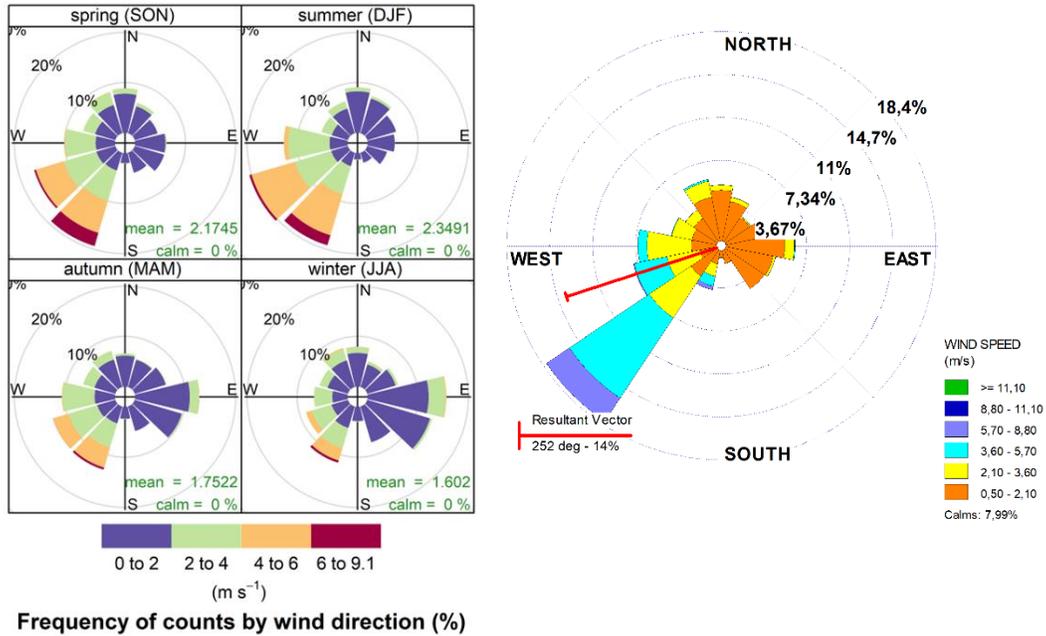


Figura 3-51 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación EME F (2018-2023)

Fuente: Elaboración propia

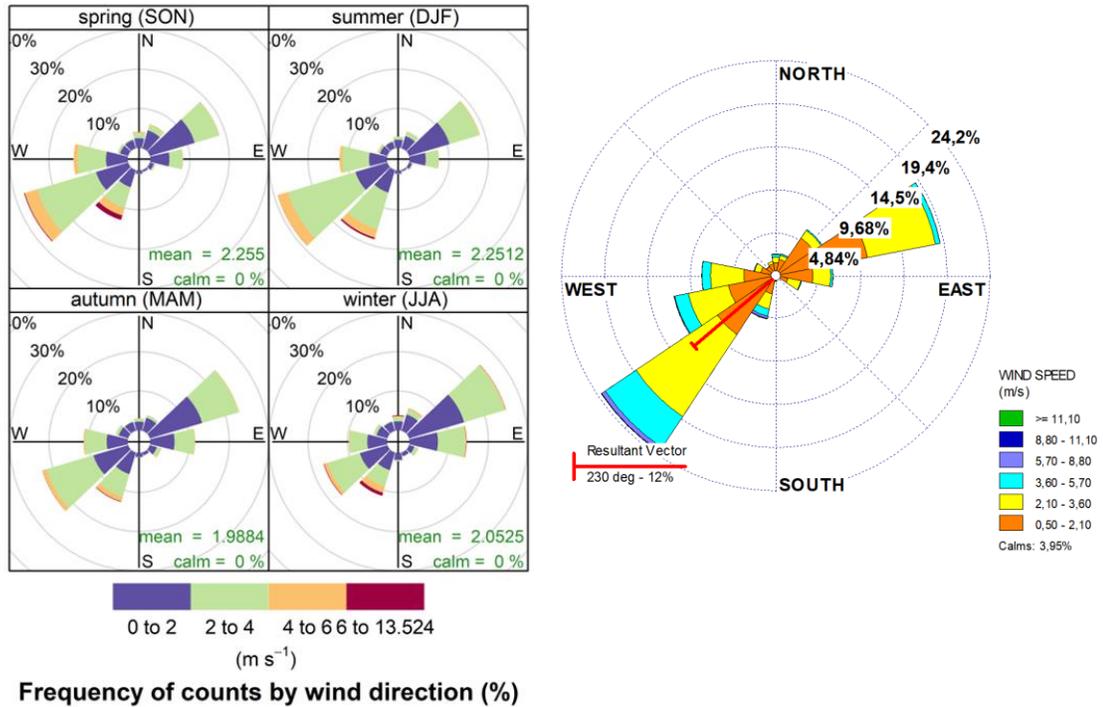


Figura 3-52 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación EME ME (2018-2023)

Fuente: Elaboración propia

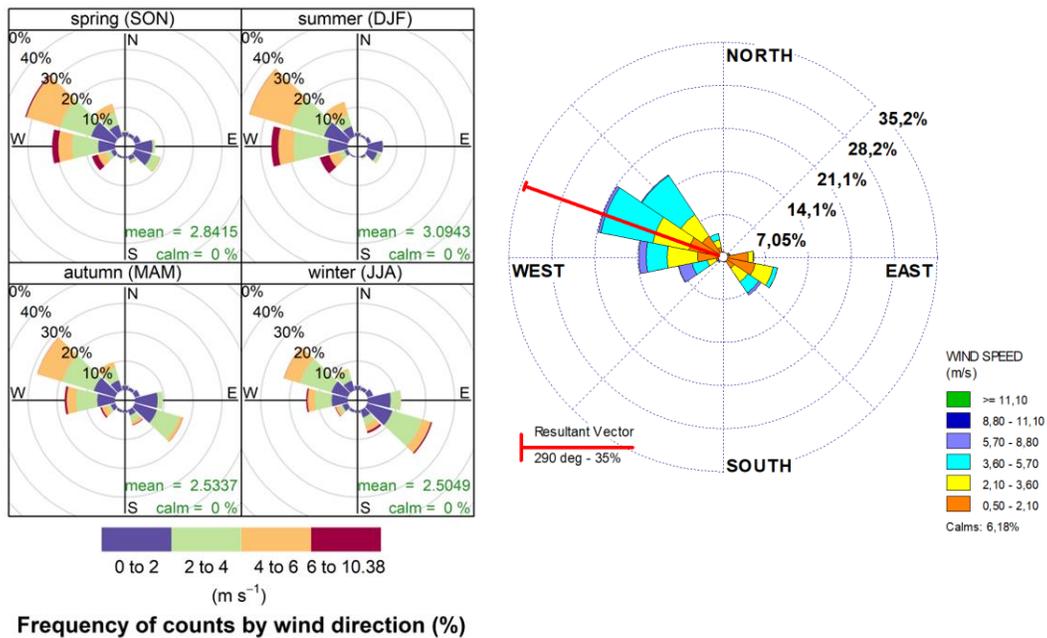


Figura 3-53 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación SM4 (2018-2023)

Fuente: Elaboración propia

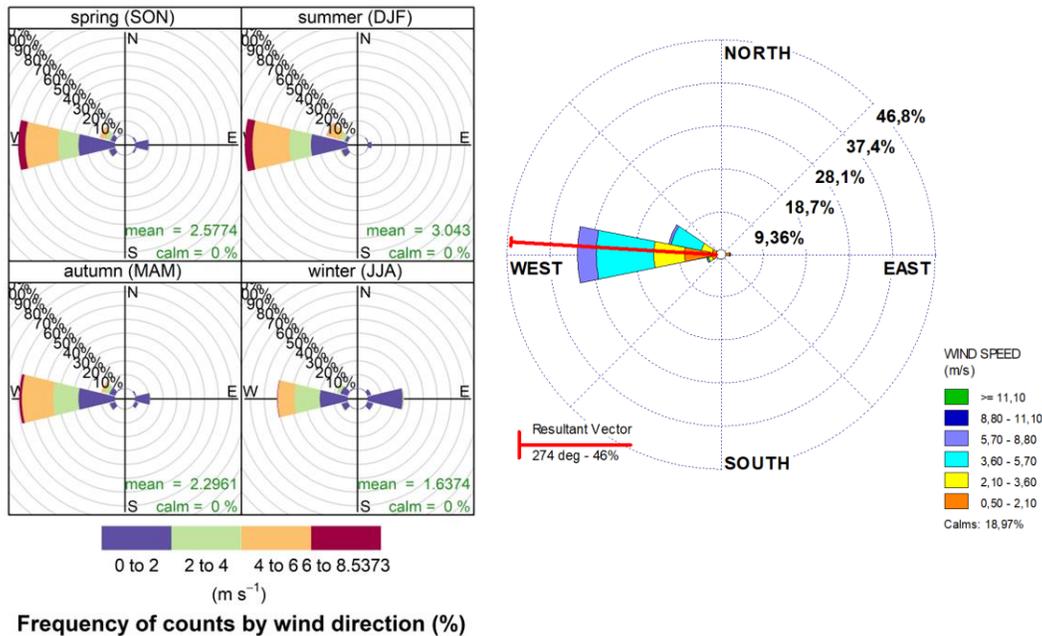


Figura 3-54 Rosas de los vientos por estación del año (izquierda) y rosa de los vientos con vector resultante (derecha), estación SM8 (2018-2023)

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.3 Modelación de la meteorología en la zona

Para poder realizar una modelación de calidad del aire adecuada, se necesita disponer de información meteorológica en la forma de campos de vientos y de temperaturas que varíen espacialmente, para toda la zona donde se va a realizar dicha modelación. La información meteorológica disponible, ya descrita en la sección anterior, si bien es muy relevante para dichos propósitos, es incompleta. La información que se necesita incluye, además de campos de vientos y temperaturas, otras variables tales como la estabilidad atmosférica y las tasas de dispersión de contaminantes, las cuales dependen de la posición y del tiempo de manera compleja.

Para obtener la meteorología necesaria, se aplican modelos numéricos de pronóstico del tiempo, los cuales son capaces de crear información meteorológica tridimensional sobre una zona de estudio dada. En este caso, se ha empleado el modelo “*The weather research and forecasting model*”, o WRF en forma abreviada³⁹.

³⁹ Disponible en: <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>

La siguiente figura muestra el dominio de modelación empleado para calcular la meteorología en la zona de Huasco.



Figura 3-55 Dominio más interno de la modelación WRF para Huasco, año 2021.

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.3.1 Evaluación estadística del desempeño de la modelación WRF

Para poder comparar los valores modelados con los observados en forma cuantitativa, se calculan los siguientes indicadores estadísticos. En las siguientes definiciones, O_i representa el i -ésimo valor observado, y M_i representa el i -ésimo valor modelado de un total de n observaciones; todos los valores presentados a continuación son horarios.

Fracción de predicciones dentro de un factor de 2 (FAC2)

La fracción de valores modelados dentro de un factor de dos de los valores observados corresponde a la fracción de las predicciones del modelo que satisfacen:

$$0.5 \leq \frac{M_i}{O_i} \leq 2.0$$

Sesgo promedio (MB)

El sesgo promedio proporciona una buena indicación si el promedio observado sobre- o subestima las modelaciones.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N M_i - O_i$$

Error bruto de la media (MGE)

Este error proporciona una buena indicación de la media del error, sin importar si este está sobre o subestimando.

$$MGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i|$$

Sesgo de la media normalizado (NMB)

El sesgo de la media normalizado es útil para comparar contaminantes que poseen diferentes escalas de concentración. El sesgo de la media es normalizado dividiendo por el valor observado.

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - O_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

Error bruto de la media normalizado (NMGE)

Este error ignora si la predicción está sobre o sub estimada, solo le interesan las desviaciones absolutas.

$$NMGB = \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

Raíz cuadrática del error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n} \right)^{1/2}$$

Coeficiente de correlación (r)

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables.

$$r = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right)$$

3.7.1.3.2 Indicadores estadísticos para la velocidad del viento

En las siguientes tablas se presentan los indicadores anuales y estacionales para cada estación. Se **resaltan** los indicadores para los cuales se cumplen los siguientes criterios de admisibilidad⁴⁰, correspondientes a: sesgo medio (MB) es menor a 0,5 en valor absoluto, y los errores MGE y RMSE son menores a 2 m/s.

Como se puede apreciar, en todos los casos, a excepción de la estación EME ME, las modelaciones de WRF tienen un desempeño aceptable porque al menos uno de los indicadores de desempeño se cumple satisfactoriamente. Hay una tendencia del modelo a sobrestimar la velocidad del viento, lo cual es típico del modelo WRF en zonas ubicadas en el borde costero, donde el cambio de uso de suelo afecta ampliamente la rugosidad superficial, pasando de un valor muy bajo sobre el océano a un valor mucho mayor sobre tierra.

Cabe destacar que la zona costera que se modela es de alta complejidad, debido a que el borde costero es irregular. Por ejemplo, la estación EME ME está ubicada en la península donde está la central termoeléctrica Guacolda, y la forma irregular de dicha península y su pequeña extensión hace que sea muy complejo poder representar adecuadamente la velocidad del viento en dicho sitio.

Tabla 3-59 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación EME F, año 2021

Indicador	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
n	8.613	2.177	2.149	2.121	2.166
FAC2	0,73	0,75	0,73	0,71	0,74
MB	0,43	0,64	0,35	0,47	0,25
MGE	0,96	1,11	1,02	0,90	0,83
NMB	0,21	0,28	0,15	0,27	0,15
NMGE	0,47	0,48	0,42	0,51	0,50

⁴⁰ Fuente: Cortés-Pino y cols., An evaluation of the photochemical air quality modeling using CMAQ in the industrial area of Quintero-Puchuncavi-Concon, Chile, Atmospheric Pollution Research 13 (2022) 101336.

Indicador	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
RMSE	1,42	1,65	1,39	1,33	1,28
r	0,79	0,83	0,80	0,75	0,68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-60 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación EME ME, año 2021

Indicador	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
n	8757	2184	2161	2208	2204
FAC2	0,47	0,40	0,43	0,47	0,55
MB	2,18	2,73	2,45	1,99	1,58
MGE	2,44	2,93	2,69	2,24	1,90
NMB	1,04	1,22	1,09	1,01	0,81
NMGE	1,16	1,31	1,20	1,14	0,98
RMSE	3,26	3,82	3,44	2,98	2,67
r	0,54	0,58	0,57	0,49	0,44

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-61 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación Huasco II, año 2021

Indicador	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
n	4179		1380	2164	635
FAC2	0,65		0,66	0,65	0,67
MB	1,27		1,42	1,26	0,94
MGE	1,66		1,84	1,60	1,48
NMB	0,50		0,47	0,54	0,44
NMGE	0,65		0,60	0,69	0,69
RMSE	2,33		2,45	2,28	2,24
r	0,74		0,80	0,72	0,45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-62 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación Huasco Sivica, año 2021

Indicador	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
n	8634	2184	2161	2095	2194
FAC2	0,64	0,67	0,65	0,58	0,66
MB	-0,20	-0,31	-0,51	0,13	-0,09
MGE	0,95	1,00	1,09	0,94	0,75
NMB	-0,10	-0,13	-0,20	0,08	-0,06
NMGE	0,47	0,41	0,44	0,58	0,48
RMSE	1,39	1,49	1,57	1,38	1,09

Indicador	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
r	0,68	0,75	0,70	0,57	0,60

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-63 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación SM4, año 2021

Indicador	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
n	8575	2022	2161	2202	2190
FAC2	0,67	0,68	0,72	0,66	0,63
MB	0,56	0,73	0,58	0,61	0,35
MGE	1,43	1,48	1,43	1,42	1,38
NMB	0,20	0,25	0,18	0,23	0,14
NMGE	0,51	0,50	0,45	0,54	0,56
RMSE	1,78	1,84	1,74	1,79	1,75
r	0,67	0,71	0,74	0,62	0,52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-64 Estadísticas de desempeño del modelo WRF para el viento estación SM8, año 2021

Indicador	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
n	4847	1342	1469	1086	950
FAC2	0,68	0,69	0,71	0,69	0,62
MB	0,54	0,53	0,59	0,50	0,53
MGE	1,17	1,15	1,24	1,09	1,16
NMB	0,18	0,17	0,18	0,18	0,23
NMGE	0,39	0,37	0,37	0,39	0,50
RMSE	1,53	1,54	1,57	1,47	1,54
r	0,79	0,80	0,84	0,76	0,64

Fuente: Elaboración propia

3.7.2 Evaluación del impacto de las emisiones totales y por fuente emisora sobre la calidad del aire para MP10, MP2,5 y MPS

Se evalúa el impacto de las emisiones totales y por fuente emisora sobre la calidad del aire, para MP10, MP2,5 y MPS, por medio de la aplicación de un modelo de dispersión de dichos contaminantes.

3.7.2.1 Modelo de dispersión de contaminantes

Para encontrar el aporte de cada una de las fuentes de emisión caracterizadas en el inventario, se ha empleado el modelo de dispersión CALPUFF, recomendado por la Guía metodológica del SEA. La descripción de la configuración del modelo se presenta a continuación.

La Figura 3-56 muestra el dominio espacial donde se realiza la modelación con CALPUFF. El dominio tiene por origen SO el punto de coordenadas UTM (WGS 84): 264.055 m E y 6.820.348 m N. El dominio tiene una extensión de 70 km E-O y 50 km S-N. El sistema de coordenadas es el mismo que emplea el modelo WRF usado en la modelación meteorológica, cuyos resultados se han presentado en la Sección 3.7.1.2.

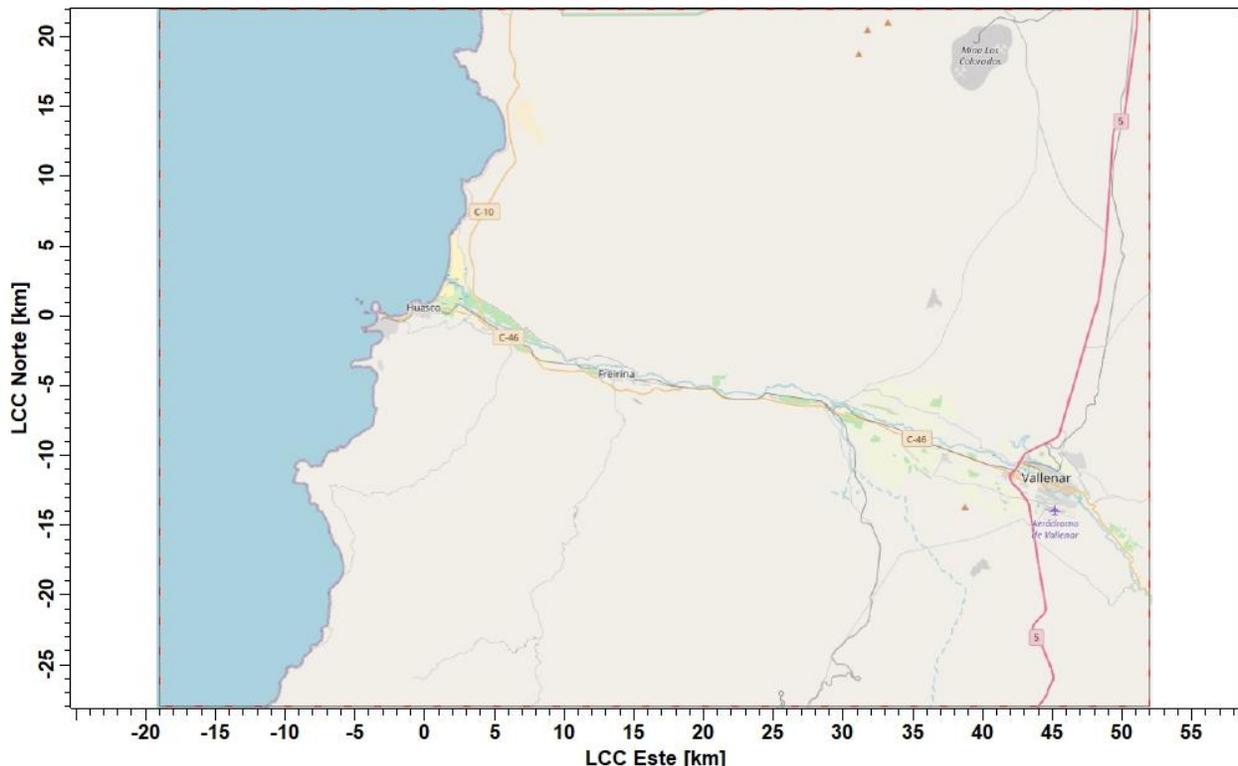


Figura 3-56 Dominio de modelación CALPUFF

Fuente: Elaboración propia

Las fuentes emisión consideradas para la modelación se presentan en la Tabla 3-65, y en la Figura 3-57 y Figura 3-58.

Tabla 3-65 Resumen de fuentes consideradas en la modelación.

Titular/ Categoría	Instalación/ Subcategoría	Fuente	UTM N (m)	UTM E (m)	Emisión MP10 [t]	Emisión MP2,5 [t]
Guacolda Energía S.A.	Termoeléctrica Guacolda	Chimenea U1&2	6.849.280	279.006	50,37	18,64
Guacolda Energía S.A.	Termoeléctrica Guacolda	Chimenea U3	6.849.311	279.125	112,74	41,71
Guacolda Energía S.A.	Termoeléctrica Guacolda	Chimenea U4	6.849.260	279.188	61,33	22,69
Guacolda Energía S.A.	Termoeléctrica Guacolda	Chimenea U5	6.849.200	279.150	73,14	27,06
Guacolda Energía S.A.	Termoeléctrica Guacolda	Actividades con combustión	6.849.170	279.090	3,49	3,49
Guacolda Energía S.A.	Termoeléctrica Guacolda	Actividades sin combustión	6.849.170	279.090	47,52	5,46
Compañía Minera del Pacífico	Planta de Pellets Huasco	Chimenea 2A	6.847.410	279.905	58,78	21,75
Compañía Minera del Pacífico	Planta de Pellets Huasco	Chimenea 2B	6.847.459	279.996	14,07	5,21
Compañía Minera del Pacífico	Planta de Pellets Huasco	Actividades con combustión	6.848.000	280.250	9,11	8,70
Compañía Minera del Pacífico	Planta de Pellets Huasco	Actividades sin combustión	6.848.000	280.250	120,60	25,16
Puerto Las Losas S.A.	Puerto Las Losas	Actividades con combustión	6.848.491	280.798	0,19	0,19
Puerto Las Losas S.A.	Puerto Las Losas	Actividades sin combustión	6.848.491	280.798	0,60	0,09
Enel Generación Chile S.A.	Central Térmica Huasco	Actividades con combustión	6.848.638	279.365	0,00	0,00
Enel Generación Chile S.A.	Central Térmica Huasco	Actividades sin combustión	6.848.638	279.365	2,37	0,24
Ferronor S.A	Línea Férrea	Actividades con combustión	6.858.282	300.989	11,91	1,79
Quemas Agrícolas	Quemas Agrícolas	Quemas Agrícolas	-	-	0,041	0,038
Incendios Forestales	Incendios Forestales	Incendios Forestales	-	-	0,023	0,026
Incendios Urbanos	Incendios Urbanos	Incendios Urbanos	-	-	1,582	1,582
Combustión de Leña Residencial	Combustión de Leña Residencial Rural	Combustión de Leña	-	-	1,363	1,324
Combustión de Leña Residencial	Combustión de Leña Residencial Urbana	Combustión de Leña	-	-	0,785	0,763
Transporte en Ruta	Combustión vehículos	Combustión vehículos	-	-	4,449	4,000
Transporte en Ruta	Resuspensión de polvo	Resuspensión de polvo	-	-	4,482	1,084

Titular/ Categoría	Instalación/ Subcategoría	Fuente	UTM N (m)	UTM E (m)	Emisión MP10 [t]	Emisión MP2,5 [t]
Transporte en Ruta	Desgaste frenos y neumáticos	Desgaste frenos y neumáticos	-	-	0,001	0,001

Fuente: Elaboración propia



Figura 3-57 Fuentes de emisión (color rojo) consideradas en la modelación

Fuente: Elaboración propia

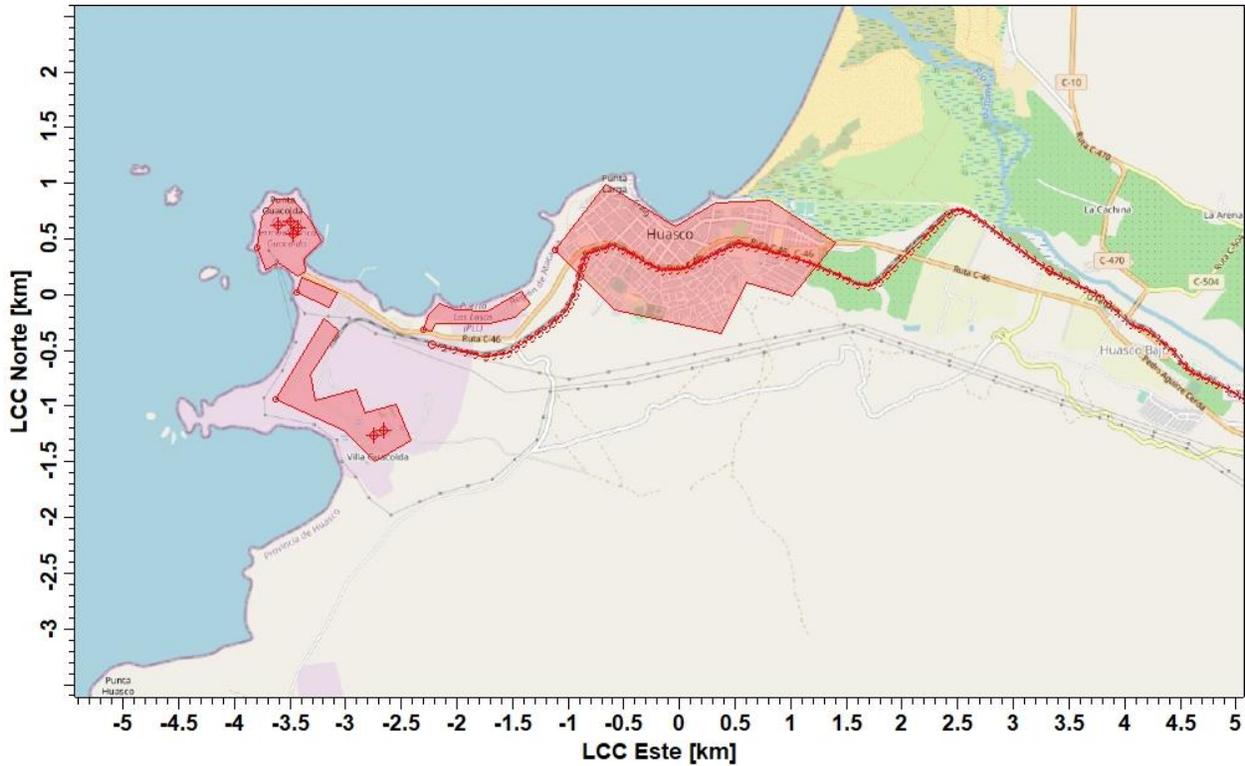


Figura 3-58 Fuentes de emisión (color rojo), ampliación sobre Huasco bajo

Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación de los aportes a la calidad del aire, se definieron dos conjuntos de receptores de grilla: una grilla de 1 km de resolución horizontal y una grilla anidada, con receptores separados cada 250 m. Esto con el propósito de obtener una representación más detallada de los aportes de las fuentes en la zona urbana de Huasco bajo (incluyendo zonas agrícolas), como se aprecia en las siguientes figuras.

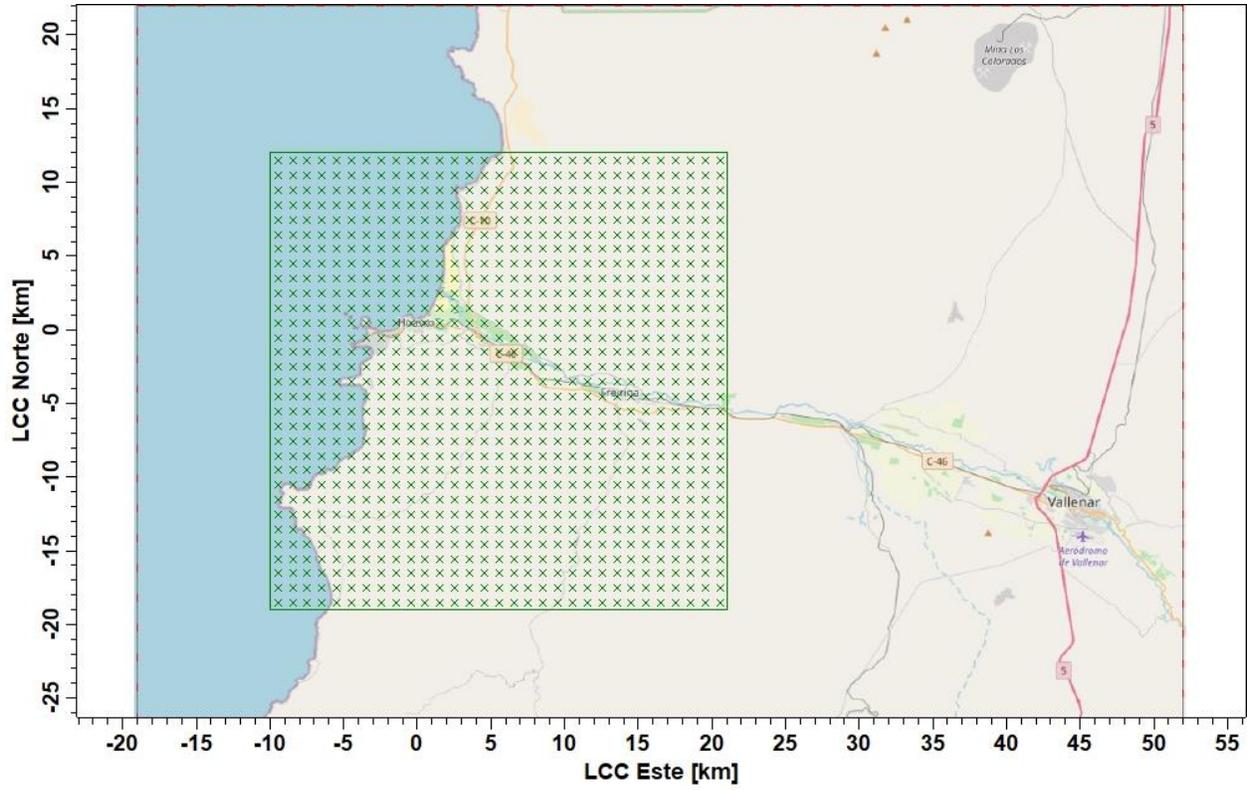


Figura 3-59 Grilla de receptores con separación horizontal de 1 km

Fuente: Elaboración propia

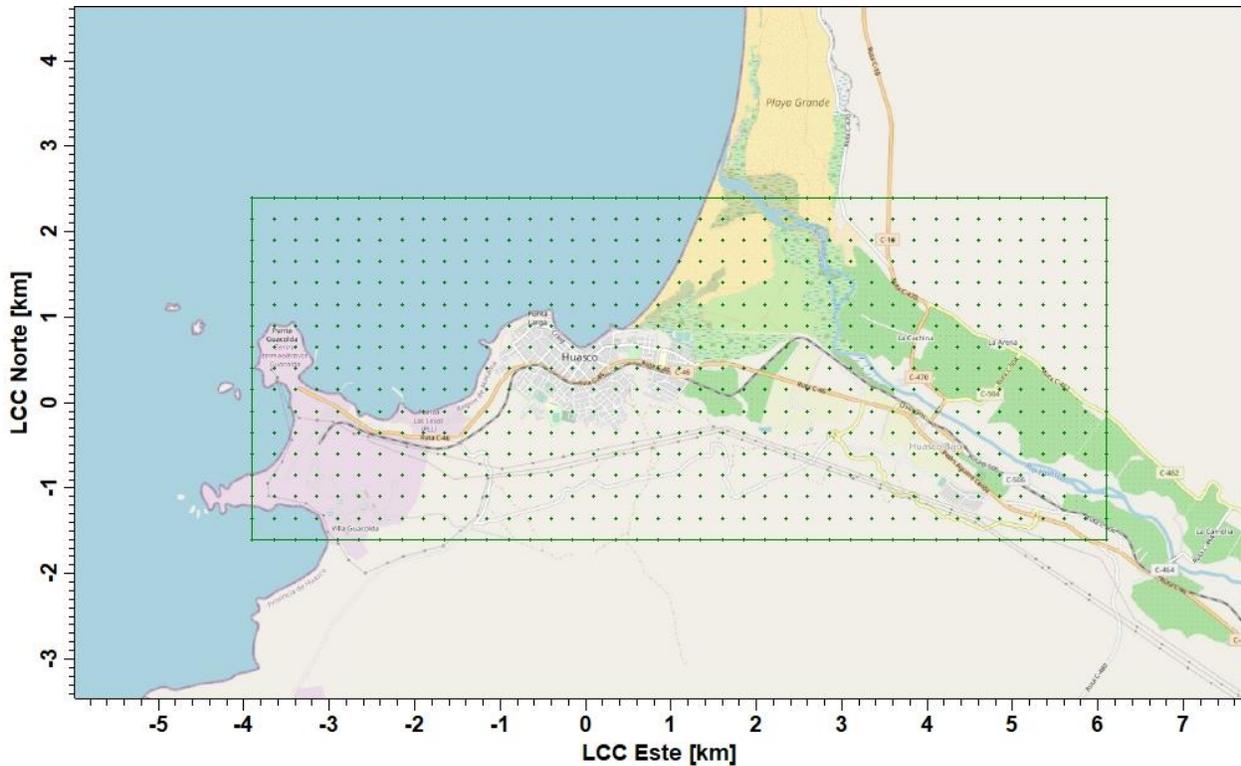


Figura 3-60 Grilla de receptores con separación de 250 m, sobre la zona de Huasco bajo y zona agrícola

Fuente: Elaboración propia

Los receptores discretos corresponden a las ubicaciones de estaciones de monitoreo de calidad del aire y meteorología, con información disponible en la zona de estudio. Estos receptores se presentan en la Tabla 3-66 y sus ubicaciones se observan en la Figura 3-61.

Tabla 3-66 Receptores discretos

Número receptor	Estación	UTM N (m)	UTM E (m)
1	EME F	6.849.125	282.486
2	EME M	6.849.199	279.008
3	Huasco II	6.849.067	281.581
4	Huasco Sivica	6.848.727	282.682
5	SM4	6.847.562	287.841
6	SM8	6.844.810	296.285
7	21 de Mayo	6.848.939	281.938

Fuente: Elaboración propia

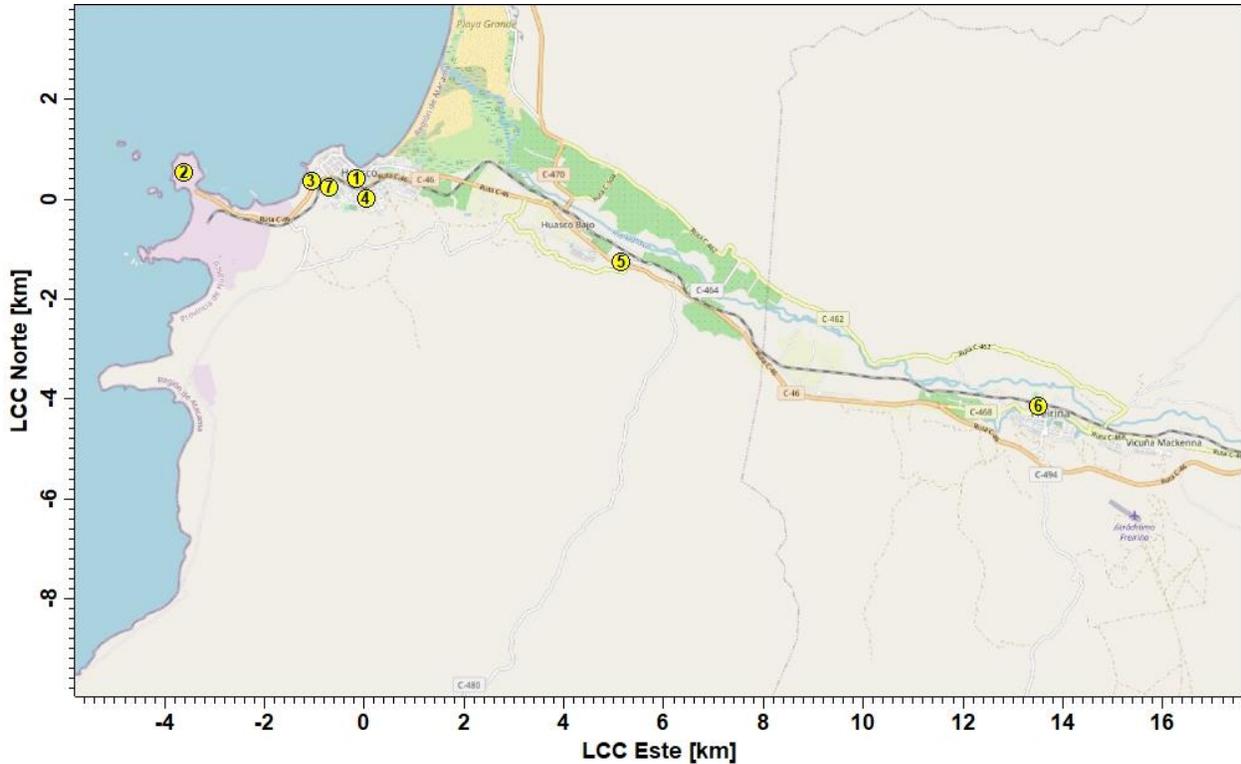


Figura 3-61 Ubicaciones receptores discretos considerados en la modelación

Fuente: Elaboración propia

3.7.2.2 Aportes de cada fuente modelada a la calidad del aire

Las siguientes tablas presentan los aportes al MP10, MP2,5 y MPS asociados a las fuentes emisoras ya presentadas en la Tabla 3-65. El detalle de estos aportes se encuentra disponible en el anexo digital “PPAHuasco2-Output_Modelacion.xlsx”.

En la Tabla 3-67 se presentan los aportes de cada fuente emisora sobre las concentraciones de MP10 anual [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], según cada estación de monitoreo. Se observa que entre las fuentes de la Planta de Pellets, las fuentes areales sin caminos son las que tienen un mayor aporte en MP10, mientras que de Guacolda los principales aportes son de la entrada a la central, y las chimeneas de las unidades 1 y 2, y 3. Dado que el Puerto Las Losas, la Central Huasco y la Línea férrea tienen menores emisiones, sus aportes también son menores. Estas tendencias coinciden con las observadas en los aportes al MP2,5 anual presentado en la Tabla 3-68.

Tabla 3-67 Aportes al MP10 anual [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por cada fuente emisora en Huasco

Instalación	Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
Planta de Pellets	Chimenea 2A	0,110	0,120	0,160	0,090	0,090	0,060	0,050
	Chimenea 2B	0,006	0,007	0,009	0,005	0,005	0,004	0,003

Instalación	Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
	CMP areales sin caminos	0,460	0,550	0,760	0,380	0,360	0,180	0,120
	Entrada a CAP - Pavimento	0,370	0,170	0,100	0,190	0,180	0,004	0,002
	PLL a CAP - Pavimento	0,003	0,006	0,006	0,002	0,002	0,001	0,000
Guacolda	Chimenea U1&2	0,480	0,490	0,500	0,480	0,480	0,430	0,380
	Chimenea U3	0,320	0,330	0,350	0,300	0,300	0,230	0,190
	Chimenea U4	0,160	0,170	0,180	0,150	0,150	0,130	0,110
	Chimenea U5	0,120	0,130	0,140	0,110	0,110	0,090	0,070
	Guacolda areales sin caminos	0,020	0,020	0,030	0,020	0,020	0,010	0,010
	Entrada a Guacolda - Pavimento	0,960	0,470	0,280	0,580	0,540	0,008	0,004
	Guacolda a Vertedero Guacolda - Tierra	0,290	0,410	0,270	0,290	0,270	0,070	0,040
Puerto Las Losas	PLL areales sin caminos	0,003	0,006	0,013	0,002	0,002	0,001	0,001
	PLL a CAP	0,004	0,012	0,014	0,002	0,002	0,001	0,000
Central Huasco	CT Huasco	0,005	0,006	0,008	0,005	0,005	0,002	0,002
Línea Férrea	Línea férrea	0,030	0,002	0,008	0,018	0,012	0,021	0,016

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-68 Aportes al MP2,5 anual [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por cada fuente emisora en Huasco

Instalación	Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
Planta de Pellets	Chimenea 2A	0,110	0,120	0,160	0,090	0,090	0,060	0,050
	Chimenea 2B	0,006	0,007	0,009	0,005	0,005	0,004	0,003
	CMP areales sin caminos	0,120	0,150	0,200	0,100	0,100	0,050	0,030
	Entrada a CAP - Pavimento	0,110	0,050	0,030	0,050	0,050	0,001	0,001
	PLL a CAP - Pavimento	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000
Guacolda	Chimenea U1&2	0,480	0,490	0,500	0,480	0,480	0,430	0,380
	Chimenea U3	0,330	0,330	0,350	0,300	0,300	0,230	0,190
	Chimenea U4	0,160	0,170	0,180	0,150	0,150	0,130	0,110
	Chimenea U5	0,120	0,130	0,140	0,110	0,110	0,090	0,070
	Guacolda areales sin caminos	0,005	0,005	0,006	0,004	0,004	0,002	0,002
	Entrada a Guacolda - Pavimento	0,730	0,360	0,210	0,440	0,410	0,006	0,003
	Guacolda a Vertedero Guacolda - Tierra	0,030	0,040	0,030	0,030	0,030	0,007	0,004
	PLL areales sin caminos	0,002	0,003	0,007	0,001	0,001	0,000	0,000

Instalación	Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
Puerto Las Losas	PLL a CAP	0,001	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
Central Huasco	CT Huasco	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
Línea Férrea	Línea férrea	0,030	0,002	0,008	0,018	0,012	0,021	0,016

Fuente: Elaboración propia

En el caso del MPS, las fuentes emisoras que tienen un mayor aporte en su concentración son las fuentes de camino: CMP areales, la entrada de CAP, la entrada a Guacolda y el camino al vertedero Guacolda. Seguida por la línea férrea, como se presenta en la Tabla 3-69.

Tabla 3-69 Aportes al MPS anual [mg/m²/día] por cada fuente emisora en Huasco

Instalación	Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
Planta de Pellets	Chimenea 2A	0,140	0,090	0,090	0,070	0,060	0,020	0,010
	Chimenea 2B	0,011	0,006	0,006	0,005	0,004	0,001	0,001
	CMP areales sin caminos	1,050	0,790	0,870	0,620	0,570	0,170	0,120
	Entrada a CAP - Pavimento	0,900	0,230	0,140	0,210	0,180	0,006	0,003
	PLL a CAP - Pavimento	0,018	0,019	0,014	0,006	0,006	0,001	0,001
Guacolda	Chimenea U1&2	0,040	0,030	0,020	0,030	0,030	0,015	0,010
	Chimenea U3	0,170	0,140	0,100	0,130	0,130	0,046	0,032
	Chimenea U4	0,090	0,070	0,050	0,070	0,070	0,030	0,020
	Chimenea U5	0,070	0,050	0,040	0,050	0,050	0,020	0,020
	Guacolda areales sin caminos	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,008	0,006
	Entrada a Guacolda - Pavimento	1,100	0,300	0,190	0,310	0,270	0,005	0,003
	Guacolda a Vertedero Guacolda - Tierra	1,060	1,000	0,310	0,570	0,510	0,090	0,060
Puerto Las Losas	PLL areales sin caminos	0,007	0,008	0,013	0,003	0,002	0,001	0,000
	PLL a CAP	0,020	0,019	0,022	0,005	0,005	0,001	0,001
Central Huasco	CT Huasco	0,014	0,010	0,009	0,010	0,010	0,004	0,003
Línea Férrea	Línea férrea	0,370	0,004	0,054	0,110	0,075	0,540	0,017

Fuente: Elaboración propia

3.7.3 Determinación de la relación emisión-calidad del aire para MP10 y MP2,5, según escenario sin y con medidas propuestas proyectadas a 15 años

A partir de los resultados del modelo de dispersión se puede establecer una relación entre emisiones y concentración para las principales fuentes emisoras en la zona. La estimación del factor emisión-concentración (FEC) para la zona y por tipo de fuente se realiza a través de un modelo aproximado del tipo *roll back* simple, el cual supone una relación lineal entre las emisiones de un contaminante y la concentración que genera. Este factor depende de los siguientes factores que determinan la dispersión de los contaminantes:

- Condiciones topográficas
- Meteorología de la zona

El cálculo del FEC es posible para distintas fuentes emisoras, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 3-10 Determinación del Factor Emisión Concentración

$$FEC_{i,e} = \frac{Emisiones_i}{Aporte\ concentración_{i,e}}$$

Donde:

- $FEC_{i,e}$: Factor Emisión Concentración para la fuente “i” en la estación “e”.
- $Emisiones_i$: Emisiones de la fuente “i”.
- $Aporte\ concentración_{i,e}$: Aporte a la concentración de la fuente “i” en la estación “e”.

Se obtuvieron FEC para MP10 y MP2,5 para las estaciones de monitoreo de la zona de Huasco. Las fuentes consideradas corresponden a las identificadas por el modelo de dispersión. Para el cálculo del FEC se utiliza el inventario de emisiones desarrollado en el presente estudio (ver Sección 3.6.1.2) y el aporte a la concentración estimada con el modelo de dispersión.

En la Tabla 3-70 y la Tabla 3-71 y la se presentan los FEC para MP10 y MP2,5, respectivamente, por estación de monitoreo para cada fuente. Los resultados se interpretan como la cantidad de emisiones anuales de MP10 o MP2,5 necesarias para aumentar la concentración anual del mismo contaminante en $1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se debe tener en consideración la incertidumbre asociada a los FEC presentados. Sin perjuicio de lo anterior, bajo criterio experto, estos FEC están dentro del orden de magnitud, y el orden entre fuentes debiera mantenerse. De los resultados se puede mencionar lo siguiente:

- La cercanía de las fuentes emisoras a cada estación en conjunto a la meteorología determina el FEC. Se observan resultados razonables, mientras más lejos está la fuente de las estaciones mayor es su FEC⁴¹. Lo anterior se observa para todas las fuentes en el caso de las estaciones SM4 y SM8.
- Las emisiones de fuentes más cercanas a las ciudades tienen un mayor impacto en las concentraciones.

⁴¹ Un FEC mayor implica que se requieren más emisiones para aumentar la concentración.

Tabla 3-70 FEC MP10 por fuente y estación de monitoreo

Instalación	Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
Planta de Pellets	Chimenea 2A	242,91	222,67	167,00	296,89	296,89	445,33	534,40
	Chimenea 2B	218,33	187,14	145,56	262,00	262,00	327,50	436,67
	CMP areales sin caminos	279,82	234,03	169,36	338,72	357,54	715,08	1.072,63
	Entrada a CAP - Pavimento	3,82	8,31	14,13	7,44	7,85	353,18	706,35
	PLL a CAP - Pavimento	159,49	78,30	67,29	226,65	253,32	717,73	1.076,59
Guacolda	Chimenea U1&2	104,93	102,79	100,73	104,93	104,93	117,13	132,54
	Chimenea U3	352,31	341,64	322,11	375,80	375,80	490,17	593,37
	Chimenea U4	383,30	360,75	340,71	408,85	408,85	471,75	557,52
	Chimenea U5	609,46	562,58	522,40	664,87	664,87	812,62	1.044,79
	Guacolda areales sin caminos	537,50	537,50	358,34	537,50	537,50	1.075,01	1.075,01
	Entrada a Guacolda - Pavimento	3,55	7,25	12,18	5,88	6,31	426,13	852,26
	Guacolda a Vertedero Guacolda - Tierra	127,40	90,11	136,84	127,40	136,84	527,82	923,68
Puerto Las Losas	PLL areales sin caminos	136,44	68,22	31,49	204,66	204,66	584,76	818,66
	PLL a CAP	94,05	31,35	26,87	188,10	188,10	626,99	940,48
Central Huasco	CT Huasco	473,67	394,72	296,04	473,67	473,67	1.184,17	1.184,17
Línea Férrea	Línea férrea	59,53	1.190,57	220,48	99,21	150,70	87,54	128,02

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-71 FEC MP2,5 por fuente y estación de monitoreo

Instalación	Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
Planta de Pellets	Chimenea 2A	89,91	82,42	61,81	109,89	109,89	164,83	197,80
	Chimenea 2B	81,67	70,00	54,44	98,00	98,00	122,50	163,33
	CMP areales sin caminos	280,70	224,56	168,42	336,84	336,84	673,67	1.122,79
	Entrada a CAP - Pavimento	3,62	7,97	13,28	7,97	7,97	398,44	796,89
	PLL a CAP - Pavimento	164,15	76,60	67,59	229,81	229,81	766,03	1.149,04
Guacolda	Chimenea U1&2	38,82	38,03	37,27	38,82	38,82	43,34	49,04
	Chimenea U3	126,41	126,41	119,18	139,05	139,05	181,36	219,55
	Chimenea U4	141,82	133,48	126,06	151,27	151,27	174,55	206,28
	Chimenea U5	225,50	208,15	193,29	246,00	246,00	300,67	386,57
	Guacolda areales sin caminos	526,58	526,58	438,81	658,22	658,22	1.316,44	1.316,44

Instalación	Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
	Entrada a Guacolda - Pavimento	3,54	7,17	12,30	5,87	6,30	430,35	860,70
	Guacolda a Vertedero Guacolda - Tierra	124,31	93,23	124,31	124,31	124,31	532,77	932,35
Puerto Las Losas	PLL areales sin caminos	124,73	70,68	30,73	212,04	212,04	558,00	815,53
	PLL a CAP	119,72	44,89	35,92	179,58	239,44	718,32	897,89
Central Huasco	CT Huasco	475,24	396,03	297,02	475,24	475,24	1.188,10	1.188,10
Línea Férrea	Línea férrea	59,53	1.190,57	217,79	99,21	148,82	85,04	127,56

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que la relación emisión/concentración para cada fuente de emisión (es decir, el FEC) solo depende de la ubicación de la fuente con respecto al receptor (estación de monitoreo de calidad del aire) y la meteorología. De esta forma, se estiman una sola vez, y se utilizan los mismos FEC para determinar, por ejemplo, el cambio de concentración del contaminante correspondiente en otro escenario o año de emisiones (ver Sección 3.9.3.5).

3.8 Determinación background de MP10 y MP2,5, para la zona en estudio

En esta sección se detalla la metodología y los resultados de la campaña de monitoreo realizada para estimar el background de MP10 y MP2,5 en la zona de estudio.

3.8.1 Campaña de monitoreo de background

La campaña de medición de material particulado se inició el 10 de abril del año 2023 y su duración es de 12 semanas. Para esto se utilizaron dos equipos de monitoreo continuo que registran los datos medidos en tiempo real, lo cual permite obtener una visión más completa de la calidad del aire, facilitando la identificación de patrones, tendencias y fluctuaciones en las concentraciones. En particular, se utilizaron equipos E-BAM⁴², monitores portátiles de aire atmosférico basado en el principio de la absorción/atenuación beta, comparables con los métodos de la EPA. La altura de medición es 210 cm (MP10) y 223 cm (MP2,5). Este instrumento automatiza la medición de partículas muestreando e informando continuamente datos de concentración. Usa isótopo radiactivo del Carbono 14 que, a través de su propiedad de atenuación de las partículas beta, permite la medición de la masa del material recolectado en un filtro. Los equipos instalados se conectan a una fuente de energía eléctrica y, en caso de cortes de luz, están diseñados para reanudar automáticamente el registro de mediciones una vez que se restablece el suministro eléctrico.

⁴² Disponible en: <https://metone.com/wp-content/uploads/2022/02/E-BAM-9800-Manual-Rev-P.pdf>

Dadas las características de la meteorología de la zona, se decidió realizar la medición en un sitio hacia el sur de Huasco, específicamente en el Parque Eólico San Juan de la comuna de Freirina, ya que en el norte no se encontraron sitios apropiados (empresas con terrenos que proporcionen seguridad y electricidad). La ubicación de los equipos se presenta en la Tabla 3-72 y la Figura 3-62, y se muestran en la Figura 3-63, mientras que en la Figura 3-64 se observa el entorno del sitio donde fueron instalados.

Tabla 3-72 Caracterización monitores

Instalación	Cantidad de monitores	Contaminantes medidos	Coordenadas UTM (WGS84 19J)	
			Coordenada E	Coordenada S
Parque Eólico San Juan	2	MP10, MP2,5	260.087	6.803.192

Fuente: Elaboración propia



Figura 3-62 Ubicación geográfica Parque Eólico San Juan

Fuente: Elaboración propia



Figura 3-63 Monitores continuos instalados para medir MP10 y MP2,5 en Parque Eólico San Juan

Fuente: Elaboración propia



Figura 3-64 Sitio donde fueron instalados los monitores continuos de medición en Parque Eólico San Juan

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, si bien los equipos de monitoreo no requieren mantención o cuidados adicionales, se solicitó reportar semanalmente el estado de estos, por lo que el parque asignó a un encargado de realizar el seguimiento. De esta forma, aproximadamente cada semana, el encargado del parque enviaba vía correo un reporte de los equipos con la siguiente información, respaldada mediante fotografías:

- Posición de los trípodes y monitores: Deben estar los soportes extendidos y topando con los pallets.
- Funcionamiento de los monitores: Verificar el sonido que emiten y que efectivamente estén encendidos.
- Estado de la corriente proveniente del enchufe al lado de la sala de gas, donde fueron conectados los monitores: Verificar con un tester. Además, debe estar encendida la luz de la zapatilla.

Los resultados de los reportes de seguimiento de los equipos de monitoreo evidenciaron que estos funcionaron de forma correcta durante todo el periodo de medición.

3.8.2 Resultados de la campaña de monitoreo de background

El día 31 de julio de 2023 finalizó la campaña de monitoreo con la desinstalación de los dos equipos del Parque Eólico. Al finalizar la campaña, el equipo que midió MP10 sufrió golpes en el avión durante el viaje de retorno a Santiago, impidiendo, hasta la fecha, la obtención de las mediciones. Este fue llevado a servicio técnico, donde el diagnóstico fue el siguiente: “Equipo no enciende, solo se ilumina *display*; no responde a teclado ni a rescate de datos. Se desarma el equipo, se reaprietan todos los terminales eléctricos y se mide voltaje de pila. Se rearma el equipo y se realiza medición en paralelo por dos días con equipo patrón de SETEC, obteniendo datos que siguen tendencia correcta.”

Además, otro inconveniente que hubo es que la memoria del equipo es de poca capacidad, por lo que se sobrescribieron los datos. Esto limitó en la práctica la cantidad de datos rescatados a 2 semanas, en el caso del monitor que no sufrió daños.

A continuación, en la Figura 3-65 se presenta la serie de tiempo de MP2,5 del sitio remoto. Adicionalmente, en la Figura 3-66 se presenta el perfil diario de MP2,5, incluyendo valores promedios, los percentiles 5/95 (sombra verde claro) y 25/75 (sombra verde oscuro).

La serie de tiempo muestra que las concentraciones de MP2,5 son menores a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante los días de semana, y el fin de semana (días 29 y 30) incrementan. El perfil diario muestra un leve incremento de las concentraciones de material particulado entre las 9 horas y las 21 horas. Estas concentraciones son bastante bajas, lo que es esperable para un sitio background.

La concentración promedio del MP2,5 es de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo de julio 2023, pero este promedio está muy influenciado por el evento de altas concentraciones relativas registrado el 30 de julio, por lo que este valor parece ser alto como medición de background en la zona. De hecho, para el mismo periodo de julio 2023, las estaciones SIVICA y EME M en Huasco tienen promedio de MP2,5 de 7,2 y $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, lo que sugiere que el background debería ser menor a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

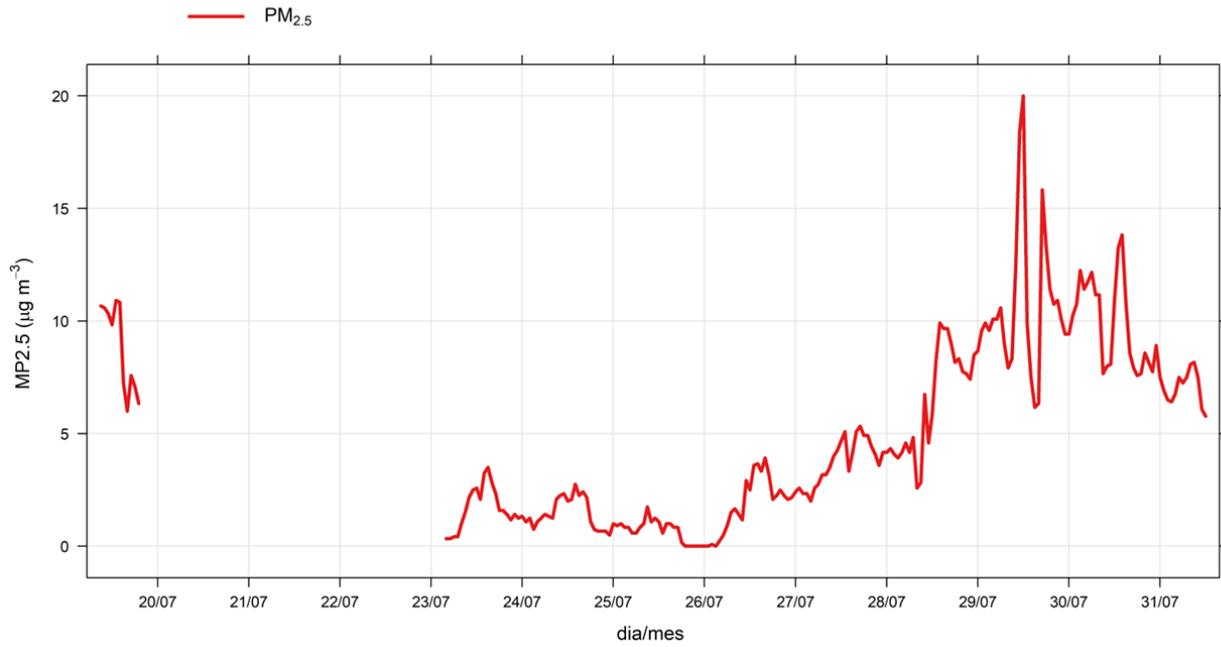


Figura 3-65 Serie de tiempo del MP2,5 en Parque Eólico San Juan

Fuente: Elaboración propia

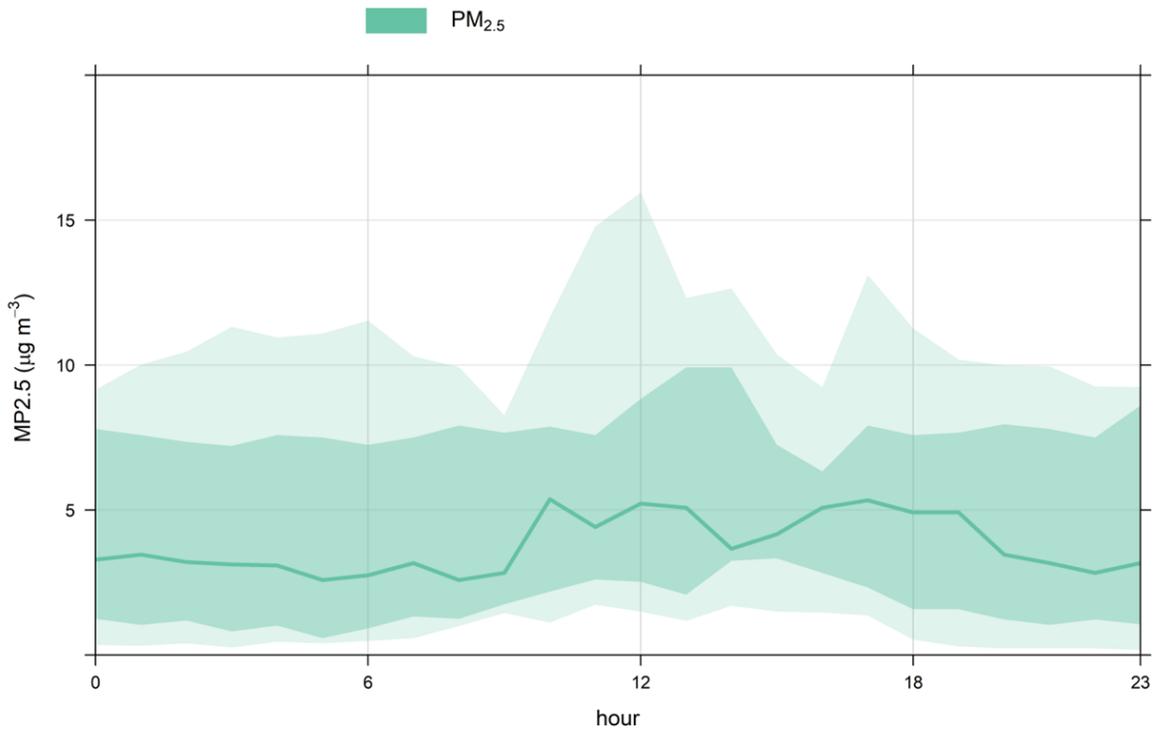


Figura 3-66 Perfil diario del MP2,5 en Parque Eólico San Juan

Fuente: Elaboración propia

Se solicitó la información de meteorología para correlacionar los datos medidos con la velocidad del viento y así poder reconstruir las mediciones en el sitio remoto para un periodo más representativo del comportamiento de largo plazo del MP_{2,5} en la zona. Sin embargo, por temas de confidencialidad, esta información no fue proporcionada al equipo consultor. Solo se realizó un traspaso de información de un pronóstico meteorológico en la zona, pero sin detalles de la altura de referencia ni el lugar donde se estimaron los datos, por lo que esta información no es trazable y, por ende, no se puede utilizar en análisis de resultados. Debido a estas dificultades, se optó por realizar un análisis alternativo para la estimación del background, el cual se presenta en la siguiente sección.

3.8.3 Estimación alternativa del background

Para determinar el nivel background de material particulado, se utilizó el enfoque de modelos de Markov ocultos (Hidden Markov Models, HMM). Este es un enfoque estadístico que permite identificar parámetros desconocidos en una serie temporal de datos observados, asumiendo que la serie se puede modelar como un proceso estocástico, caracterizado por cambios en la calidad del aire asociados a la influencia de diferentes fuentes emisoras en diferentes periodos. Para estimar el MP background, el modelo utiliza como dato de entrada las concentraciones de material particulado observadas en un determinado período y los agrupa en diferentes clústeres de acuerdo con su valor, es decir, cada clúster tiene concentraciones similares entre sí. Por lo tanto, el clúster con menor valor representa el material particulado background de la serie de tiempo. Para escoger el número de clústeres que mejor representa los datos originales, se emplea un criterio de contenido de información de Bayes (BIC, Bayesian Information Criterium). Este modelo ha sido utilizado en varias publicaciones científicas para identificar el MP background⁴³.

En el presente estudio se utilizaron los datos de las estaciones de monitoreo Huasco Sivica, EME M y 21 de Mayo, presentadas en la Figura 3-67, entre los años 2019 y 2022. La estación EME F fue excluida del análisis porque registra concentraciones sistemáticamente mayores a las otras tres estaciones, lo que implica que hay fuentes de emisión muy locales que están afectando las mediciones de ese monitor.

⁴³ Gómez-Losada, Á., Pires, J. C. M., & Pino-Mejías, R. (2016). Characterization of background air pollution exposure in urban environments using a metric based on Hidden Markov Models. *Atmospheric environment*, 127, 255-261



Figura 3-67 Estaciones de monitoreo analizadas

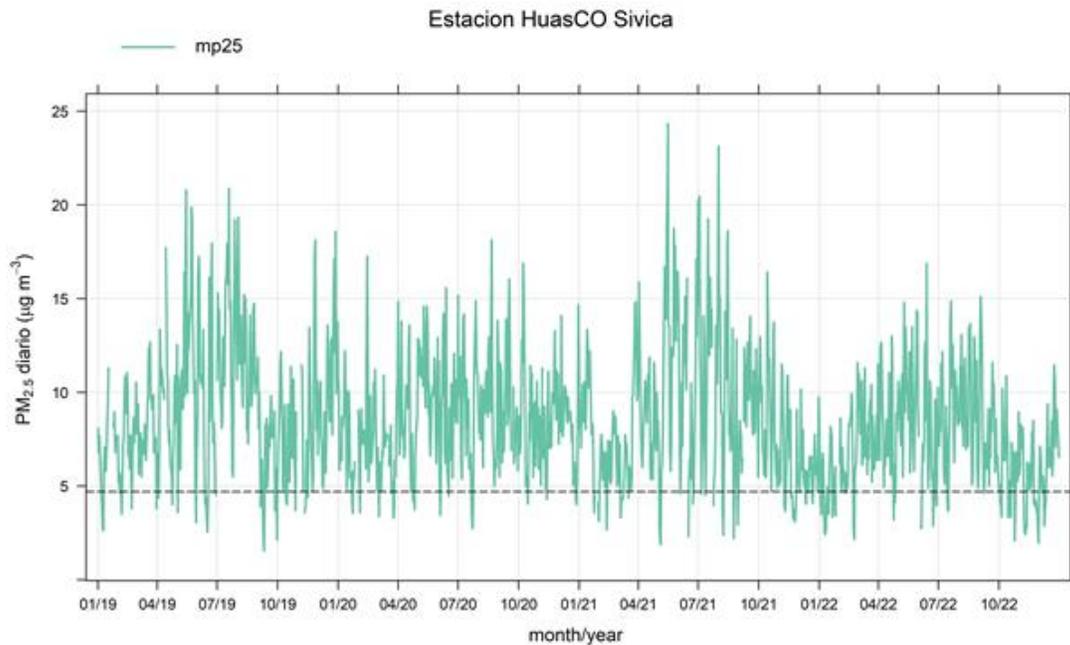
Fuente: Elaboración propia

El modelo HMM fue aplicado en el software R. La Figura 3-68, Figura 3-69 y Figura 3-70 muestran las concentraciones diarias de MP_{2,5} registradas para el periodo 2019-2022 en la estación Huasco Sivica, EME M y 21 de Mayo, respectivamente, mientras que la Figura 3-71 ilustra las concentraciones diarias de MP₁₀ en la estación 21 de Mayo. En cada una de estas gráficas se presenta también, mediante una línea punteada, el background promedio, estimado mediante la metodología descrita, para el contaminante y estación de monitoreo. A partir de lo anterior, en la Tabla 3-73 se presenta el background estimado para MP_{2,5} y en la Tabla 3-74 para MP₁₀. De esta forma, aplicando el modelo HMM se obtiene que el **background de MP_{2,5} en la zona de Huasco es de 4,53 µg/m³ y el MP₁₀ background es de 13,87 µg/m³**. Este nivel de background es similar al valor (de corto plazo) medido en la campaña de mediciones realizada en la zona del parque eólico San Juan.

En la Tabla 3-73 se puede notar que en las tres estaciones de monitoreo con datos de MP_{2,5}, el clúster de background tuvo una media de concentración estadísticamente idéntica en los tres casos. Esto muestra que el modelo es robusto y entrega un resultado consistente, ya que implica la ausencia de efectos de fuentes antropogénicas, por lo que dicho nivel debería ser similar en

las tres estaciones. En los tres casos, se identificaron condiciones de background en más de 150 días de monitoreo, lo que explica la robustez estadística del método.

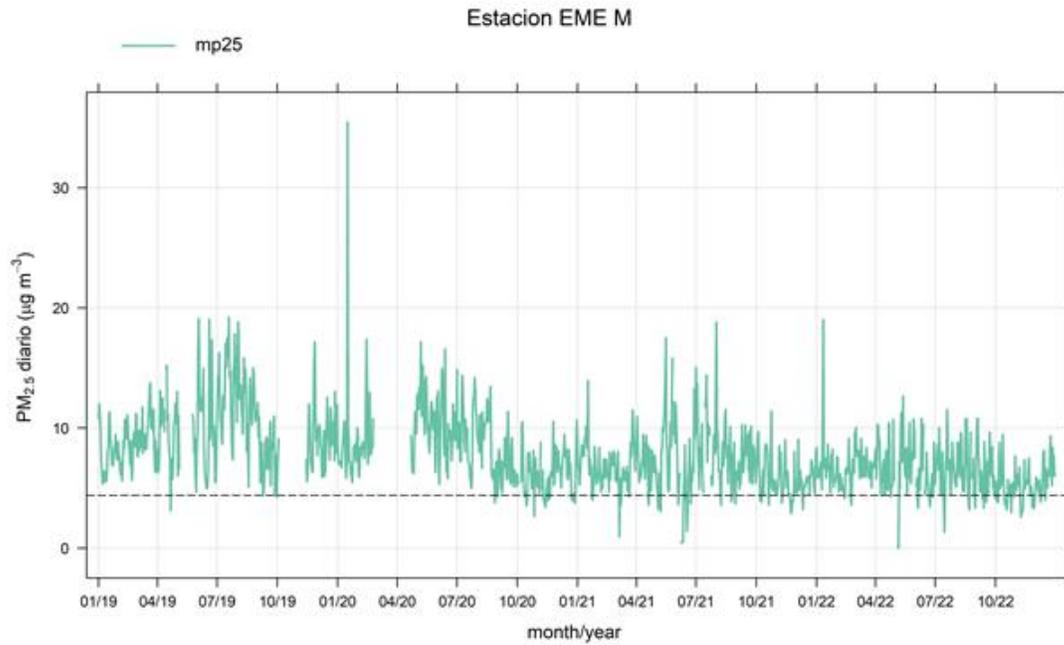
Por otra parte, el valor estimado de background para el MP10, presentado en la Tabla 3-74, aunque solo se pudo estimar para una estación, es más del doble del valor del background de MP2,5, lo cual es razonable dada la presencia de partículas naturales en la zona (polvo suspendido por el viento, aerosol marino) que se caracterizan por tener un predominio de tamaños gruesos.



Nota: La línea punteada representa el MP background promedio estimado.

Figura 3-68 Concentraciones diarias de MP2,5 estación Huasco Sivica (2019-2022)

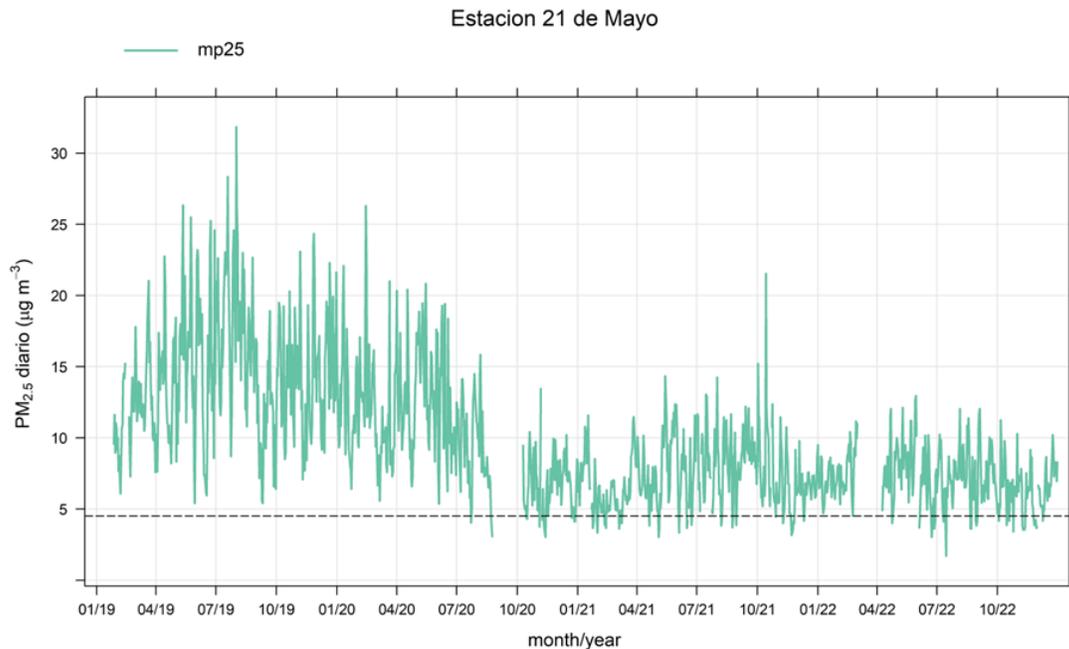
Fuente: Elaboración propia



Nota: La línea punteada representa el MP background promedio estimado.

Figura 3-69 Concentraciones diarias de MP2,5 estación EME M (2019-2022)

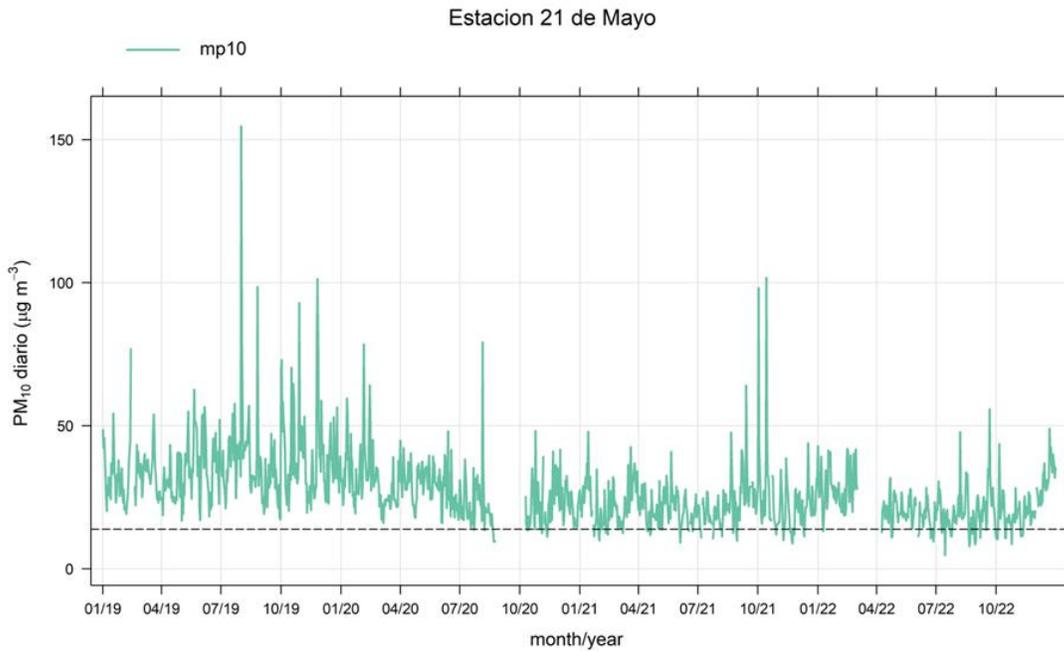
Fuente: Elaboración propia



Nota: La línea punteada representa el MP background promedio estimado.

Figura 3-70 Concentraciones diarias de MP2,5 estación 21 de mayo (2019-2022)

Fuente: Elaboración propia



Nota: La línea punteada representa el MP background promedio estimado.

Figura 3-71 Concentraciones diarias de MP10 estación 21 de mayo (2019-2022)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-73 Niveles de MP2,5 Background en la zona de estudio.

Estación	Tamaño (días)	Rango (µg/m³)	Promedio (µg/m³)	St dev
Huasco Sivica	338	1,5-7,5	4,70	1,19
EME M	169	0-6,25	4,37	1,26
21 de Mayo	156	1,7-6,0	4,51	0,77
Promedio	-	-	4,53	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-74 Niveles de MP10 Background en la zona de estudio.

Estación	Tamaño (días)	Rango (µg/m³)	Promedio (µg/m³)	St dev
21 de Mayo	261	4,71-19,0	13,87	2,58

Fuente: Elaboración propia

Para chequear estas estimaciones del background, se procedió a comparar la suma de todos los aportes de fuentes antropogénicas en las estaciones de monitoreo (estimados con el modelo de dispersión CALPUFF, ver sección 3.7.2) más el background estimado en la presente sección, con las respectivas concentraciones totales medidas en las estaciones de monitoreo en la zona de Huasco. La Tabla 3-75 resume este cálculo, en donde se aprecia que, en promedio, el modelo de dispersión (más el background estimado) predice una concentración de MP10 en Huasco de 26,1

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el promedio observado es de $29,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta diferencia de $3,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (o del 12%) se considera aceptable dado el nivel de error propagado en la aplicación de un modelo de dispersión. La mayor sobrestimación que se presenta en el caso del modelo aplicado al MP2,5 puede deberse a sobrestimación de emisiones.

Tabla 3-75 Comparación de modelación y monitoreo de MP10 y MP2,5 en la zona de estudio

Contaminante	MP10			MP2,5			
	Estación	Modelado	Modelado + background	Observado	Modelado	Modelado + background	Observado
EME F		18,3	32,1	31,2	10,0	14,5	16,3
21 de Mayo		12,0	25,9	22,6	6,7	11,3	7,4
Huasco II		4,5	18,4	28,3	2,4	6,9	
Huasco Sivica		16,3	30,2	-	9,5	14,0	8,7
EME M		13,9	27,8	36,5	8,0	12,5	6,9

Fuente: Elaboración propia

3.9 Análisis y propuesta de mejoras para las medidas vigentes del PPA

Se analizan y proponen, para cada una de las medidas vigentes del Plan, oportunidades de mejoras o precisiones. Esto se realizó a través de las actividades que serán descritas en las siguientes secciones.

3.9.1 Evaluación de la aplicación de las medidas, estudios e instrumentos establecidos en el PPA

Se evalúa la aplicación de las medidas, estudios e instrumentos establecidos en el PPA Huasco en forma global y específica, desde el año 2017 a la fecha, con el propósito de verificar el cumplimiento de las actividades comprometidas, en plazo, forma y alcance, así como su consistencia con las metas de reducción de emisiones comprometidas.

3.9.1.1 Impacto del Plan en la evolución de la calidad del aire

En el contexto del Plan, para dar seguimiento a la calidad del aire por MP10 en la zona afecta, se cuenta con una red de monitoreo conformada por las siguientes estaciones con representatividad poblacional (EMRP): EME-F, EME-M y Huasco II. En la Sección 3.7.1.1 se presenta la información histórica disponible desde el año 2016 hasta la fecha, con lo cual se evalúa la norma anual y diaria de MP10. Con respecto a la norma anual, que establece como límite una concentración de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, mediante el cálculo de los promedios tri-anales entre 2016 y 2021, se determina que esta no fue superada en ninguna de las estaciones con EMRP, como se muestra en la Figura 3-72. Además, se puede notar que el promedio tri-anual de las concentraciones de MP10 ha disminuido durante el tiempo en todas las estaciones. En el año

2018 (que incluye 2016, 2017 y 2018) las concentraciones determinadas mediante el promedio tri-anual en las estaciones EME-F, EME-M y Huasco II correspondieron a 38, 35 y 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ respectivamente, mientras que en 2021 (que incluye 2019, 2020 y 2021) fueron 33, 35 y 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

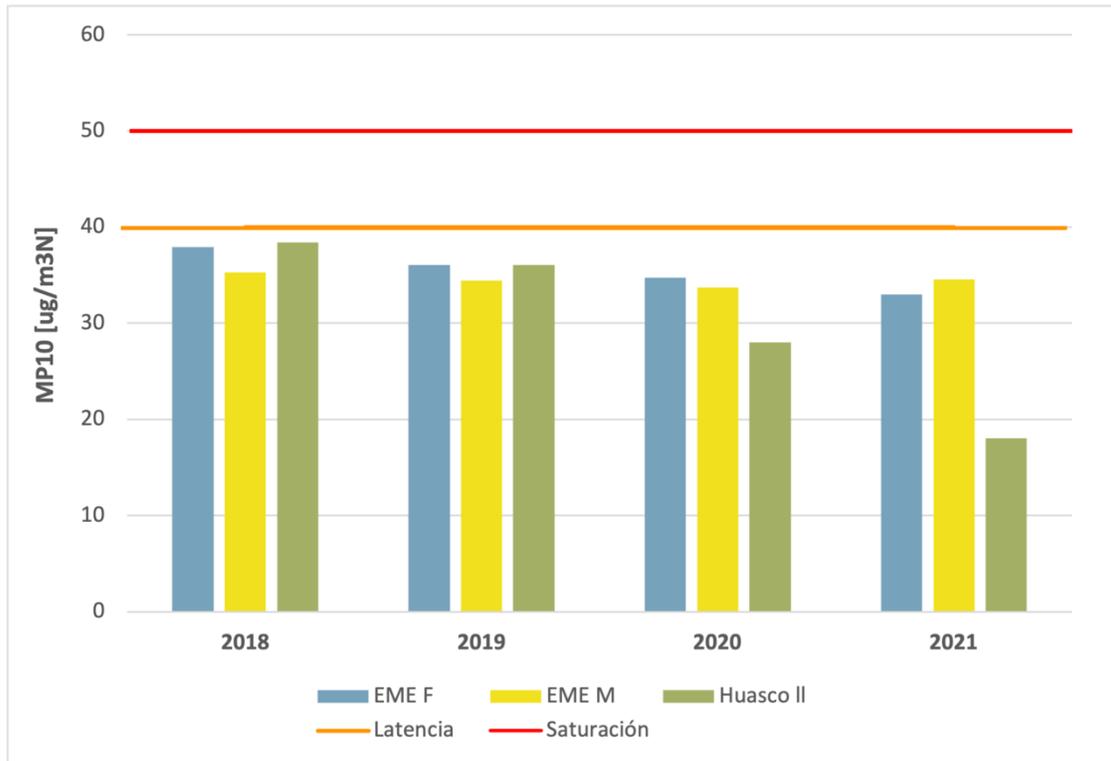


Figura 3-72 Evaluación norma anual MP10

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la norma de 24 horas de MP10, cuyo valor límite era 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en los años de evaluación⁴⁴, mediante el cálculo del percentil 98 de las concentraciones diarias de cada año se pudo observar que esta no fue sobrepasada en ningún año, así como tampoco el nivel de latencia. En este caso, también se observa una tendencia a la baja en las concentraciones.

⁴⁴ Este valor fue actualizado a 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ mediante el Decreto N°12/2021 del MMA.

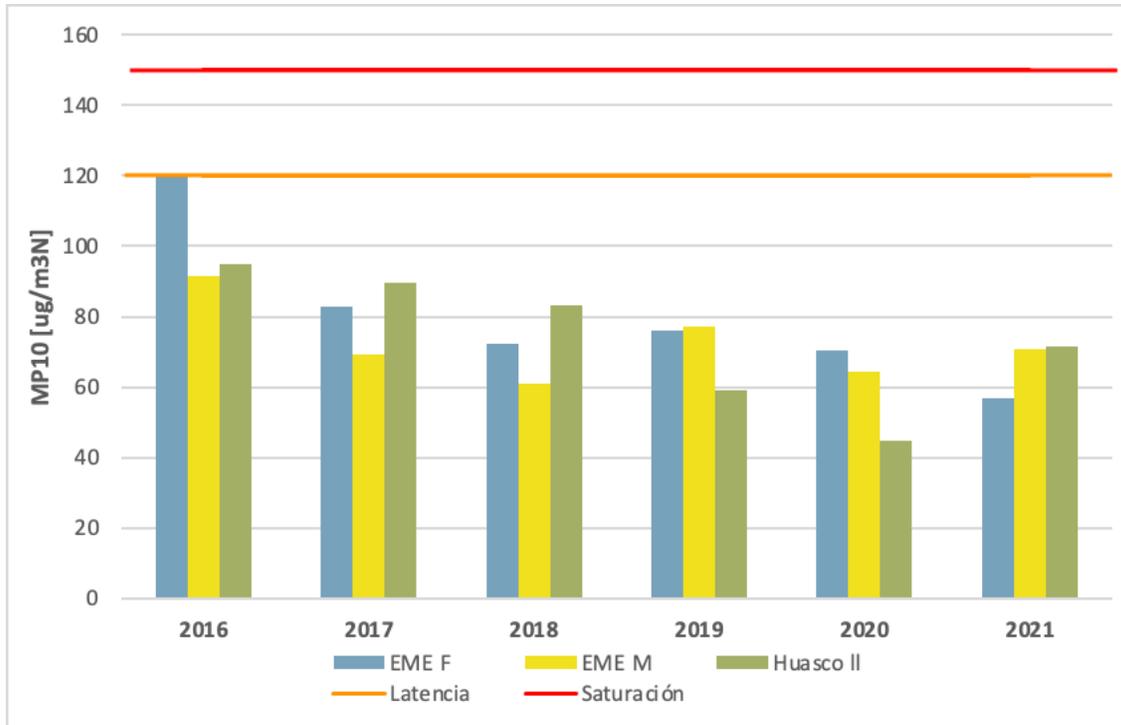


Figura 3-73 Evaluación norma diaria MP10

Fuente: Elaboración propia

Lo expuesto anteriormente refleja que, a medida que el Plan ha sido implementado, las concentraciones anuales y diarias de MP10 han disminuido, permitiendo que se encuentre por debajo de la latencia. De esta forma, el Plan ha cumplido con su objetivo de implementación, logrando reducir las concentraciones de MP10 como concentración anual para evitar alcanzar la condición de saturación.

3.9.1.2 Estado de avance de las medidas del Plan

Por otro lado, se realiza una revisión del PPA Huasco para identificar y recopilar todas las medidas, condiciones y metas que se establecen. En particular, las exigencias del PPA están dirigidas a las principales actividades emisoras, siendo estas la termoeléctrica Guacolda y la Planta de Pellets. El artículo 4 del Plan establece las metas de reducción de emisiones, resumidas en la Tabla 3-76.

Tabla 3-76 Metas de reducción de emisiones de material particulado

Actividad	Sin combustión		Con combustión	
	Reducción de emisiones [t/año]	Porcentaje de reducción respecto a la emisión base [%]	Reducción de emisiones [t/año]	Porcentaje de reducción respecto a la emisión base [%]
Planta de pellets de CAP Minería	303	53	1.100	76
Central Termoeléctrica Guacolda de Aes Gener	25	35	191	21
Total	333	51⁽¹⁾	1.291	55⁽²⁾

(1) Porcentaje de reducción respecto del total de emisiones sin combustión de la tabla 2 del artículo 4 del PPA Huasco.

(2) Porcentaje de reducción respecto del total de emisiones con combustión de la tabla 3 del artículo 4 del PPA Huasco.

Fuente: Extracto de artículo 5 PPA Huasco

Se identifican 25 medidas que se encuentran agrupadas en las siguientes categorías:

- Regulatoria: Normas de carácter general y obligatorio establecidas directamente en el Plan que regulan a fuentes emisoras u otras actividades de interés.
- Educación y difusión: Medidas que buscan motivar a las personas respecto de prácticas sustentables y de informar respecto del contenido y proceso de ejecución del Plan.
- Estudios: Medidas que tienen por objeto generar información que permita evaluar, hacer un diagnóstico, proponer otras medidas, etc.
- Política Pública: Medidas de política pública generales y elaboración de normativa general o autorregulación.

En particular, 14 medidas son tipo “Regulatoria”, 7 de la categoría “Política Pública”, 3 de “Educación y difusión” y 1 correspondiente a la categoría “Estudio”. Adicionalmente, cada medida abarca una o más temáticas, las cuales pueden corresponder al control de emisiones de actividades con combustión, control de emisiones de actividades sin combustión, compensación de emisiones y prohibición de quema, programa de difusión y educación ambiental, y por último la temática de seguimiento y vigilancia de la calidad del aire. Cabe destacar que con frecuencia anual se reporta el estado de avance de las medidas que deben ser implementadas en conformidad con el Plan, por lo que el principal insumo de esta evaluación es el último informe publicado al respecto, consolidado por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA)⁴⁵.

En la Tabla 3-77 se presentan las 25 medidas consideradas en el PPA clasificadas por categoría, junto con la entidad a cargo de su implementación o cumplimiento, el plazo en el que se debería iniciar su implementación y el artículo del Plan donde se detalla.

⁴⁵ Informe del Estado de Avance de las medidas e instrumentos del Plan, año 2021.

Tabla 3-77 Medidas PPA Huasco

Categoría	ID	Medida	Entidad ejecutora	Plazo	Referencia
Regulatoria	M1	Límite máximo emisión anual de MP fuentes con combustión	Planta de Pellets Termoeléctrica Guacolda	2018	Artículo 6
	M2	Límite máximo emisión anual de MP fuentes con combustión	Planta de Pellets	2021	Artículo 6
	M3	Límite máximo emisión anual de MP en chimeneas 2A y 2B	Planta de Pellets	2021	Artículo 7
	M4	Límite máximo emisión anual de MP en chimenea 3	Planta de Pellets	No definido	Artículo 7
	M5	Límite máximo emisión anual de MP en chimeneas U1, U2, U3, U4 y U5	Termoeléctrica Guacolda	2018	Artículo 7
	M6	Control de emisiones de actividades sin combustión	Planta de Pellets	Específico para cada medida ^a	Artículo 8 y 9
	M7	Control de emisiones de actividades sin combustión	Termoeléctrica Guacolda	Específico para cada medida ^a	Artículo 10 y 11
	M8	Registro de datos de monitoreo en plataforma web	Empresas con sistemas de monitoreo continuo y estaciones de monitoreo	2018	Artículo 15 y 23
	M9	Implementación acciones para optimización y mejoramiento monitoreo de la calidad del aire y meteorología	Empresas que cuenten con estaciones de monitoreo de calidad del aire	1 año desde notificación	Artículo 20
	M10	Aprobación y validación sistema de monitoreo continuo	Planta de Pellets	2019	Artículo 23
	M11	Sistema de monitoreo continuo de emisiones de MP	Proyectos que se sometan al SEIA	2017	Artículo 23
	M12	Sistema de monitoreo continuo de emisiones de MP	Proyectos con RCA que incluyan calderas o procesos industriales con combustión de potencias térmicas mayores o iguales a 20 MWt	2020	Artículo 23
	M13	Hidrolavado automático de vagones	Planta de Pellets	Septiembre 2019	Artículo 24
	M14	Requisitos y contenidos mínimos del informe anual	Planta de Pellets Termoeléctrica Guacolda Proyectos con límite de emisión en chimenea	2018	Artículo 23
Política Pública	M15	Plan de Control Integral CAP Minería	Planta de Pellets	2019	Artículo 8
	M16	Plan de Control Integral Guacolda Energía S.A.	Termoeléctrica Guacolda	2019	Artículo 10
	M17	Publicación y difusión concentración anual de MP10	Seremi del Medio Ambiente	2019	Artículo 15
	M18	Programa de involucramiento comunitario y educación ambiental	Seremi del Medio Ambiente	2017	Artículo 16

Categoría	ID	Medida	Entidad ejecutora	Plazo	Referencia
	M19	Programa de fortalecimiento de la gestión ambiental local	Seremi del Medio Ambiente Ilustre Municipalidad de Huasco	Durante vigencia del Plan	Artículo 17
	M20	Acciones de certificación ambiental voluntaria de establecimientos educacionales	Seremi del Medio Ambiente Ilustre Municipalidad de Huasco	Durante vigencia del Plan	Artículo 18
	M21	Fondo de Protección Ambiental	Seremi del Medio Ambiente	Durante vigencia del Plan	Artículo 19
Educación y difusión	M22	Plataforma web con datos de sistema de monitoreo continuo	Ministerio del Medio Ambiente	2018	Artículo 15
	M23	Estudio de operación, gestión y configuración red de monitoreo de calidad del aire y meteorología	Ministerio del Medio Ambiente Superintendencia del Medio Ambiente	2019	Artículo 20
	M24	Acciones de mejoramiento y rediseño de monitoreo de la calidad del aire y meteorología	Ministerio del Medio Ambiente	6 meses desde finalización de estudio de medida anterior	Artículo 20
Estudio	M25	Programa de compensación de emisiones SEIA	Proyectos o actividades que se sometan al SEIA	2017	Artículo 12 y 13

a: Si bien el plazo para la presentación de los PCI es de seis meses contado desde la entrada en vigencia del PPA, el plazo establecido para su ejecución comienza a regir desde la aprobación de los respectivos Planes por parte de la Seremi de Medio Ambiente de Atacama, y a su vez, cada medida incluida tiene su plazo específico.

Fuente: Elaboración propia en base a Informe del Estado de Avance de las medidas e instrumentos del Plan (MMA, 2021).

A partir de lo anterior, se evalúa el avance de cada medida con el propósito de verificar el cumplimiento de las actividades comprometidas. En la Tabla 3-78 se presenta un resumen de esta evaluación para las medidas que actualmente se encuentran vigentes, considerando que el estado de avance de algunas de ellas no es posible verificarse dado que no se cumplen los supuestos establecidos en el Plan para su implementación (M4 y M9).

Tabla 3-78 Evaluación avance medidas PPA Huasco

ID Medida	Estado de avance
M1	Las emisiones anuales de MP generadas por fuentes con combustión en la Planta de Pellets y de la Termoeléctrica Guacolda se encuentran por debajo del límite máximo (ver Sección 3.6.1.2).
M2	Chimenea 2B se encuentra fuera de operación hasta 19 de noviembre de 2021 mientras se instala un precipitador electrostático, para cumplir con el límite máximo (ver Sección 3.6.1.2).
M3	Chimenea 2B se encuentra fuera de operación hasta 19 de noviembre de 2021 mientras se instala un precipitador electrostático, para cumplir con límite máximo. A través de los CEMS se verifica que el límite de emisión como concentración se cumple en ambas chimeneas a partir de 2021.

ID Medida	Estado de avance
M4	No aplica porque chimenea 3 de la Planta de Pellets no ha sido construida.
M5	A través de los CEMS se verifica que el límite de emisión como concentración se cumple en las cuatro chimeneas a partir de 2018.
M6	La Resolución N°32, de fecha 29 de marzo de 2019, aprueba el Plan de Control Integral de emisiones en actividades sin combustión de la Planta de Pellets CAP Minería. En la plataforma web del SNIFA se encuentran disponibles las fiscalizaciones en el marco del PPA, donde se evalúa el avance de los PCI. Desde su aprobación comienzan a computarse los plazos para las medidas de los PCI.
M7	La Resolución N°11, de fecha 26 de febrero de 2019, aprueba el Plan de Control Integral de emisiones en actividades sin combustión de la Termoeléctrica Guacolda. En la plataforma web del SNIFA se encuentran disponibles las fiscalizaciones en el marco del PPA, donde se evalúa el avance de los PCI. Desde su aprobación comienzan a computarse los plazos para las medidas de los PCI.
M8	La Resolución Exenta N°1013/2020 aprueba la Propuesta de conexión en línea de los datos de monitoreo de emisiones de los CEMS instalados en las unidades 1&2, 3, 4 y 5 de la Central Termoeléctrica Guacolda. La Resolución Exenta N°1038/2019 aprueba la Propuesta de conexión en línea de los datos de monitoreo de emisiones de los CEMS instalados en las chimeneas 2A y 2B de la Planta de Pellets de CAP Minería.
M9	No aplica.
M10	El CEMS se encuentra validado inicialmente de acuerdo a la Resolución N°1779/2019 para el caso de la chimenea 2A y N°1778/2019 en la chimenea 2B. Se realiza ensayo de validación anual, y se ingresa IREV (Informe de Resultados Ensayo de Validación) en SIVEM (Sistema de Validación de Equipos de Monitoreo) de CAP Minería.
M11	A la fecha no han existido proyectos evaluados en SEIA afectos a la medida.
M12	A la fecha no han existido proyectos con RCA afectos a la medida.
M13	El sistema de hidrolavado junto con la cámara fueron verificadas en inspección ambiental realizada por SMA en noviembre 2019. Disponible en: https://www.ipcamlive.com/60afab3a7bb2d .
M14	La Instrucción del Reporte Anual fue elaborada durante el año 2020 y publicada mediante la Resolución Exenta N°2533/2020 de la SMA. La Planta de Pellets indica que su operación requiere de una concentración de oxígeno tal que sus emisiones son evacuadas con un porcentaje de oxígeno de entre 17 y 18% ⁴⁶ .
M15	A través de la Resolución Exenta N°032/2019 se aprueba el Plan de Control Integral de emisiones en actividades sin combustión de la Planta de Pellets CAP Minería.
M16	A través de la Resolución Exenta N°011/2019 se aprueba el Plan de Control Integral de emisiones en actividades sin combustión de la Termoeléctrica Guacolda.
M17	La publicación anual del valor de la concentración anual de MP10 de las estaciones EME-M, EME-F, 21 de mayo y Huasco II, puede ser consultada en la plataforma web https://ppda.mma.gob.cl/atacama/ppa-huasco-y-su-zona-circundante/ . En febrero de 2019 se realizó la primera publicación, correspondiente a la concentración de MP10 del año 2018.

⁴⁶ DIA "Sistema de Control de Emisiones Planta de Pellets de Huasco". Disponible en: https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=2139226312

ID Medida	Estado de avance
M18	Seremi de Medio Ambiente informa la ejecución de jornadas anuales de capacitación de calidad del aire realizadas a la comunidad de Huasco desde el año 2019.
M19	Seremi de Medio Ambiente informa la realización de jornadas anuales de capacitación a funcionarios municipales desde 2019. Decreto N°1333/2021 aprueba el programa de limpieza periódica, que será actualizado cada 2 años.
M20	Hasta la fecha, en Huasco existen 3 establecimientos certificados y otros 2 en proceso, disponibles en la plataforma web https://sncae.mma.gob.cl/portal/establecimientos .
M21	Seremi de Medio Ambiente de Atacama realiza concursos de Fondo de Protección Ambiental (FPA), difundidos mediante redes sociales y la plataforma web https://fondos.mma.gob.cl/fpa/ .
M22	Plataforma web a cargo del MMA que despliega públicamente los datos de los sistemas de monitoreo continuo de emisiones en chimenea y de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, disponible en: https://ppda.mma.gob.cl/atacama/ppa-huasco-y-su-zona-circundante/ .
M23	El proyecto "Rediseño y modernización de las redes de monitoreo de calidad del aire de las comunas de Calama, Huasco y Coronel" finalizó en diciembre 2021.
M24	Se contempla en el PRAS medida de implementación de una estación de monitoreo estatal que permita mejorar el sistema de monitoreo de calidad de aire y de emisiones.
M25	Los proyectos "Planta Desalinizadora Guacolda", "Modificación recepción y embarque graneles minerales" y "Depósito de Relaves Filtrados, Planta de Pellets" aprobados posterior a la publicación del Plan, poseen un Plan de Compensación de Emisiones.

Fuente: Elaboración propia

3.9.1.3 Observaciones sobre las medidas del Plan

A partir de los ítems precedentes, se proponen oportunidades de mejoras u observaciones para cada una de las medidas vigentes del Plan.

En primer lugar, el límite de emisión establecido en la medida "Límite máximo emisión anual de MP fuentes con combustión" (M1) continua vigente para la termoeléctrica Guacolda, cuyas emisiones totales de fuentes con combustión durante 2021 representa un 19% del valor máximo (ver Sección 3.6.1.2), como se muestra en la Figura 3-74. Lo anterior permite concluir que la medida está siendo cumplida y es efectiva en cuanto a la reducción de emisiones de MP en la termoeléctrica. Así mismo, la medida "Límite máximo emisión anual de MP fuentes con combustión" (M2) también ha sido implementada por la Planta de Pellets durante el año 2021, al incorporar un precipitador electrostático en la chimenea 2B. Mientras tanto, las emisiones dejaron de ser evacuadas por la chimenea 2B hasta que se puso en funcionamiento el nuevo sistema de abatimiento, por lo que las emisiones totales alcanzaron un 11% del límite máximo.

Lo anterior refleja la factibilidad de disminuir las emisiones máximas permitidas por el Plan. Para evaluar esto en el caso de Guacolda, resulta relevante analizar las emisiones reales de MP estimadas durante los años evaluados (2017-2021), las emisiones que generarían si la central

operase a su capacidad máxima, y las emisiones aprobadas ambientalmente por RCA⁴⁷, lo cual se ilustra en la Figura 3-75. Se puede observar que las emisiones representan, en promedio, un 29% de las aprobadas por RCA y un 76% de las que generarían operando a capacidad máxima. Además, tanto la emisión aprobada ambientalmente como la emisión considerando operación a capacidad máxima son menores al límite actualmente vigente del PPA.

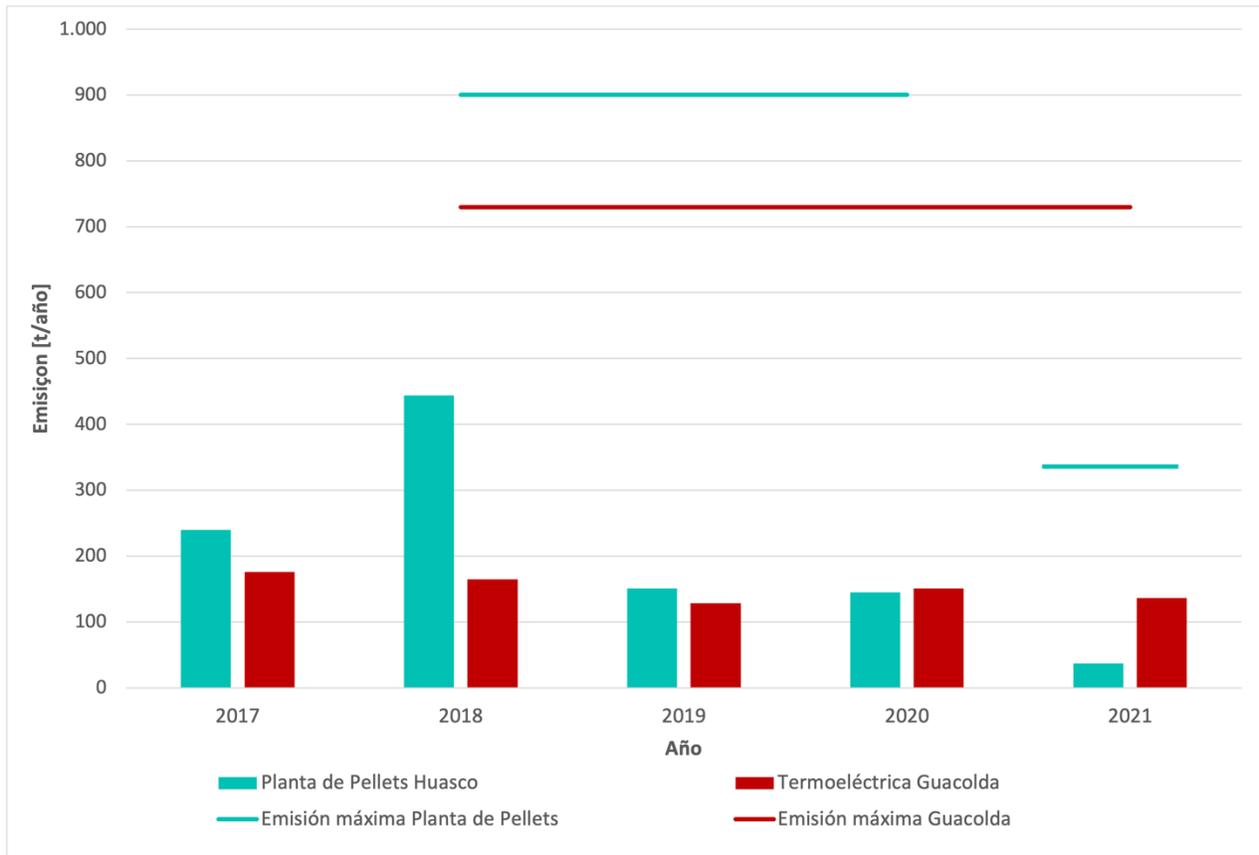
Considerando lo anterior, se propone disminuir el límite a 200 t/año para la Termoeléctrica Guacolda, correspondiente a las emisiones que generaría si la central operase a su capacidad máxima. El límite resulta razonablemente ambicioso considerando las emisiones generadas entre 2017 y 2021, como se muestra en la Figura 3-76. Si bien es muy poco probable que la central opere a su capacidad máxima, el límite propuesto representa un 27% del límite vigente, por lo que cumple con aumentar la exigencia, pero de forma conservadora.

En el caso de la Planta de Pellets, el límite de emisión de 341 t/año que empezó a aplicar desde 2021 no habría sido superado en ningún año, a excepción de 2018. Sin embargo, las 37 t/año emitidas durante 2021 se deben, en parte, al cese operativo de la chimenea 2B, por lo que no es representativo. Es relevante considerar también las emisiones aprobadas ambientalmente mediante RCA. En particular, la DIA “Sistema de Control de Emisiones Planta de Pellets de Huasco”, aprobada mediante la RCA N°104/2018, estima emisiones de MP de 182,5 t/año⁴⁸ para las chimeneas de la Planta de Pellets. De esta forma, se propone una disminución del límite establecido en la M2 a 182,5 t/año, correspondiente a las emisiones aprobadas por la RCA N°104/2018. Esto permitiría incorporar mayor ambición de forma gradual, dado que el límite propuesto representa un 54% del límite vigente. En la Figura 3-76 se muestra el escenario hipotético en donde los límites propuestos se apliquen al periodo 2017-2021.

Es fundamental destacar que, tal como se ha mencionado, lo anterior corresponde solo a una guía inicial, sujeta a revisión y ajuste conforme se disponga de nuevos datos. Los límites propuestos están basados en las emisiones estimadas en el presente estudio, y ningún caso pretende imponer una restricción definitiva. Por lo tanto, esta propuesta debe ser vista como un punto de partida flexible para iniciar un diálogo y un proceso de toma de decisiones informado y colaborativo.

⁴⁷ DIA “Eliminación del uso de petcoke en Central Guacolda y ajuste de la capacidad de generación eléctrica”.

⁴⁸ Correspondiente a las emisiones esperadas una vez se ejecute el proyecto de dicha DIA, siempre en el marco de la Fase I del proyecto aprobado mediante la RCA N°215/10, es decir, no considera la chimenea 3. Esto corresponde al Escenario E, Tabla 6-2 de Anexo 1-3 de la Adenda.



Nota: Los límites de emisión son aplicables desde el primer año calendario siguiente a la entrada en vigencia del Plan, es decir, 2018.

Figura 3-74 Evaluación de límites de emisión máxima anual de MP para fuentes con combustión establecidos en el PPA

Fuente: Elaboración propia

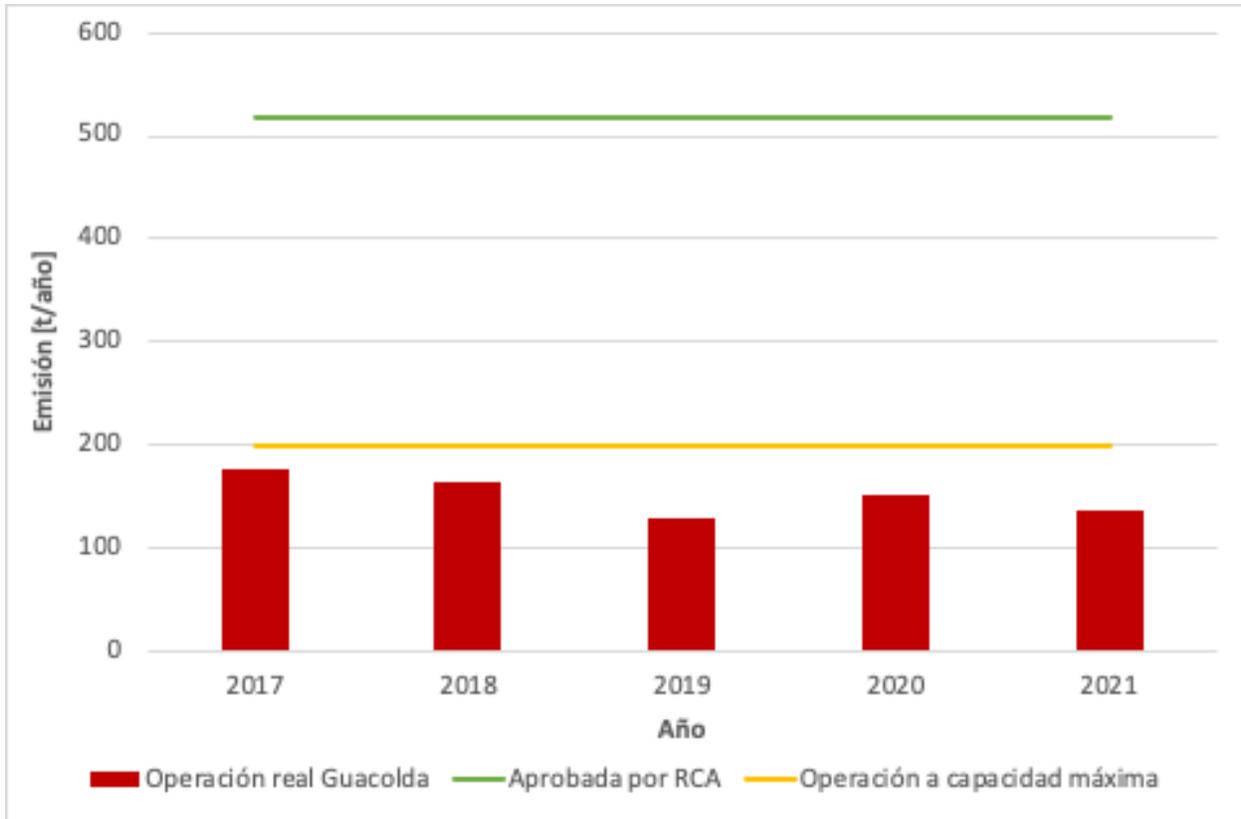


Figura 3-75 Comparación emisión anual de MP de Termoeléctrica Guacolda respecto a emisión aprobada por RCA y operación a máxima capacidad

Fuente: Elaboración propia

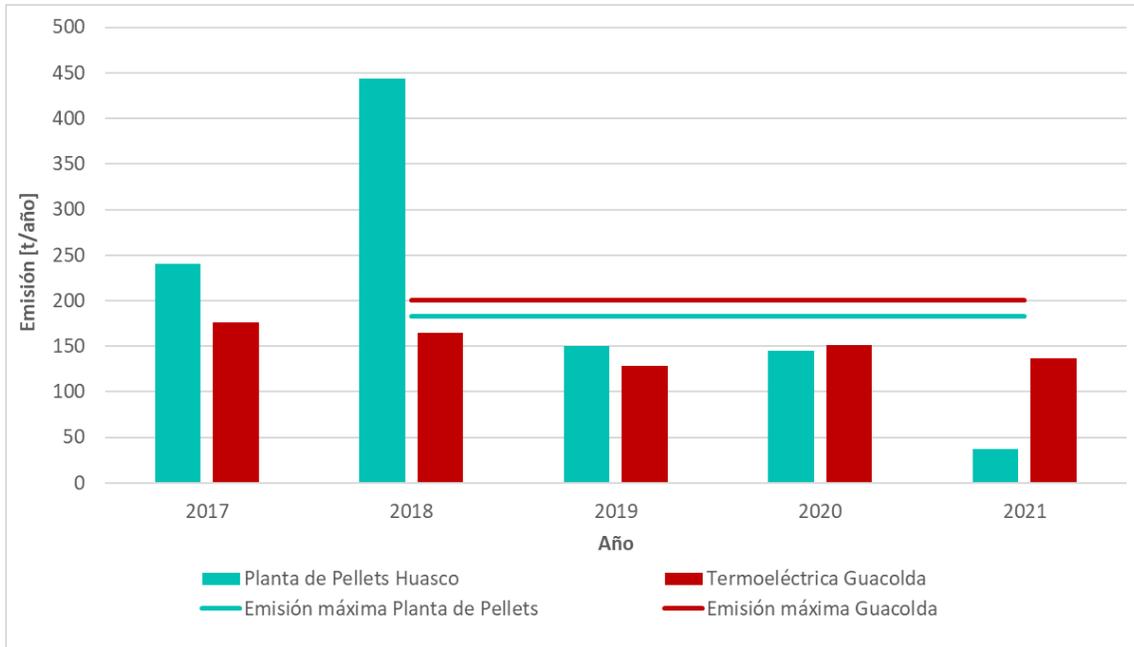


Figura 3-76 Evaluación de escenario propuesto de límites de emisión máxima anual de MP para fuentes con combustión

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las medidas M3 y M5, que establecen un límite máximo de emisión anual de MP de 30 mg/m³N para cada chimenea de la Planta de Pellets y Termoeléctrica Guacolda, respectivamente, se propone que sean mantenidas en el Plan debido a la limitación que imponen en cuanto a emisiones evacuadas por chimeneas en las principales fuentes emisoras. Cabe destacar que el valor máximo de la M5 coincidirá con el límite que será establecido para fuentes existentes en la actualización de la Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas⁴⁹, por lo que en la práctica la M5 no constituiría una medida adicional a lo ya establecido por la normativa nacional. A partir de los datos horarios medidos por los CEMS de Guacolda en 2021, se obtiene que el 5% de estos sobrepasan el límite de 30 mg/m³N, por lo que se decide recomendar la mantención de este valor.

Las medidas M6 y M7, correspondientes al Control de emisiones de actividades sin combustión en la Planta de Pellets y Termoeléctrica Guacolda, respectivamente, se sugiere que sean mantenidas, dado que abordan la fiscalización e implementación de los Planes de Control Integral (PCI). De todas formas, se propone que el apartado que establece los contenidos mínimos de los PCI sea modificado en función del cumplimiento de las medidas incluidas. En esta línea, las medidas M15 y M16, que hacen referencia a la obligación de desarrollar e implementar un PCI, ya fueron cumplidas, por lo que pueden ser modificadas incorporando un apartado de actualización, por ejemplo, cada dos años. Esto asegurará que las medidas de los respectivos PCI

⁴⁹ Anteproyecto de la norma disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1193580>

sean evaluadas bajo cierta frecuencia, aumentando su ambición, añadiendo nuevas medidas o eliminando algunas cuyo impacto no haya sido el esperado.

Por otro lado, en cuanto a la medida "Registro de datos de monitoreo en plataforma web" (M8), a partir del año 2020 la conexión en línea se realiza en marco de lo instruido en las Resoluciones Exentas N°1574/2019 que aprueba "Instrucción general para la conexión en línea de los sistemas de monitoreo continuo de emisiones – CEMS" y la N°252/2020 que aprueba el "Instructivo Técnico para la conexión en línea con los sistemas de información de la SMA". Esta medida ha sido implementada de forma satisfactoria y no requiere modificaciones dado que, al establecer la obligación de registrar los datos de monitoreo en una plataforma de acceso público, se garantiza la transparencia de la información hacia los organismos fiscalizadores y la comunidad general.

En relación a la medida "Aprobación y validación sistema de monitoreo continuo" (M10), el CEMS de ambas chimeneas que operan en la Planta de Pellets fueron validados en 2019, por lo que la exigencia de aprobación planteada por la medida ya no es requerida. En esta línea, la medida de "Sistema de monitoreo continuo de emisiones de MP" aplicada en proyectos que se sometan al SEIA que descarguen sus emisiones por chimeneas y deban compensar sus emisiones de acuerdo a lo establecido en el Plan (M11), debe ser mantenida para asegurar la implementación de un CEMS en caso de que se apruebe un nuevo proyecto con estas condiciones. La misma recomendación se plantea sobre la medida que exige un CEMS a proyectos con RCA que incluyan calderas o procesos industriales con combustión de potencias térmicas mayores o iguales a 20 MWt. Estas medidas permiten asegurar el cumplimiento normativo, detectar de forma temprana aumentos en las emisiones y transparentar la información a la comunidad general, promoviendo la confianza y participación.

La implementación medida M13, referida a la obligación de la Planta de Pellets de mantener un registro visual en línea del hidrolavado automático de los vagones, ha sido relevante y efectiva dado que permite que la ciudadanía tenga acceso directo a información sobre las prácticas para el control de emisiones que realiza la empresa.

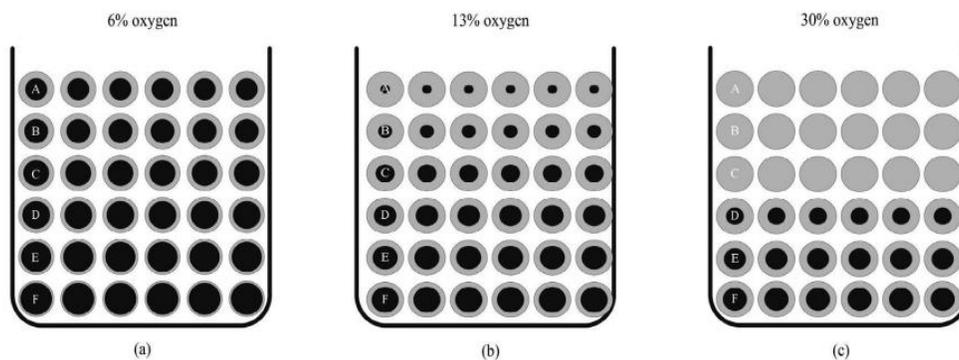
Por otro lado, se ha cumplido parte de la medida "Requisitos y contenidos mínimos del informe anual" (M14) a través de la aprobación de la "Instrucción sobre el Reporte Anual de resultado del monitoreo continuo de emisiones que establece el artículo 23 del decreto supremo N°38 de 2017 del MMA". Por lo tanto, se sugiere que esta medida sea precisada haciendo mención específica a la Resolución Exenta N°2533/2020 de la SMA.

Respecto al requisito establecido en la letra f) del artículo 23 del PPA⁵⁰, que origina la M14, CMP indica que no es posible cumplir con la corrección de oxígeno solicitada. Según lo explicado en la

⁵⁰ Establece que "la corrección de oxígeno de los valores de emisión que se midan en cualquier chimenea corresponde a un 6% de oxígeno si se utiliza algún combustible sólido y a un 3% de oxígeno si se utiliza algún combustible líquido o gaseoso".

DIA “Sistema de Control de Emisiones Planta de Pellets de Huasco” mediante los estudios disponibles en el Anexo 1-2 de la Adenda de dicha DIA, la operación habitual de la planta requiere una concentración de oxígeno tal que sus emisiones sean evacuadas con 17% a 18% de oxígeno⁵¹. Esto no se debe al tipo de combustible utilizado en el proceso de endurecimiento térmico, sino que a las características propias del proceso, donde el oxígeno actúa como comburente para la combustión del carbón y como reactivo en la oxidación de la magnetita, generando hematita.

Respecto a lo anterior, (Sandeep Kumar et al., 2019) afirma que uno de los principales factores de los cuales depende la tasa de oxidación de la magnetita es el contenido de oxígeno en el gas de entrada. Así mismo, (Eriksson et al., 2021) evalúa el efecto de distintos niveles de oxígeno en la oxidación de la magnetita durante el endurecimiento térmico, tal como se ilustra en la Figura 3-77. Los resultados demuestran que el contenido de oxígeno de 30% genera el lecho con el mayor grado de oxidación, mientras que el más bajo se genera con aproximadamente 6%. En esta línea, los resultados obtenidos en el estudio (Zhang et al., 2012) muestran que la calidad del proceso de endurecimiento térmico empeora de forma significativa cuando el contenido de oxígeno en el gas de entrada es inferior al 18%, concluyendo que el contenido de oxígeno se debería mantener alrededor de dicho valor. Xiao-hui et al. (2013) también aporta recomendaciones respecto al contenido de oxígeno durante el proceso, indicando que, para garantizar el índice de aglomeración del pellet, el contenido favorable de oxígeno de los gases de combustión en circulación no debe ser inferior al 15%.



Nota: Los colores gris claro y negro representan hematita y magnetita no oxidada, respectivamente.

Figura 3-77 Grado de oxidación resultante en los lechos de pellets de los experimentos con gas entrante a 800°C y diferentes niveles de oxígeno

Fuente: (Eriksson et al., 2021)

Por lo anterior, se recomienda la modificación de la M14, estableciendo una corrección de oxígeno de 17% para las chimeneas de la Planta de Pellets, dado que este valor es adecuado y

⁵¹ Estos antecedentes fueron analizados y validados por la Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente de Atacama según Ordinario N°096 de fecha 09 de abril de 2021. La Superintendencia del Medio Ambiente a través de Resolución Exenta N°1232 de fecha 08 de mayo de 2021 aprueba la solicitud de utilizar una corrección por oxígeno del 17%, para Compañía Minera del Pacífico S.A., en el marco del PDA de Huasco.

necesario para el proceso de peletización de hierro, y fue aprobado por la Superintendencia del Medio Ambiente a través de la Resolución Exenta N°1232 de 2021.

Respecto a la medida “Publicación y difusión concentración anual de MP10” (M17), se ha logrado su cumplimiento con la periodicidad anual estipulada desde el año 2019. Se considera que esta medida debe ser mantenida en el Plan, ya que garantiza que se informe a la comunidad el valor correspondiente a la concentración anual de MP10, el contaminante que precisamente origina al PPA en cuestión. En relación al mismo contenido, la medida “Plataforma web con datos de sistema de monitoreo continuo” (M22) fue implementada a través de la sección dirigida al PPA Huasco en la plataforma web del MMA. Por lo tanto, la medida debe ser modificada de forma que sea eliminado el inciso que establece la implementación de la plataforma, manteniendo la exigencia al MMA de coordinar con cada titular los contenidos a publicar.

La medida “Programa de involucramiento comunitario y educación ambiental” (M18) se cumple de forma anual a través de capacitaciones de calidad del aire a la comunidad, por lo que se considera que la medida debería ser mantenida en el Plan, precisando la forma en que se llevará a cabo la comunicación y la colaboración con la comunidad. En este sentido, se puede incorporar lo siguiente: 1) La Seremi de Medio Ambiente deberá asegurar que el Programa sea accesible y se comunique mediante diversos canales, como plataformas en línea, reuniones comunitarias, talleres informativos y eventos educativos; 2) Se debe promover la colaboración con organizaciones locales, instituciones educativas y grupos comunitarios para ampliar el alcance y la efectividad de las actividades de participación y educación ambiental.

Adicionalmente, la medida “Programa de fortalecimiento de la gestión ambiental local” (M19) se ha cumplido anualmente desde 2019, abarcando tanto las capacitaciones a funcionarios como el programa de limpieza periódica. Esta debe ser mantenida para asegurar la implementación de este último aspecto. Por otra parte, respecto a la medida “Acciones de certificación ambiental voluntaria de establecimientos educacionales” (M20), se requiere precisar las acciones que debería llevar a cabo la Seremi del Medio Ambiente para promover la certificación.

Se recomienda que la medida M21, relacionada al Fondo de Protección Ambiental, sea precisada proponiendo estrategias o acciones específicas que permitirían promover este fondo en Huasco. La medida “Estudio de operación, gestión y configuración red de monitoreo de calidad del aire y meteorología” (M23) fue cumplida en 2021 mediante la publicación del estudio, por lo que puede ser eliminada del Plan. Siguiendo esta línea, la medida consecutiva “Acciones de mejoramiento y rediseño de monitoreo de la calidad del aire y meteorología” (M24) debería ser modificada, estableciendo las acciones mínimas necesarias a partir de los resultados del estudio.

Por último, la medida “Programa de compensación de emisiones SEIA” (M25) ha establecido la obligación para los proyectos nuevos, que cumplan las condiciones estipuladas, de compensar el aumento de emisiones que generan. Esto permite mantener la situación base de emisiones existente en la zona, en conformidad con las normativas ambientales. Se propone que la medida sea modificada, agregando a lo ya establecido la mención a un banco de medidas de

compensación al cual puedan optar los proyectos. La elaboración del banco de medidas de compensación de emisiones puede ser abordado por una medida adicional en el Plan que otorgue la responsabilidad a la Seremi del Medio Ambiente u otro ente competente.

En la Tabla 3-79 se resumen las recomendaciones anteriormente detalladas.

Tabla 3-79 Recomendaciones respecto a medidas PPA Huasco

ID Medida	Recomendación
M1	Disminuir las emisiones máximas de MP permitidas para fuentes con combustión en la Termoeléctrica Guacolda a 200 t/año.
M2	Disminuir las emisiones máximas de MP permitidas para fuentes con combustión en la Planta de Pellets a 182,5 t/año.
M3	Mantener el límite de emisión anual de MP en 30 mg/m ³ N para las chimeneas de la Planta de Pellets.
M4	Eliminar en caso de que se decida no construir la chimenea 3 de la Planta de Pellets.
M5	Mantener el límite de emisión anual de MP en 30 mg/m ³ N para las chimeneas de la Termoeléctrica Guacolda.
M6	Mantener medida para la Planta de Pellets. Modificar apartado que establece el contenido mínimo de los PCI en función del cumplimiento de las medidas incluidas en dicho plan.
M7	Mantener medida para la Termoeléctrica Guacolda. Modificar apartado que establece el contenido mínimo de los PCI en función del cumplimiento de las medidas incluidas en dicho plan.
M8	Mantener medida, debido a que establece la obligación de registrar los datos de monitoreo en una plataforma de acceso público, garantizando la transparencia de la información hacia los organismos fiscalizadores y la comunidad general.
M9	Mantener medida.
M10	Eliminar medida, dado que el CEMS de ambas chimeneas que operan en la Planta de Pellets fueron validados en 2019.
M11	Mantener medida, para asegurar la implementación de un CEMS en caso de que se apruebe un nuevo proyecto con las condiciones referidas.
M12	Mantener medida.
M13	Mantener medida, dado que permite transparentar información con la ciudadanía.
M14	Precisar medida haciendo mención específica a la Resolución Exenta N°2533/2020 de la SMA, que aprueba la Instrucción sobre el Reporte Anual de resultado del monitoreo continuo de emisiones que establece el artículo 23 del decreto supremo N°38 de 2017 del MMA.
M15	Modificar incorporando un apartado de actualización del PCI, por ejemplo, cada dos años.
M16	Modificar incorporando un apartado de actualización del PCI, por ejemplo, cada dos años.
M17	Mantener, ya que garantiza que se informe a la comunidad el valor correspondiente a la concentración anual de MP10.

ID Medida	Recomendación
M18	Mantener medida, pero precisar la forma en que se llevará a cabo la comunicación y la colaboración con la comunidad. Se propone lo siguiente: 1) La Seremi de Medio Ambiente deberá asegurar que el Programa sea accesible y se comunique mediante diversos canales, como plataformas en línea, reuniones comunitarias, talleres informativos y eventos educativos; 2) Se debe promover la colaboración con organizaciones locales, instituciones educativas y grupos comunitarios para ampliar el alcance y la efectividad de las actividades de participación y educación ambiental.
M19	Mantener medida para asegurar la implementación del programa de limpieza periódica.
M20	Precisar las acciones que debería llevar a cabo la Seremi del Medio Ambiente para promover la certificación.
M21	Precisar, proponiendo estrategias o acciones específicas que permitirían promover el Fondo de Protección Ambiental en Huasco.
M22	Eliminar inciso que establece la implementación de la plataforma web, la cual fue implementada a través de la sección dirigida al PPA Huasco en la web del MMA. Mantener la exigencia al MMA de coordinar con cada titular los contenidos a publicar.
M23	Eliminar, dado que fue cumplida en 2021 mediante la publicación del estudio.
M24	Modificar, estableciendo las acciones mínimas necesarias (a las cuales se refiere la medida) a partir de los resultados del estudio de la M23.
M25	Modificar, agregando la mención a un banco de medidas de compensación al cual puedan optar los proyectos. La elaboración del banco de medidas de compensación de emisiones puede ser abordado por una medida adicional en el Plan que otorgue la responsabilidad a la Seremi del Medio Ambiente u otro ente competente.

Fuente: Elaboración propia

3.9.2 Determinación de la existencia de potencial de reducción de emisiones de fuentes emisoras identificadas en escenario actual y proyectado

Con el propósito de mantener a Huasco bajo la latencia, se determina la existencia de potencial de reducción de las emisiones de las fuentes emisoras identificadas. Para esto, en las siguientes secciones se presenta el potencial de reducción asociado a medidas que podrían ser implementadas en fuentes emisoras de Huasco.

3.9.2.1 Medidas línea base

En la Tabla 3-80 se presentan las medidas actualmente aplicadas para el control de emisiones de MP10 en la zona de Huasco, por instalación. Estas medidas corresponden a las implementadas como parte de la línea base, y se encuentran incluidas en el inventario de emisiones (ver Sección 3.6). Se puede observar que en la mayoría de las instalaciones existen medidas de control de emisiones para la resuspensión de polvo en caminos no pavimentados, principalmente a través de la aplicación de bischofita o humectación. Para el proceso de carga y descarga de material también se incorporan medidas de abatimiento en todas las instalaciones, principalmente manga retráctil y humectación. En la misma línea, se han implementado medidas para controlar las emisiones por erosión eólica correspondientes a humectación de pilas y pantallas eólicas. Por el contrario, se puede notar que la Central Térmica Huasco no tiene incorporadas medidas de

abatimiento, sin embargo, sus emisiones son bajas en comparación con el resto del inventario (ver Sección 3.6.1.2).

Cabe destacar que estas medidas fueron consideradas para su posible implementación en fuentes que actualmente no poseen medidas de control, en un escenario de reducción de emisiones.

Tabla 3-80 Medidas de control de emisiones de MP10 línea base

Instalación	Proceso	Sistema de abatimiento	Eficiencia
Planta de Pellets Huasco	Carga y descarga de material	Manga retráctil	90%
		Pantallas eólicas	20%
		Pantallas eólicas y humectación de pilas	30%
	Chimenea	Precipitador electrostático	99%
		Scrubber húmedo	85%
	Correa transportadora	Cubierta	50%
	Erosión eólica	Humectación de pilas	30%
		Pantallas eólicas	20%
		Pantallas eólicas y humectación de pilas	30%
	Harneado	Pantallas eólicas	20%
	Transferencia de material	Estructura y colectores de Polvo	60%
Sellado a contrapresión		80%	
Tránsito - no pavimentado	Bischofita	80%	
Termoeléctrica Guacolda	Carga y descarga de material	Camiones encapsulados y sistema de lavado automático de camiones	50%
		Humectación, compactación y carpeta de arena	50%
		Sistema de humectación en tolvas, correas y transferencias encapsuladas	90%
	Chimenea	Filtros mangas	99%
		Precipitador electrostático	99%
	Correa transportadora	Sistema de correas encapsuladas	98%
	Erosión eólica	Cerco perimetral, humectación por aspersores y aplicación de contrante	90%
		Humectación, compactación y carpeta de arena	50%
	Transferencia de material	Sistema de correas encapsuladas	96%
Tránsito - no pavimentado	Bischofita	80%	
Tránsito - pavimentado	Encarpado	90%	
Puerto Las Losas	Carga y descarga de material	Manga retráctil	70%-90%
	Correa transportadora	Cubierta	70%-90%
	Erosión eólica	Pantallas eólicas y humectación de pilas	50%
	Tránsito - no pavimentado	Supresor de polvo y humectación	90%
	Tránsito - pavimentado	Cierre tolva	90%
Cierre tolva y lavado de ruedas		90%	
Línea Férrea	Tránsito - línea férrea	Cierre tolva	90%

Fuente: Elaboración propia

3.9.2.2 Medidas con potencial de aplicación

A continuación, se presentan medidas potencialmente aplicables al plan de reducción de emisiones de Huasco.

Tabla 3-81 Medidas recopiladas posibles para aplicación a inventario de emisiones

Medida	MP10	MP2,5	Referencia
Barrera cortaviento	30%	30%	RCA revisadas
Pavimentación	99,6%	99%	Estimado en base a las diferencias de factores de emisión de caminos pavimentados y de tierra.
Filtro de mangas	99,0%	99,0%	(US-EPA, 2016a)
Reducción catalítica selectiva	90%	90%	(US-EPA, 2016a)
Precipitador electroestático	98%	98%	(US-EPA, 2016)

Fuente: Elaboración propia

3.9.2.3 Potencial de reducción de medidas propuestas

Para analizar el potencial de reducción de emisiones, se construyó un escenario de mitigación que considera la aplicación de todas las medidas seleccionadas en las distintas fuentes de emisión. Este escenario es únicamente para la evaluación de las medidas, y no necesariamente implica la recomendación de inclusión de todas las medidas evaluadas. Para esto se consideraron únicamente las fuentes con posibilidad de incorporar alguna medida de reducción de emisiones.

Para algunas fuentes no se consideraron medidas adicionales a las de la línea base debido a que se considera que ya cumplían con las exigencias requeridas o debido a que su participación de emisiones no era considerable con respecto a las demás fuentes. El escenario de mitigación se modela mediante un sistema de prioridades por costo eficiencia.

A continuación, se detalla la aplicación de cada medida a diversas fuentes del inventario. Se debe tener en cuenta que, si bien estas medidas son evaluadas, no necesariamente implica su recomendación de inclusión en el plan. En particular se aplicaron las siguientes medidas:

- **Barrera cortaviento**

Durante procesos de carga y descarga y el acopio del material al aire libre, existen emisiones de MP10 y MP2,5. Se implementa una barrera cortaviento, consistente en una malla de polietileno del tipo "malla sombra" con 30% cobertura dispuesta en postes distanciados cada tres metros, con una altura no menor a 2 metros por sobre la operación. Esta barrera rodeará el perímetro de la zona en donde se realiza la carga y descarga y en canchas de acopio, lo que permite disminuir la velocidad y turbulencia del viento y evitar así la volatilización de material particulado (MINAGRI, 2022).

▪ **Pavimentación**

Para el control de emisiones de polvo resuspendido se considera la medida de pavimentación de las calles de Huasco que se encuentren sin asfaltar. Para las instalaciones se considera la pavimentación en todas las vías. La eficiencia de incorporar la pavimentación en caminos no pavimentados se obtiene de la diferencia de los Factores de Emisiones y corresponde a un 99,6% para MP10 y a un 90% para MP2,5 (MINVU, 2007a).

Esta medida se elabora en base a la información provista por el GORE de Atacama, la cual presenta un catastro actualizado de calles con potencial de pavimentación de Huasco.

▪ **Filtro de manga**

Los filtros de mangas consisten en la captación del material particulado desde alguna edificación cerrada como un domo o en una chimenea. Esta medida tiene una eficiencia del 99%, es una tecnología innovadora y se considerará su incorporación luego de la aplicación de medidas anteriores de encapsulamiento (US-EPA, 2016b).

▪ **Precipitador electrostático seco (ESP)**

El precipitador electrostático seco es un sistema que retiene el material particulado mediante la ionización de las partículas, evitando que se vayan a la atmósfera. Tiene una eficiencia de 98%, una vida útil de 20 años y se incorpora en chimeneas (US-EPA, 2016b).

A partir de lo anterior y el inventario elaborado (ver Sección 3.6.1), se estima el potencial de reducción de las medidas mencionadas, presentado en la Tabla 3-82. Cabe destacar que se presentan solo las medidas que, en la práctica, efectivamente generan reducciones.

Tabla 3-82 Potencial de reducción de emisiones de MP10

Instalación	Medida	Potencial de reducción [t/año]
Planta de Pellets Huasco	Barrera cortaviento	2,095
	Pavimentación	0,626
	Filtro de manga	0,077
Termoeléctrica Guacolda	Pavimentación	7,013
Puerto Las Losas	Pavimentación	0,026
Central Térmica Huasco	Pavimentación	2,344
	Precipitador electrostático	0,000
Huasco*	Pavimentación	10,010

*Se refiere a los caminos de Huasco.

Fuente: Elaboración propia

3.9.3 Propuesta de conjunto de medidas de control de emisiones a implementar en escenario actual y proyectado

En función del aporte a las concentraciones de MP10 y del potencial de reducción de las emisiones de cada fuente identificada, se propone un conjunto de medidas de control de emisiones a implementar, en un escenario actual y proyectado, a fin de lograr valores bajo la norma anual de MP10 y mantener a la localidad de Huasco bajo la latencia por dicha norma.

3.9.3.1 Costo de medidas propuestas

Para poder aplicar el criterio de costo eficiencia, es necesario caracterizar los costos de cada medida potencialmente aplicable con mayor detalle. Para esto se consideran únicamente las medidas incluidas en el escenario de máxima reducción (ver Sección 3.9.2.2).

Es importante destacar que todos los costos son normalizados a UF, desde valores en pesos chilenos y de dólares de distintos años, lo que permite la correcta comparación entre las distintas medidas.

A continuación, se desarrolla con mayor detalle el cálculo de los costos de cada medida.

- **Barrera cortaviento**

Para estimar los costos de instalación de una barrera cortaviento se utilizó el Decreto N° 26/2023 del MINAGRI, en el cual se establecen los costos, que fija los valores de las actividades que se bonificarán en el marco del Sistema de Incentivo para Sustentabilidad Agroambiental de los suelos agropecuarios (MINAGRI, 2022).

Las características de la malla son que tiene una vida útil de entre 3 a 5 años debido a la deterioración por la exposición al sol. El costo unitario corresponde a 3.120 CLP2022/m lineal (0,094 UF/m) (MINAGRI, 2022) para la provincia de Huasco, por lo que considerando que se requieren 3 recambios de la malla en el periodo de evaluación, considerando el promedio de recambio de 4 años. Considerando además un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento del 6% anual, el costo de aplicación de esta medida traído a valor presente resulta de 0,20 UF/año.

Se estima un perímetro estándar de aplicación de 20 m, es decir 25 m², lo que por cada instalación se considera un costo anual de 3,97 UF/año. En los casos de evaluación de depósitos con un perímetro evidentemente mayor, se calculan sus propios costos correspondientes a cada caso.

- **Pavimentación**

El detalle de costos unitarios de la pavimentación se encuentra en la Tabla 3-83 según los procesos y materiales necesarios para su implementación, recopilados del estudio: “Investigación de bases y subbases de pavimentación” del ministerio de vivienda y urbanismo (MINVU, 2007b). La vida útil de una calle pavimentada se estima en 30 años (MINVU, 2007b).

Los costos unitarios de inversión para la pavimentación se dividen en dos categorías: costos por metro cuadrado (m²) y costos por metro lineal (ml). Estos costos se asocian a los procesos, materiales y herramientas necesarias para la pavimentación de un camino.

La Tabla 3-83 presenta los costos unitarios por metro cuadrado, los cuales se estiman en aproximadamente \$7.600 CLP por metro cuadrado pavimentado.

Tabla 3-83 Detalle precio unitario pavimentación en Calama (CLP2007/m²)

Detalle pavimentación	Unidad	Profundidad e (m)	Precio Unitario (CLP2007)	Precio Unitario (CLP2007/m ²)
Corte	m ³	0,41	2.800	1.148
Relleno	m ³	0,41	2.200	902
Sub-base granulas e=0,2 m	m ³	0,2	350	70
Base granular e=0,15 m	m ³	0,15	8.500	1.275
Imprimación asfáltica	m ²	1	293	293
Carpeta asfáltica e=0,06 m	m ³	0,06	66.000	3.960
Total (CLP2007/m²)				7.648

Nota: Todos los costos son para el año 2007.

Fuente: (MINVU, 2007b)

La Tabla 3-84 presenta los costos unitarios por metro lineal, los cuales se estiman en aproximadamente \$7.700 CLP por metro lineal pavimentado.

Tabla 3-84 Detalle precio unitario pavimentación en Calama (CLP2007/metro lineal)

Detalle pavimentación	Unidad	Precio Unitario (ml)
Línea continua	Metro lineal	235
Soleras	Metro lineal	4.300
Suministro y colocación de soleras	Metro lineal	3.200
Total (CLP2007/metro lineal)		7.735

Nota: Todos los costos son para el año 2007.

Fuente: (MINVU, 2007b)

Los costos de mantención asociados a la medida de pavimentación fueron obtenidos de un estudio publicado por el MOP (Dirección de Planeamiento, 2001). En este se estima un costo anual básico de mantención para caminos pavimentados en 1.627 USD2001 por cada kilómetro pavimentado.

La extensión total de caminos no pavimentados (grava tratada, ripio y suelo natural) se obtuvo del “Diagnóstico de conectividad vial” realizado por el GORE de Atacama (2019), y corresponde a un total de 1.285 kilómetros de camino por pavimentar. Además se consideraron 13,7

kilómetros de caminos no pavimentados al interior de las instalaciones de las plantas Guacolda y CMP.

Considerando los costos de construcción y mantenimiento presentados anteriormente, la extensión de caminos por pavimentar, un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento del 6% anual, se obtiene que el costo de aplicación de esta medida traído a valor presente corresponde a aproximadamente 3.706.906 UF.

- **Filtro de manga**

Medida con un costo unitario de \$34 USD1998/scfm⁵² (1,84 UF/m³/hr) y un costo de operación y mantención de \$13 USD1998/año (0,71 UF/m³/hr) (US-EPA, 2016a). Se debe considerar que la aplicación de esta medida debe ser incorporada en una fuente emisora cerrada, como por ejemplo con un domo o en una chimenea.

- **Reducción catalítica selectiva (SRC)**

Para la central generadora Guacolda se propone incorporar un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR) como medida de mitigación de óxidos de nitrógeno en las unidades generadoras que no lo poseen, específicamente las unidades 2 y 3. Para estimar los costos asociados a la implementación de esta medida se utilizó el costo medio por tonelada de NOx reducida de 3.784 USD2016 (US-EPA, 2016a). Esta medida tiene una eficiencia del 90% en la mitigación de NOx, por lo que multiplicando esta por las emisiones correspondientes a las unidades 2 y 3, obtenidas del inventario de emisiones, se puede calcular la cantidad de NOx reducida en cada unidad de implementarse la medida.

Con estos datos se puede calcular el costo anual promedio de implementación de la medida en las unidades 2 y 3, los cuales corresponden a 236.147 UF/año y 60.365 UF/año respectivamente. Finalmente, considerando un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento de 6% anual, el costo de aplicación de esta medida traído a valor presente corresponde a 1.842.344 UF para la unidad generadora 2 y 470.945,28 UF para la unidad generadora 3.

- **Precipitador electrostático seco (ESP)**

Para la central generadora Guacolda, específicamente para la unidad 4 de generación, se propone incorporar un precipitado electrostático (ESP) como medida de mitigación de material particulado. Para estimar el costo de aplicación de esta medida fueron considerados los costos de inversión el cual corresponde a 27 USD/scfm, operación y mantenimiento el cual corresponde a 16 USD/scfm, gasto energético el cual corresponde a 0,067 USD/kWh y los costos asociados a la acumulación de polvo debido a la actividad del precipitador el cual corresponde a 25 USD/

⁵² *Standart cubic feet per minute*: pies cúbicos por minuto estándar, medida de flujo.

tonelada de MP reducida. Tanto la metodología como los valores de los costos fueron obtenidos de la guía *Control Strategy Tool* (US-EPA, 2016a).

Considerando dichos costos, los parámetros de operación de la unidad 4 de Guacolda, los valores promedio del dólar y la UF de 1995, año para el cual se definieron los costos en la guía de la EPA, un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento del 6% anual, el costo de aplicación de esta medida traído a valor presente resulta de aproximadamente 1.377.438 UF.

3.9.3.2 Evaluación de la costo-efectividad de medidas propuestas

A partir del costo anualizado de cada medida de reducción de emisiones aplicable, presentado en el ítem precedente, y considerando el total de emisiones reducidas en el horizonte temporal y el FEC se estima el costo por $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ de MP10 reducido.

De esta forma, por medida se utilizan los siguientes parámetros:

- **Costos totales anualizados**, considerando la aplicación de todas las medidas potencialmente aplicables a las fuentes de emisión identificadas (ver Sección 3.9.3.1)..
- **Reducción de emisiones MP10** es importante notar que las toneladas reducidas no se descuentan temporalmente. Se toma el promedio de reducción por año.
- **FEC**, para la obtención del delta de aporte por proceso emisor considerando la nueva medida aplicada. Cabe destacar que para la evaluación de las medidas se utilizan los FEC de la estación EME F por criterio conservador, al ser la EMRP con mayores concentraciones registradas (ver Sección 3.7.3).
- **Costo eficiencia**, el costo medio por $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ de MP10 reducido. Este costo permite priorizar qué medidas debieran aplicarse según su costo eficiencia.

En primer lugar, se asignan las nuevas medidas con posibilidad de ser aplicadas a cada proceso emisor. Luego, estas se relacionan con su emisión base, la eficiencia potencial y el costo anualizado de cada medida. De esta forma, se obtiene el delta de eficiencia y, con los FEC, la diferencia de aporte de concentración de material particulado. Finalmente, con el costo anualizado se calcula el costo eficiencia por el cual son seleccionadas las medidas definitivas. El detalle de los cálculos realizados se encuentran en el Anexo Digital “PPAHUASCO2-Inventario_Emissiones_Tablas.xlsx”.

En resumen, las medidas que quedaron seleccionadas corresponden a la **pavimentación de todos los caminos**, tanto los de Huasco como los de dentro de las instalaciones; y la incorporación de **barreras cortaviento en zonas de carga y descarga de material y en canchas de acopio** de la Planta de Pellets que, de acuerdo a la información entregada por el titular, no poseen actualmente medidas de control de emisiones.

3.9.3.3 Programa de fiscalización para la evaluación de los costos

Se elabora el programa de fiscalización que se utiliza para evaluar los costos asociados a la implementación de las medidas.

Los costos de fiscalización tienen una gran dependencia sobre el tipo, características específicas y cantidad de medidas de reducción de emisiones que se decida finalmente incluir en el Plan. Por este motivo, se considera que una estimación detallada de los costos de fiscalización no sería de utilidad mientras no se conozca el detalle de tales medidas. Sin embargo, sí es de utilidad conocer su orden de magnitud, por lo que a continuación se presenta una estimación de estos.

Para realizar esta estimación, se utilizó el valor unitario de fiscalización para el programa de PPDA del año 2023 (SMA, 2023). Este costo hace referencia al costo unitario de actividades de fiscalización, específicamente para planes de prevención y/o descontaminación, y son los costos más actualizados disponibles.

La Tabla 3-85 presenta el resumen del presupuesto y número de actividades de fiscalización a realizar para cada entidad fiscalizadora, de acuerdo al programa PPDA del 2023 (SMA, 2023). Se observa un costo unitario por actividad de fiscalización entre los 200 mil a 875 mil CLP.

Tabla 3-85 Resumen presupuesto actividades de fiscalización 2023 para PPDA

Entidad Fiscalizadora	Presupuesto 2023 [CLP]	N° Actividades	Costo Unitario [CLP/act]
SMA	568.575.708	428	1.328.448
Salud	163.710.000	353	463.768
SAG	223.361*	1	223.361

*Valor del SAG no presentado en este documento. Se utiliza como referencia valor del 2018.

Fuente: Elaboración propia a partir de (SMA, 2023)

En particular, la SMA tiene programadas 60 fiscalizaciones al año para los PDA más recientes⁵³ (SMA, 2023). Con respecto a Salud, a los PDA más recientes se les realiza aproximadamente 25 fiscalizaciones por año (SMA, 2023). Mientras que las 9 actividades del SAG están comprometidas al mismo PDA⁵⁴ (SMA, 2023).

En la evaluación de los costos sociales de fiscalización del presente PPA para Huasco en su conjunto, se considera que anualmente se requieren 5 fiscalizaciones de la SMA.

3.9.3.4 Plazo de intervención para la implementación de las medidas

Con el propósito de analizar el plazo de intervención para implementar las medidas seleccionadas, se deben considerar los tiempos de incorporación de cada una, presentados en la siguiente tabla.

⁵³ Talca y Maule, Chillán y Chillán Viejo, Valdivia

⁵⁴ Plan de Descontaminación para el área circundante a la fundición de Caletones de la división El Teniente de Codelco Chile.

Tabla 3-86 Tiempos de incorporación de medidas seleccionadas

Medida	Detalle	Tiempo	Unidad
Pavimentación	Construcción del sistema por km a pavimentar	3	días
	Total	3	días
Barrera cortaviento	Construcción del sistema	6	meses
	Total	6	meses

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla la cantidad de fuentes a las que se le incorpora cada medida:

- Se requiere la pavimentación de 1.928 km en total, considerando las calles no pavimentadas de Huasco⁵⁵ y los caminos internos de las instalaciones. Se incorporan 10 equipos de trabajo pavimentando simultáneamente, por lo que el periodo de incorporación de la medida es de aproximadamente 1,6 años (19 meses).
- Las barreras cortaviento a instalar en la Planta de Pellets corresponden a la cantidad de 3 en total. Considerando 3 equipos de trabajo instalando las barreras en forma simultánea, es posible instalar las barreras en 6 meses.

3.9.3.5 Evaluación de la calidad del aire para MP10 en escenario con medidas proyectado

A partir de los FEC estimados en la Sección 3.7.3 y la proyección del inventario de emisiones presentada en la Sección 3.6.2.2, es posible estimar la concentración ambiental de MP10 para distintos años y escenarios de evaluación. Esto es posible debido a que el FEC solo depende de la ubicación de la fuente con respecto al receptor (estación de monitoreo de calidad del aire) y la meteorología.

Para evaluar si las medidas propuestas permiten lograr valores bajo la norma anual de MP10 y mantener a la localidad de Huasco bajo la latencia por dicha norma, se estima el aporte a la concentración anual de MP10 por fuente y estación de monitoreo para el año 2035, presentado en la Tabla 3-87. A los aportes estimados de fuentes antropogénicas en las estaciones de monitoreo se le suma el background de MP10 estimado en la Sección 3.8.3, para evaluar la calidad del aire respecto a la normal anual de dicho contaminante. Esta evaluación se presenta en la Figura 3-78, en donde se puede observar que las concentraciones estimadas en todas las estaciones de monitoreo se encuentran por debajo de la latencia. Las concentraciones de MP10 que se registrarían representarían, en promedio, un 56% del valor de latencia por norma anual, lo que refleja el cumplimiento de la norma y de mantener a Huasco bajo la latencia.

⁵⁵ Se consideran tanto caminos de tierra no tratados como tratados por bischofita.

Tabla 3-87 Aportes al MP10 anual [$\mu\text{g} / \text{m}^3$] por cada fuente emisora en Huasco, año 2035

Instalación	Fuente	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME M	SM4	SM8
Planta de Pellets	Chimenea 2A	0,020	0,021	0,021	0,020	0,020	0,018	0,016
	Chimenea 2B	0,014	0,015	0,015	0,013	0,013	0,010	0,008
	Chimenea 3	0,012	0,013	0,014	0,012	0,012	0,010	0,009
	CMP areales sin caminos	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005	0,004	0,003
	Entrada a CAP - Pavimento	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001
	PLL a CAP - Pavimento	0,124	0,061	0,036	0,075	0,070	0,001	0,001
Guacolda	Chimenea U1&2	0,026	0,037	0,025	0,026	0,025	0,006	0,004
	Chimenea U3	0,005	0,002	0,001	0,003	0,003	0,000	-
	Chimenea U4	0,114	0,125	0,166	0,094	0,094	0,062	0,052
	Chimenea U5	0,006	0,007	0,009	0,005	0,005	0,004	0,003
	Guacolda areales sin caminos	0,433	0,397	0,579	0,337	0,337	0,154	-
	Entrada a Guacolda - Pavimento	0,463	0,553	0,764	0,382	0,362	0,181	0,121
	Guacolda a Vertedero Guacolda - Tierra	0,389	0,179	0,105	0,200	0,189	0,004	0,002
	Guacolda a Planta Desalinizadora	0,003	0,007	0,008	0,002	0,002	0,001	0,000
Puerto Las Losas	PLL areales sin caminos	0,003	0,006	0,013	0,002	0,002	0,001	0,001
	PLL a CAP	0,004	0,012	0,014	0,002	0,002	0,001	0,000
Central Huasco	Actividades CT Huasco	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Línea Férrea	Actividades con combustión	0,200	0,010	0,054	0,120	0,079	0,136	0,093
Urbanas Huasco		14,327	8,994	0,724	14,709	11,852	0,053	0,026

Fuente: Elaboración propia

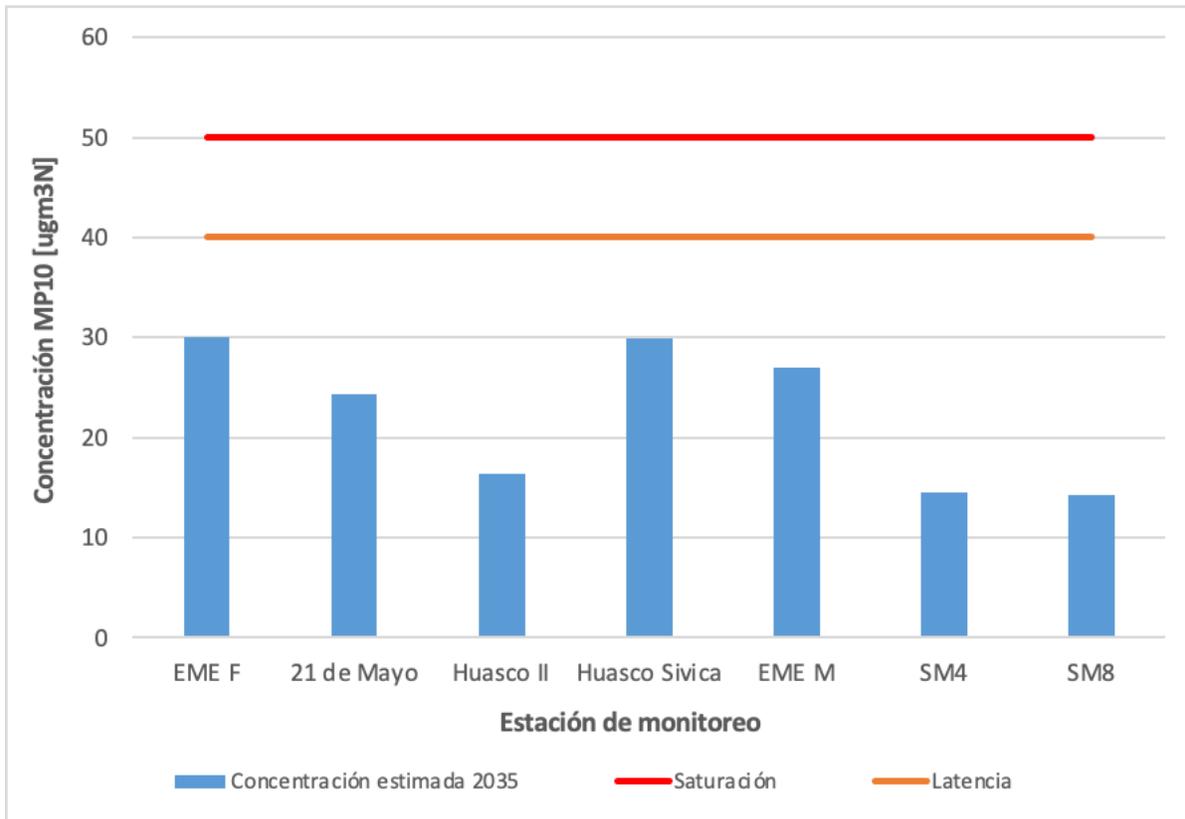


Figura 3-78 Evaluación de la norma anual de MP10 en el año 2035

Fuente: Elaboración propia

3.9.4 Análisis y recomendaciones sobre estrategias de largo plazo o condiciones mínimas para garantizar que la localidad de Huasco se mantenga bajo latencia por norma anual de MP10

En virtud de los ítems precedentes, en esta sección se presentan sugerencias en relación a las estrategias que es necesario mantener o implementar para asegurar que la localidad de Huasco se mantenga bajo la latencia por norma anual de MP10.

En primer lugar, como se evalúa en la Sección 3.9.1.1, la implementación del PPA ha tenido un impacto positivo al reducir las concentraciones de MP10, permitiendo que se encuentre por debajo de los niveles de latencia. Por consiguiente, es posible concluir que, hasta el momento, el Plan ha cumplido con su objetivo. Sin embargo, para asegurar un éxito a largo plazo, resulta fundamental seguir avanzando en la implementación del Plan, ajustando gradualmente la ambición y adaptando las medidas según sea necesario.

En línea con lo anterior, en la Sección 3.9.1.3 se proponen modificaciones al Plan según el avance de las medidas y su aplicabilidad. En particular, se recomienda aumentar la exigencia de los límites de emisión máxima anual para las chimeneas de la Planta de Pellets y Guacolda, a 182,5

t/año y 200 t/año respectivamente. Adicionalmente se destaca la propuesta de modificar la letra f) del artículo 23, estableciendo una corrección de oxígeno de 17% para las chimeneas de la Planta de Pellets.

Adicionalmente, con el propósito de contribuir a la disminución de las emisiones de MP10 en Huasco, en la Sección 3.9.3 se proponen medidas de abatimiento junto con sus costos asociados y un cronograma de implementación. En particular, se destaca la pavimentación de caminos que aún siguen siendo de tierra en Huasco y al interior de las instalaciones, y la implementación de barreras de viento en canchas de acopio y zonas de carga y descarga de la Planta de Pellets.

3.10 Estimación de la reducción de emisiones de las medidas señaladas en el Plan de Control Integral de la Planta de Pellets y Termoeléctrica Guacolda

Resulta relevante estimar la reducción de emisiones de las medidas señaladas en los Planes de Control Integral de la Planta de Pellets y de la Central Termoeléctrica Guacolda, para cada una de las fuentes, según los contenidos mínimos establecidos en los artículos 9 (ver Tabla 3-88) y 11 (ver Tabla 3-89) del PPA Huasco, a fin de establecer claramente la relación de las medidas propuestas con las metas de reducción establecidas en el artículo 5 del PPA (ver Tabla 3-76).

Tabla 3-88 Medidas mínimas para el Plan de Control Integral de Planta de Pellets CAP Minería

Plazo	Medida
Desde la aprobación del Plan de Control Integral	En el transporte del pre-concentrado que se realiza por el ferrocarril, respetar el límite de llenado de cada vagón con el fin de evitar material resuspendido o pérdidas del material de carga.
	En la zona de acopio de materiales, asegurar condiciones de mantención y óptima operación de los sistemas de aspersores de los acopios y disponer en faena de los registros de las mantenciones efectuadas.
	Barrer y aspirar todas las calles pavimentadas al interior de la planta de pellets.
Dentro del plazo de 6 meses contado desde la aprobación del Plan de Control Integral	En el transporte del pre-concentrado que se realiza por el tren, implementar un sistema automático de hidrolavado de todos los vagones y carros, tanto de su interior como exterior, incluyendo la base, soporte y montaje de estos, con el fin de que el tránsito del tren por la zona latente, en ambos sentidos de toda la línea de tren, circule sin resuspender y/o con pérdidas del material de carga.
	En el transporte del pre-concentrado que se realiza por el tren, cerrar la parte superior de cada vagón, a objeto de minimizar las emisiones de material particulado por dicha apertura.
Dentro del plazo de 24 meses contado desde la aprobación del Plan de Control Integral	En las etapas de transporte y manejo de todos los materiales, en los puntos de carga y descarga incorporar chutes de transferencia a contrapresión o una técnica de equivalente eficiencia en el control de la emisión de material particulado. Se entenderá por "chute" al elemento mecánico que direcciona y guía el material proveniente de la correa transportadora de carga hacia la correa de recepción.

Plazo	Medida
	<p>Incorporar técnicas para el control de emisiones en las correas de transporte de materiales con el fin de lograr al menos un 90% de reducción con respecto a la situación base u otras medidas de reducción de emisiones por un monto equivalente o superior, dentro o fuera del establecimiento. Entre estas técnicas de control de emisiones se podrán considerar las siguientes: las cintas tubulares y las técnicas de encapsulamiento de equivalente eficiencia en el control de la emisión de material particulado.</p> <p>En la zona de acopio de materiales, implementar cobertura a la totalidad de las pilas inactivas en la zona de canchas. Dichas coberturas podrán ser de polipropileno de 95% de densidad o similar. En el plan a presentar se precisará la logística de la actividad.</p>
Dentro del plazo de 36 meses contados desde la aprobación del Plan de Control Integral	<p>Se deberá pavimentar el trayecto de propiedad de CAP Minería, desde Puerto Las Losas a la intersección con Ruta C-468.</p>
Sin plazo definido	<p>El Plan de Control Integral deberá considerar acciones que incluyan: barrido, retiro o eventual aspirado del material particulado que se pierde o cae producto del manejo y transporte de materiales, sea por la acción del viento en las áreas al interior de la faena, por el tránsito de vehículos en las calles pavimentadas o por el tránsito del tren.</p> <p>La relación de las medidas propuestas con las metas de reducción establecidas en el Artículo 5 del PPA Huasco, asociadas a las emisiones sin combustión.</p> <p>La evidencia de coordinación y autorizaciones, de ser necesarias, para llevar a cabo las intervenciones en bienes de uso público (calles, caminos, carreteras, etc.) y otras similares que pudiesen ser necesarias para la correcta ejecución de las obras y acciones comprometidas en el respectivo Plan de Control Integral.</p>

Fuente: Artículo 9 PPA Huasco

Tabla 3-89 Medidas mínimas para el Plan de Control Integral Central Termoeléctrica Guacolda S.A.

Plazo	Medida
Dentro del plazo de 24 meses contados desde la aprobación del Plan de Control Integral	En las etapas de transporte y manejo del carbón y cenizas, En los puntos de carga y descarga incorporar chutes de transferencia a contrapresión o una técnica de equivalente eficiencia en el control de la emisión de material particulado.
	En las etapas de transporte y manejo del carbón y cenizas, Incorporar técnicas para el control de emisiones en las correas de transporte de materiales con el fin de lograr al menos un 90% de reducción con respecto a la situación base u otras medidas de reducción de emisiones por un monto equivalente o superior, dentro o fuera del establecimiento. Entre estas técnicas de control de emisiones se podrán considerar las siguientes: las cintas tubulares y las técnicas de encapsulamiento de equivalente eficiencia en el control de la emisión de material particulado.
Dentro del plazo de 36 meses contados desde la aprobación del Plan de Control Integral	Se deberá pavimentar el camino desde la central termoeléctrica al vertedero de cenizas, de propiedad de Guacolda.
Sin Plazo	El Plan de Control Integral deberá considerar acciones que incluyan: barrido, retiro o eventual aspirado del material particulado que cae producto del manejo y transporte de materiales, sea por la acción del viento en las áreas al interior de la faena, o por el tránsito de vehículos en las calles pavimentadas.
	La relación de las medidas propuestas con las metas de reducción establecidas en el artículo 5 del PPA Huasco, asociadas a las emisiones sin combustión.
	La evidencia de coordinación y autorizaciones, de ser necesarias, para llevar a cabo las intervenciones en bienes de uso público (calles, caminos, carreteras, etc.) y otras similares que pudiesen ser necesarias para la correcta ejecución de las obras y acciones comprometidas en el respectivo Plan de Control Integral.

Fuente: Artículo 11 PPA Huasco

Para estimar las reducciones generadas por las medidas incluidas en los PCI se sigue la metodología presentada en la Sección 3.6, utilizando como referencia el estudio “Manual para desarrollo de inventarios” (MMA, 2017b) y la “Guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales” (MMA, 2019a). Esta estimación se realizará a partir del inventario elaborado en el estudio “Antecedentes para Elaborar el Plan de Prevención de la Localidad de Huasco” (GreenLabUC, 2014), utilizando eficiencias de abatimiento de MP10 de referencia de acuerdo a lo recopilado en el presente estudio, resumidas en la Tabla 3-90.

Tabla 3-90 Eficiencias de abatimiento de las medidas señaladas en los PCI

Instalación PCI	ID Medida	Medida	Fuente emisora	Eficiencia abatimiento [%]	Referencia
Planta de Pellets	PP1	Límite llenado vagón	Carga y descarga de material	NC	-
	PP2	Mantenimiento y óptima operación sistemas de aspersores en acopios	Erosión eólica pilas	50%	(COREMA III Región, 2010)
	PP3	Barrido y aspirado calles pavimentadas internas planta pellets	Tránsito en camino pavimentado	51%	(US-EPA, 2016a)

Instalación PCI	ID Medida	Medida	Fuente emisora	Eficiencia abatimiento [%]	Referencia
	PP4	Sistema automático de hidrolavado de vagones	Tránsito ferrocarril	16%	(De Rus, 2011)
	PP5	Cierre superior vagón	Tránsito ferrocarril	79%	(De Rus, 2011)
	PP6	Chutes de transferencia a contrapresión	Carga y descarga de material	70%	(Bengalla Mining Company, 2012)
	PP7	Técnicas para el control de emisiones en las correas de transporte de materiales	Correas transportadoras	90%	Exigido por PCI
	PP8	Cobertura pilas inactivas	Erosión eólica pilas	90%	Criterio conservador
	PP9	Pavimentación camino desde Puerto Las Losas a intersección con Ruta C-468	Tránsito en camino no pavimentado	99,6%	Estimado en base a diferencias de factores de emisión
	PP10	Barrido, retiro o aspirado de MP que se pierde o cae por manejo y transporte de materiales	Tránsito en camino pavimentado	51%	(US-EPA, 2016a)
	PP11	Relación de medidas propuestas con metas de reducción en el Artículo 5 del PPA Huasco	-	No aplica	-
	PP12	Evidencia de coordinación y autorizaciones para llevar a cabo las intervenciones en bienes de uso público (calles, caminos, carreteras, etc.) necesarias	-	No aplica	-
Termoeléctrica Guacolda	TG1	Chutes de transferencia a contrapresión	Carga y descarga de material	90%	Exigido por PCI
	TG2	Técnicas para el control de emisiones en las correas de transporte de materiales	Correas transportadoras	70%	(Bengalla Mining Company, 2012)
	TG3	Pavimentación camino desde la central termoeléctrica al vertedero de cenizas	Tránsito en camino no pavimentado	99,6%	Estimado en base a diferencias de factores de emisión
	TG4	Barrido, retiro o aspirado de MP que se pierde o cae por manejo y transporte de materiales	Tránsito en camino pavimentado	51%	(US-EPA, 2016a)
	TG5	Relación de medidas propuestas con metas de reducción en el Artículo 5 del PPA Huasco	-	No aplica	-
	TG6	Evidencia de coordinación y autorizaciones para llevar a cabo las intervenciones en bienes de uso público (calles, caminos, carreteras, etc.) necesarias	-	No aplica	-

NC: No capitalizable, es decir, no es posible determinar la eficiencia de reducción de emisiones previo a la implementación de la medida.

Fuente: Elaboración propia

A partir de lo anterior se estima el potencial de reducción de emisiones de MP10 de cada medida, presentados en la Tabla 3-91. De esta forma, la aplicación de las medidas mínimas de los PCI en fuentes sin combustión permiten disminuir en un 32% las emisiones respecto del 2013 generadas por la Planta de Pellets y un 17% en Guacolda.

Tabla 3-91 Potencial de reducción de emisiones de las medidas señaladas en los PCI

Instalación PCI	ID Medida	Potencial reducción de emisiones [t/año]
Planta de Pellets	PP1	NC
	PP2	35,14
	PP3	0,12
	PP4	26,89
	PP5	6,72
	PP6	127,50
	PP7	42,50
	PP8	7,03
	PP9	0,04
	PP10	0,12
	PP11	No aplica
	PP12	No aplica
Termoeléctrica Guacolda	TG1	0,75
	TG2	2,24
	TG3	0,46
	TG4	0,06
	TG5	No aplica
	TG6	No aplica

NC: No capitalizable, es decir, no es posible determinar la eficiencia de reducción de emisiones previo a la implementación de la medida.

Fuente: Elaboración propia

3.11 Propuesta de banco de medidas de compensación de emisiones de MP10

La compensación de emisiones, si bien no es una medida de reducción de emisiones per se, corresponde a un instrumento de gestión que tiene como finalidad producir o generar un efecto positivo alternativo y equivalente a un efecto adverso identificado, que no sea posible mitigar o reparar. Por lo tanto, contribuye a la descontaminación atmosférica para recuperar los niveles de calidad del aire mediante consideraciones establecidas en los Planes de Prevención y/o Descontaminación Ambiental.

En este contexto, el artículo 12 del D.S. N°38/2016 del MMA establece que, desde la entrada en vigencia del PPA, “todos aquellos proyectos o actividades que se sometan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, que se localicen en la zona latente y que generen un aumento de emisiones de material particulado superior a 5 t/año, deberán compensar sus emisiones de material particulado en un 100%” (MMA, 2017a). De forma complementaria, el artículo 13 establece las condiciones generales que deben cumplir los programas de compensación de emisiones, entre las que destacan las siguientes:

- a. Se podrá hacer uso de mecanismos de compensación de emisiones a través del reconocimiento de las reducciones adicionales realizadas en la implementación propia de

las medidas del presente Plan o mediante nuevas acciones de reducción, siempre y cuando no se afecten las metas de reducción de emisiones establecidas.

- b. Realizar la compensación solo entre actividades con combustión o procesos térmicos y solo entre actividades sin combustión, pertenezcan o no estas a un mismo sector económico.
- c. Podrán realizarse compensaciones entre una fuente con combustión que cede emisiones a una fuente o actividad sin combustión, pero no viceversa.
- d. Solo se permitirá compensar emisiones con aquellas de establecimientos o actividades en operación.

3.11.1 Revisión de medidas de compensación potencialmente aplicables

Resulta relevante definir una propuesta de banco de medidas de compensación al cual puedan optar los proyectos que deban compensar sus emisiones de MP10 en el marco del SEIA. En el proceso de selección de medidas de compensación se priorizó la identificación de medidas que puedan aplicarse dentro de la misma zona latente, de modo que, dentro de lo posible, la población beneficiada por la medida sea la misma que sería potencialmente afectada por el proyecto en evaluación.

En primer lugar, se revisaron los proyectos ingresados al SEIA que fueron aprobados en Huasco, con el propósito de recopilar las medidas de compensación que se proponen en conformidad con el PPA. En la Tabla 3-92 se resumen las medidas de compensación comprometidas por distintos proyectos, donde se identifica la fuente que permite compensar emisiones, junto con la fuente cuyas emisiones deben ser compensadas. Además, se detallan las toneladas de MP10 compensadas por cada medida en particular.

Tabla 3-92 Medidas de compensación comprometidas por proyectos localizados en Huasco

Medida compensación	Fuente que compensa	Fuente a compensar	Compensación MP10 [t/año]	Referencia
Instalación pasto sintético y estabilización de superficie con supresor en una cancha de fútbol (2,06 ha)	Erosión eólica	Actividades sin combustión	14,05	EIA "Depósito de Relaves Filtrados, Planta de Pellets" (GAC, 2021)
Aplicación de supresor de MP con 80% de eficiencia en calles no pavimentadas del área urbana	Tránsito - no pavimentado	Actividades con combustión	S/I	
Pavimentación de una cancha de acopio en Puerto Las Losas (0,5 ha)	Erosión eólica	Actividades sin combustión	15,1	DIA "Modificación recepción y embarque graneles minerales" (GAC, 2020)
Estabilización permanente de cancha con superficie de tierra en Villa Guacolda (0,08 ha)			2,5	
Estabilización permanente de estacionamiento con superficie de			4,8	

Medida compensación	Fuente que compensa	Fuente a compensar	Compensación MP10 [t/año]	Referencia
tierra fuera de la Planta de Pellets (0,16 ha)				
Estabilización permanente de estacionamiento con superficie de tierra en Villa Guacolda (0,05 ha)			1,5	
Aplicación de bischofita y/o supresor con 80% de eficiencia en áreas expuestas (5,97 ha)	Erosión eólica	Erosión eólica	14	DIA "Planta Desalinizadora Guacolda" (GHD, 2018)
Aplicación de bischofita y/o supresor con 80% de eficiencia en caminos no pavimentados cercano a estadio Guacolda (0,33 km)	Tránsito - no pavimentado	Tránsito - no pavimentado	6,6	

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior fue complementado con la revisión de estudios, Planes de Prevención y/o Descontaminación Ambiental en otras zonas. En particular, el documento de "Evaluación del instrumento compensación de emisiones Región Metropolitana" (Superintendencia del Medio Ambiente, 2014), recopila las medidas de compensación de emisiones de distintos contaminantes que son comprometidas por proyectos instalados en la zona. Este análisis concluye que, para compensar las emisiones de MP10, las medidas más repetidas son la pavimentación de calles y la creación y/o mantención de áreas verdes.

3.11.2 Banco de medidas de compensación

A partir de lo anterior, en la Tabla 3-93 se presenta una propuesta de medidas de compensación de emisiones de MP10 potencialmente aplicables en la zona latente de Huasco, teniendo en cuenta que el titular puede considerar otras alternativas también. Se detallan las eficiencias de abatimiento de referencia, recopiladas de (US-EPA, 2016), (Ingea & In-Data, 2022) y las DIA/EIA mencionados anteriormente. Considerando que la principal fuente de emisiones de MP10 es la resuspensión de polvo por el tránsito en caminos no pavimentados, resulta relevante destacar estas medidas de compensación, especialmente en la localidad de Huasco, donde existen caminos sin tratar.

Tabla 3-93 Banco de medidas de compensación de emisiones MP10

Medida de compensación	Eficiencia de abatimiento de referencia	Mecanismo de compensación
Aplicación de bischofita en caminos no pavimentados	80,0%	Sin combustión
Aplicación de supresor de MP en caminos no pavimentados	80,0%	
Pavimentación de canchas de acopio de instalaciones	99,6%	
Estabilización de canchas con superficie de tierra	80,0%	
Estabilización de estacionamiento con superficie de tierra	80,0%	

Aplicación de bischofita en áreas expuestas a la erosión eólica	80,0%	
Instalación de pasto sintético en canchas de fútbol de tierra	S/I	
Estabilización de superficie con supresor en canchas de fútbol de tierra	80,0%	
Pavimentación de caminos	99,6%	
Creación y/o mantención de áreas verdes en parques urbanos	0,5 t MP10/ha	
Aspirado de calles	40,0%	
Sistema de captación y filtración de MP10	70,0%	Combustión
Recambio de calefactores a leña	100% ^(a)	
Chatarrización de motores	99,7%	
Filtro de manga en calderas	99,0%	

(a): Considera recambio por calefactor eléctrico que no genera emisiones de MP10.

Fuente: Elaboración propia

3.11.2.1 Metodología general para la estimación de reducción de emisiones

La metodología general que puede ser utilizada para la estimación de reducción de emisiones sigue la forma característica del cálculo de emisiones. De esta forma, la reducción de emisiones lograda al implementar una cierta medida está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 3-11 Cálculo de la reducción de emisiones de una medida de compensación

$$Red_{k,i,t} = \%Red_{k,i} \cdot Emisión\ Base_{i,t}$$

Donde:

- $Red_{k,i,t}$: Reducción de implementar la medida k a una fuente emisora i en el período t .
- $\%Red_k$: Porcentaje de reducción de la medida k a una fuente emisora i .
- $Emisión\ Base_{i,t}$: Emisiones de la fuente i en ausencia de la medida de control en el periodo t .

Respecto a lo anterior, las emisiones base se estiman de la siguiente forma:

Ecuación 3-12 Estimación de emisiones base

$$Emisión\ Base_{i,t} = FE_i \cdot NA_{i,t}$$

Donde:

- $Emisión\ Base_{i,t}$: Emisiones de la fuente i en ausencia de la medida de control durante el periodo t .
- $NA_{i,t}$: Nivel de actividad que da cuenta de la intensidad en que la fuente i está activa durante un período determinado t , típicamente un año. Este puede ser medido de

diversas formas: kilómetros recorridos, combustible consumido, energía generada, entre otros. De esta forma, la unidad típica varía y puede ser, por ejemplo: [km/año], [lt/año] o [kWh/año], respectivamente.

- FE_i : Factor de emisión de MP10 de la fuente emisora i . Da cuenta de la cantidad de emisiones, típicamente en toneladas u otra unidad de masa, por cada unidad del nivel de actividad. Generalmente se considera invariante según el nivel de actividad y se puede medir por ejemplo en: [ton MP10/km], [ton MP10/lt] o [ton MP10/kWh], entre otros.

La reducción anual total que se obtiene con la medida corresponde a la suma de las reducciones de cada una de las fuentes:

Ecuación 3-13 Reducción anual total de una medida de compensación

$$Red\ Total_t = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m Red_{k,i,t}$$

Donde:

- $Red\ Total_t$: Reducción total de la medida k en el año t .
- $Red_{k,i,t}$: Reducción de implementar la medida k a una fuente emisora i en el año t .

Adicionalmente, en las secciones siguientes se propone una metodología de cálculo de la compensación de emisiones particular en cada medida o tipo de medida. Para esto, se obtuvo información del documento “Banco de alternativas de compensación de emisiones para la ciudad de Calama y su área circundante” (Ingea & In-Data, 2022).

3.11.2.2 Aplicación de bischofita, supresor de polvo u otro estabilizador

Entre las medidas de compensación propuestas, se consideran algunas cuyo propósito es estabilizar áreas sin pavimentar a través de la aplicación de bischofita, supresor de polvo u otro estabilizador. La compensación de emisiones se estima a partir de las emisiones asociadas al área expuesta a la erosión del viento, que será intervenida. Para esto, el factor de emisión a aplicar se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 3-94 Estimación factor de emisión para calcular compensación por estabilización

Fuente emisora	Ecuación FE	Unidad FE	Parámetros
Erosión eólica	$k \cdot \left(\frac{s}{1,5}\right) \cdot \left(\frac{f}{15}\right)$	kg/ha-día	k: factor tamaño partícula, correspondiente a 0,95 para MP10 s: porcentaje de finos (%) f: porcentaje del tiempo en que el viento superó los 5,4 m/s

Fuente: Elaboración propia en base a (US-EPA, n.d.)

Adicionalmente, el nivel de actividad corresponde a la superficie del área expuesta que será intervenida, siendo su unidad la hectárea.

Por otro lado, para acreditar el avance o cumplimiento de la medida de compensación, se sugiere considerar lo siguiente:

- Reportar con imágenes y planos de la zona a utilizar en la compensación de emisiones.
- Reportar con imágenes y planos de la zona en que fue desarrollada la cobertura y desarrollar una planilla de cálculo de la estimación de la reducción de emisiones lograda.

3.11.2.3 Pavimentación de caminos

La compensación de emisiones lograda a través de la pavimentación de caminos está asociada a la reducción de emisiones de material particulado generadas por resuspensión de polvo por el tránsito vehicular, por lo que se calcula como la diferencia entre las emisiones sin pavimentación y con pavimentación. Para esto, en primer lugar, se requiere estimar los factores de emisión como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3-95 Estimación factor de emisión para calcular compensación por pavimentación

Fuente emisora	Ecuación FE	Unidad FE	Valor parámetros	
Tránsito en caminos no pavimentados	$k \cdot \left(\frac{s}{12}\right)^a \cdot \left(\frac{W}{2,72}\right)^b / 1.000$	kg/km	k: factor tamaño partícula MP10	422,5
			a: coeficiente	0,9
			b: coeficiente	0,45
			s: porcentaje de finos camino (%)	8,5
			W: Peso promedio de vehículo (ton)	-
Tránsito en caminos pavimentados	$k \cdot s^{0,91} \cdot (W \cdot 1,102311)^{1,02} / 1.000$	kg/km	k: factor tamaño partícula MP10	0,62
			k: factor tamaño partícula MP2,5	0,15
			sL: carga de finos en superficie (g/m ²)	-
			W: Peso promedio de vehículo (ton)	-

Fuente: Elaboración propia en base a (US-EPA, n.d.)

Para los niveles de actividad se deberán realizar mediciones continuas del flujo vehicular en la calle que se va a pavimentar, con el fin de determinar el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA). Las mediciones se deberán hacer al menos durante tres días (un día laboral normal, un sábado y un domingo) conforme a lo que se detalla a continuación:

- Día laboral normal: Se debe elegir un día entre un martes, miércoles o jueves y se debe medir flujos vehiculares por 17 horas continuas, entre las 7:00 y las 23:00 horas.
- Día sábado: Se debe medir flujo vehicular durante 14 horas continuas, entre las 09:00 y las 23:00 horas.
- Día domingo: se debe medir flujo vehicular durante 12 horas continuas, entre las 10:00 y las 22:00 horas.

En todos los casos, las mediciones se deben realizar en intervalos de 15 minutos y desagregando los conteos en las siguientes categorías de vehículos:

- Vehículo liviano
- Taxi
- Bus y microbús
- Furgón escolar
- Camión de dos ejes
- Camión de más de dos ejes
- Motocicleta

A partir de las mediciones realizadas, se deberá estimar el flujo vehicular anual total que circula por la vía, pudiendo considerar para ello un total de 247 días laborarles, 50 sábados y 68 domingos y festivos en total. A partir del flujo vehicular total anual, se debe establecer una base de cálculo estandarizada en kilómetros recorridos al año y luego dividir por 1.000 para obtener las toneladas anuales de emisión por metro de calle.

Por otro lado, para acreditar el avance o cumplimiento de la medida de compensación, se sugiere considerar lo siguiente:

- Verificar estado inicial de la calle a pavimentar mediante archivo fotográfico.
- Dar cuenta del inicio de las obras de pavimentación. Esto se puede realizar a través de la siguiente documentación:
 - Certificado otorgado por la municipalidad y el Serviu donde se constate que no existe proyecto de pavimentación para la calle seleccionada.
 - Contrato con empresa encargada de la pavimentación.
 - Copia del proyecto de urbanización aprobado.
 - Registro fotográfico de inicio de actividades de pavimentación para ver el estado inicial de la calle.
- Dar cuenta del término de las obras de pavimentación a través de la siguiente información:
 - Copia de recepción de obras por parte del Serviu y la municipalidad.
 - Registro fotográfico de las calles pavimentadas.

3.11.2.4 Aspirado de calles

Esta medida consiste en aspirar una calle para reducir las emisiones de material particulado generadas por resuspensión de polvo por el tránsito vehicular. Para estimar el factor de emisión se utiliza la ecuación presentada en la Tabla 3-95 para caminos pavimentados. Adicionalmente, los niveles de actividad se estiman mediante la metodología presentada en la Sección 3.11.2.2, para obtener los kilómetros recorridos al año a partir del flujo vehicular.

Por otra parte, para acreditar el avance o cumplimiento de la medida de compensación, se sugiere considerar lo siguiente:

- Verificar el estado inicial de la calle a desarrollar lavado y aspirado de calle mediante registro fotográfico.

- Dar cuenta del inicio del lavado/aspirado de calles presentando la siguiente documentación:
 - Certificado otorgado por la municipalidad donde se constate que no existe proyecto municipal por el lavado/aspirado de la calle.
 - Contrato con empresa encargada del lavado aspirado de calle que indique la frecuencia de lavado.
- Además, se recomienda realizar registros mensuales que indiquen:
 - Recorrido.
 - Registro fotográfico.
 - Cantidades de polvo capturado en kilos/mes y registro del lugar autorizado de disposición final.

3.11.2.5 Recambio de calefactores a leña

A pesar de que en Huasco los calefactores a leña no son una gran fuente de emisiones debido a su poco uso, se considera como opción esta medida. Para estimar la compensación de emisiones, primero se debe calcular la cantidad de calefactores antiguos de leña que deben ser reemplazados por modelos nuevos. Para esto es necesario establecer dos situaciones: una situación base con un nivel de actividad determinado y una situación que refleje el mecanismo seleccionado⁵⁶ con otro nivel de actividad, que puede ser igual o diferente al caso base. Los supuestos y consideraciones para estos cálculos deben ser claramente definidos.

Posteriormente, se calcula la emisión teniendo en cuenta la operación del calefactor antiguo y la operación del calefactor nuevo, y se determina la diferencia entre ambas emisiones. Esto nos da la reducción unitaria de emisiones. Si la medida consiste en reemplazar los calefactores por artefactos eléctricos que no emiten contaminantes atmosféricos, la reducción unitaria será igual a las emisiones unitarias del calefactor antiguo.

Finalmente, se divide la cantidad total de MP10 que debe ser compensado por la reducción unitaria generada por el mecanismo seleccionado. Esto nos permite determinar cuántos calefactores deben ser reemplazados para cumplir con los requisitos.

El factor de emisión para el uso de calefactores a leña puede expresarse en diversas unidades, dependiendo de la base de cálculo seleccionada. Esto incluye unidades como la masa de contaminante por unidad de tiempo de uso (g/h), la masa de contaminante por kilogramo de leña quemada (g/kg leña), o cualquier otra unidad relevante para la medición y comparación de las emisiones.

Los niveles de actividad se determinan dependiendo de la disponibilidad de información y recursos y el factor de emisión a utilizar. Estos pueden corresponder, por ejemplo, a las horas de uso del equipo al año, o a la cantidad de leña consumida al año.

⁵⁶ Calefactores modernos que generen menos emisiones de contaminantes atmosféricos o que no las generen

Por otro lado, para acreditar el avance o cumplimiento de la medida de compensación, se sugiere considerar lo siguiente:

- Registro de destinatarios del programa de recambio de calefactores, incluyendo fotografías de los calefactores antiguos a reemplazar junto con un número de identificación para cada calefactor.
- Acuerdo firmado por los beneficiarios y el titular que certifique la adecuada ejecución de la medida, incluyendo la confirmación de la recepción y aceptación del nuevo calefactor e información sobre el uso del nuevo calefactor. Además, el beneficiario se comprometerá a utilizar correctamente el calefactor nuevo durante un período igual o superior al tiempo que el proyecto debe compensar.
- Presentar un certificado emitido por la empresa responsable de la chatarrización del calefactor antiguo, con el número de identificación asignado a este y evidencia fotográfica.
- En caso de optar por calefactores de emisión cero para el reemplazo, se debe asegurar que estos cumplan con altos estándares de eficiencia energética, al menos cumpliendo la con el sello nivel A.

3.11.2.6 Chatarrización de motores

Los factores de emisión a utilizar vehículo que se quiera chatarrizar pueden ser obtenidos de referencias bibliográficas como el Manual para el Desarrollo de Inventarios de Emisiones Atmosféricas (MMA, 2017b) y “Air pollutant emission inventory guidebook” (EMEP/EEA, 2016). Por otro lado, los niveles de actividad para fuentes se determina a partir de la distancia total recorrida por el o los vehículos a chatarrizar en un período de tiempo determinado.

Para acreditar el avance o cumplimiento de la medida de compensación, se sugiere considerar lo siguiente:

- Listado de vehículos a chatarrizar y su vigencia, verificando que las características del vehículo a eliminar coincidan con lo que se presentó en el cálculo teórico (año, tecnología, etc.).
- Acreditar la compra del vehículo a chatarrizar por parte del titular, mediante:
 - Copia simple del contrato de compra venta del vehículo.
 - Inscripción de la transferencia de dominio del vehículo a nombre del titular del proyecto en el Registro Nacional de Vehículos Motorizados.
 - Permiso de circulación del vehículo, de al menos el último año en Huasco.
 - Certificado de revisión técnica, de al menos el último año y vigente a la fecha de la compra del vehículo.
- Se deberá acreditar la eliminación del motor del vehículo a chatarrizar, mediante:
 - Certificado de Inscripción y Anotaciones Vigentes del Registro Nacional de Vehículos Motorizados, en que conste la cancelación de la inscripción por desarme del vehículo.

- Acreditación de la destrucción del vehículo y su motor, mediante contrato que individualiza el vehículo con empresa que realiza la eliminación.
- Fotografías del proceso de eliminación del vehículo antes y después de su chatarrización. La fotografía debe mostrar la placa patente del vehículo eliminado.

4. Evaluación del comportamiento histórico de la concentración de MPS y generación de antecedentes para la revisión y/o actualización del D.S. N°4/1992 del MINAGRI

El MPS es un componente atmosférico presente en todos los ambientes. Puede contener varios tipos diferentes de partículas, que podrían resultar tóxicos para los seres humanos y los ecosistemas, así como también efectos corrosivos en monumentos. Una característica relevante del MPS es su permanente transferencia de bidireccional de masa entre aire y polvo, dado que una vez depositado puede volver a formar parte de los niveles aéreos de MPS si es resuspendido. Las fuentes de MPS pueden ser antropogénicas y naturales. Las de origen antropogénico pueden ser la construcción, emisiones de vehículos (incluyendo desgaste de pavimento, neumáticos y frenos), industrias y emisiones residenciales. Las fuentes naturales son, por ejemplo, actividad volcánica, tormentas de arena, incendios forestales, aerosoles marinos y detritos vegetales (Morales-Casa et al., 2020).

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del comportamiento histórico de la concentración de MPS y generación de antecedentes para la revisión y/o actualización del D.S. N°4/1992 del MINAGRI.

4.1 Análisis del comportamiento histórico de la concentración del MPS contenida en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI

Se analizó el comportamiento histórico de la concentración del Material Particulado Sedimentable contenida en el D.S. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura. Para esto se realizaron las siguientes subactividades, descritas a continuación.

4.1.1 Reunión de inicio con la contraparte técnica

Se realizó una reunión de inicio el día 22 de noviembre, cuyos detalles se encuentran en la Sección 3.1.

4.1.2 Análisis del comportamiento histórico de las concentraciones de MPS, y realizar un diagnóstico de la calidad del aire de Huasco por MPS y contenido de hierro en el MPS

A partir de la información histórica disponible de las concentraciones de MPS en Huasco, se analizó su comportamiento con el propósito de realizar un diagnóstico de la calidad del aire por MPS y por contenido de hierro en el MPS, en función de lo establecido en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI, cuyos valores máximos permisibles se presentan en la Tabla 4-1. Para esto, la contraparte recopiló y entregó datos históricos de MPS entre los años 2000 y 2013, en donde se detalla su concentración mensual junto con el contenido de hierro. Esto se complementó con

información obtenida del SNIFA hasta el año 2020, exceptuando el 2015 para el que no se encontraron datos públicos.

Tabla 4-1 Valores máximos permisibles establecidos en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI

Contaminante Normado	Media Mensual [mg/m ² -día]	Media Anual [mg/m ² -día]
MPS	150	100
Hierro en MPS	15 diciembre a 31 agosto: 60 1 septiembre a 15 diciembre: 30	30

Nota: La norma mensual de hierro en MPS establece dos valores máximos permisibles, cada uno de los cuales rige para los meses especificados.
Fuente: Elaboración propia

La información publicada por el SNIFA contiene los resultados de las mediciones de la Red de Monitoreo CAP de MPS, que cuenta con 6 estaciones de monitoreo distribuidas en la parte baja del valle del río Huasco. La ubicación geográfica de las estaciones se muestra en la Figura 4-1, en donde se observa que las estaciones N°1 y N°2 son las más cercanas a la ciudad de Huasco, situándose al sur del río del mismo nombre. Al este de estas estaciones y al norte del río se encuentran las estaciones N°3 y 5, separadas entre sí por una distancia de 100 metros y a 1 km aproximadamente de la línea de ferrocarril. La estación N°4 se encuentra al sur del río Huasco, mientras que la estación N°6 es la más lejana a la ciudad y se ubica en los faldeos del cerro Centinela.

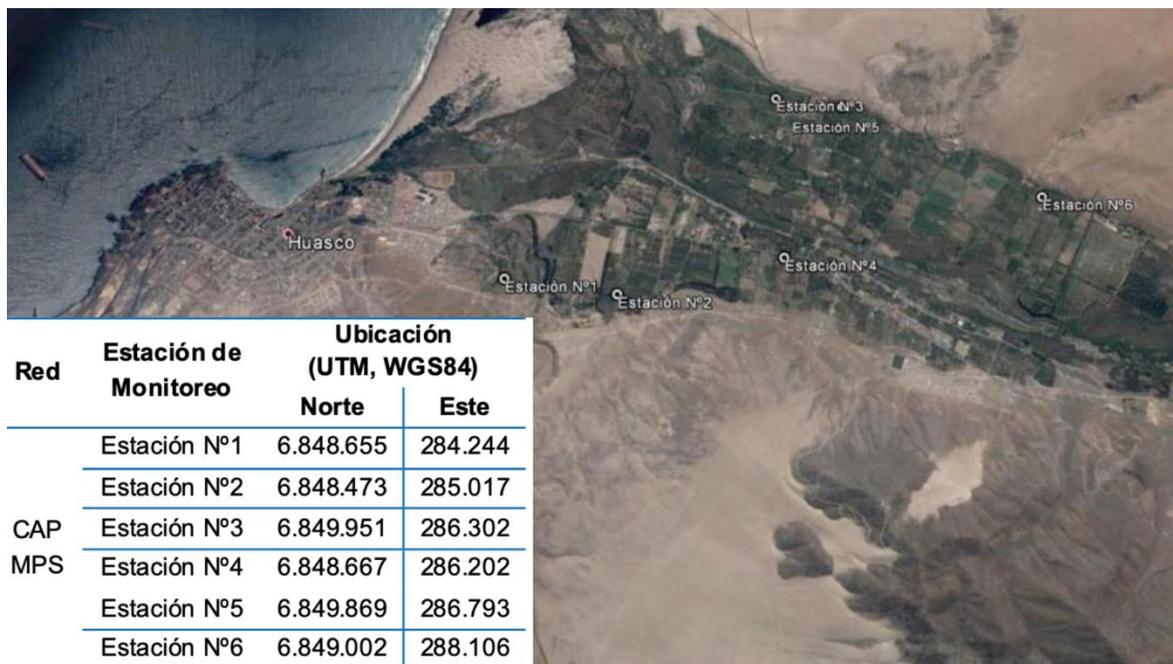


Figura 4-1 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo CAP MPS

Fuente: (GAC, 2016)

Los datos históricos desde el año 2000 a 2020 fueron compilados en una base de datos en Excel que queda a disposición de la contraparte en el Anexo Digital “PPAHuasco2-MPS.xlsx”. En la Tabla 4-2 se presenta la cantidad de datos de concentración de MPS con los que se cuenta por año, para cada una de las estaciones de monitoreo. Se puede notar que para la mayoría de los años se tienen 12 o 13 datos por estación debido a que las mediciones son mensuales, a excepción del mes de diciembre, en donde gran parte de la serie temporal cuenta con una medición en cada quincena. Hay meses en los que ocurrieron errores en el proceso de medición o se obtuvieron resultados lejanos a la realidad que se invalidaron, lo que explica la menor cantidad de datos para ciertos años. Además, como se mencionó anteriormente, no se encontró información disponible para el año 2015.

Tabla 4-2 Cantidad de datos de MPS por año y estación de monitoreo

Año	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
2000	13	13	13	13	12	13
2001	13	13	13	13	13	13
2002	13	13	13	13	13	13
2003	13	13	13	12	13	13
2004	12	13	13	13	13	13
2005	11	13	13	13	12	13
2006	13	13	13	13	13	11
2007	13	13	13	13	13	13
2008	13	13	12	13	13	13
2009	13	13	13	13	13	13
2010	13	13	13	13	13	13
2011	13	13	13	13	13	13
2012	13	13	13	13	13	13
2013	13	13	13	13	12	13
2014	10	12	12	12	11	11
2015	0	0	0	0	0	0
2016	12	13	12	13	13	13
2017	12	13	13	13	13	13
2018	13	13	13	13	13	13
2019	11	13	13	13	13	13
2020	13	13	13	13	13	13

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos históricos, se muestran en la Figura 4-2 y en la Figura 4-3 las concentraciones mensuales de MPS para la serie temporal 2000-2010 y 2011-2020, respectivamente. En estas, se puede apreciar una disminución de las concentraciones mínimas en las estaciones N°1 y 3. Además, los meses de invierno (mayo-julio) se observa una disminución de las concentraciones en todas las estaciones, mientras que las mayores concentraciones suelen registrarse en los meses entre noviembre y febrero. En la misma línea, la Figura 4-4 y la Figura 4-5 presentan las concentraciones mensuales de hierro contenido en MPS para la serie temporal 2000-2010 y 2011-2020, respectivamente.

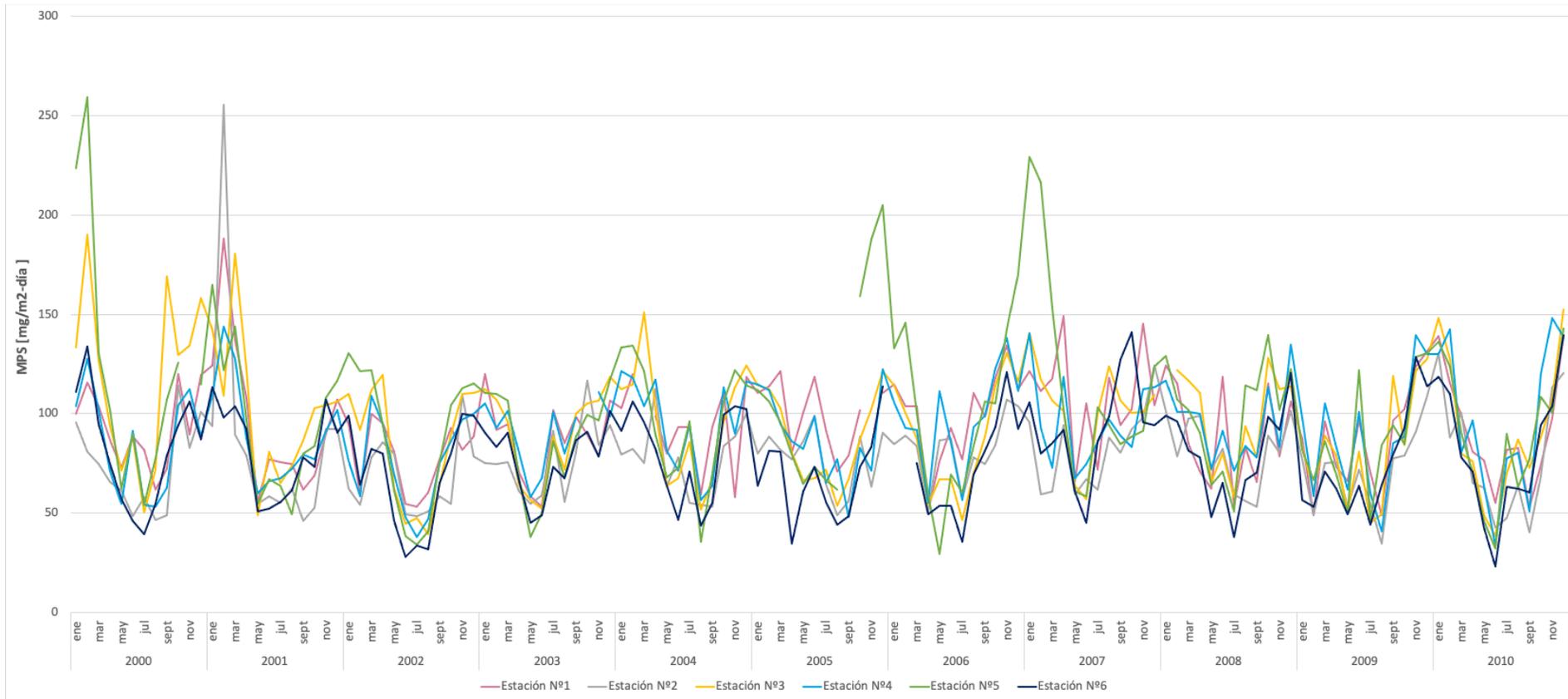


Figura 4-2 Serie temporal 2000-2010 de concentraciones mensuales de MPS por estación

Fuente: Elaboración propia

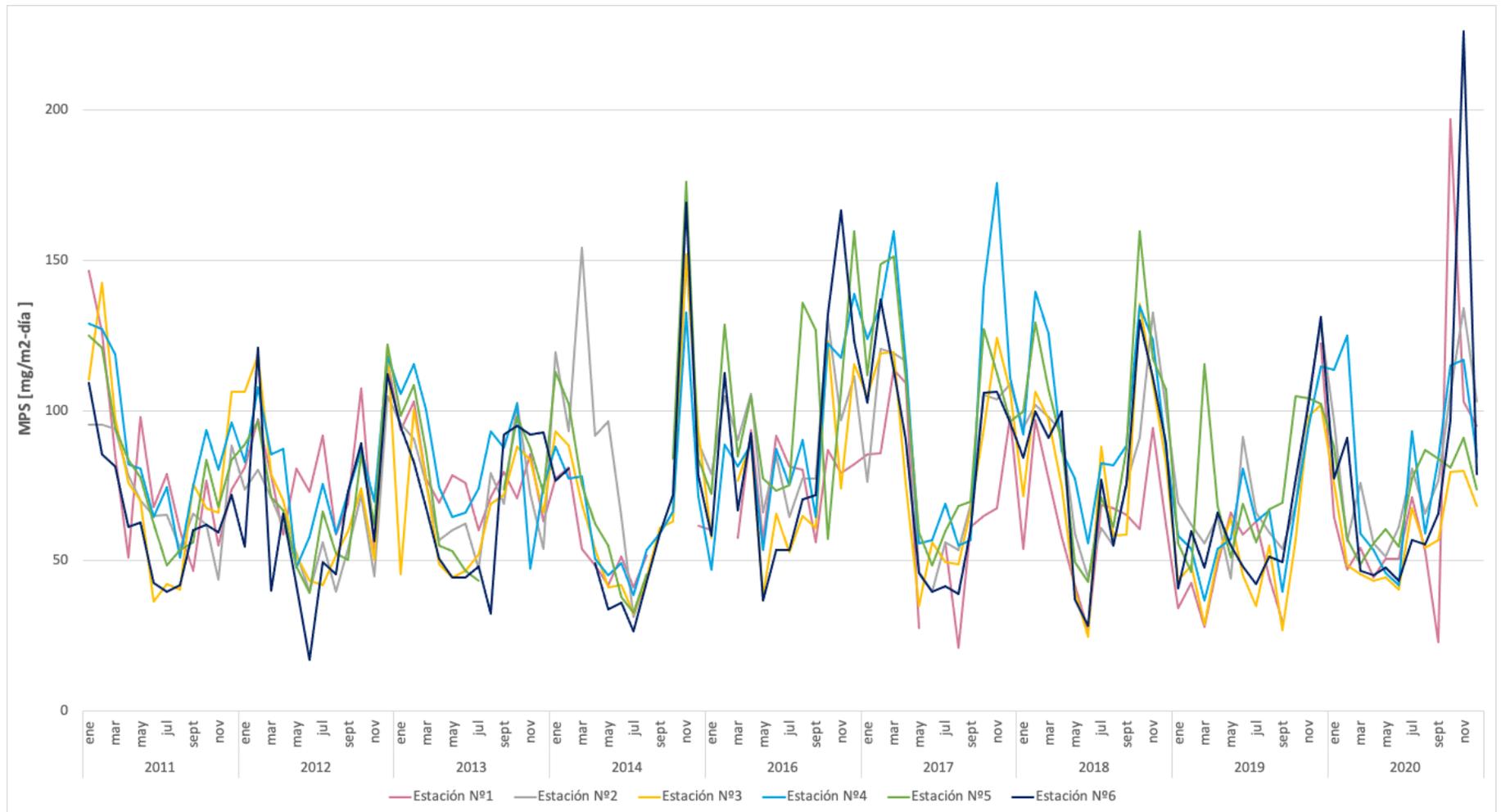


Figura 4-3 Serie temporal 2011-2020 de concentraciones mensuales de MPS por estación

Fuente: Elaboración propia

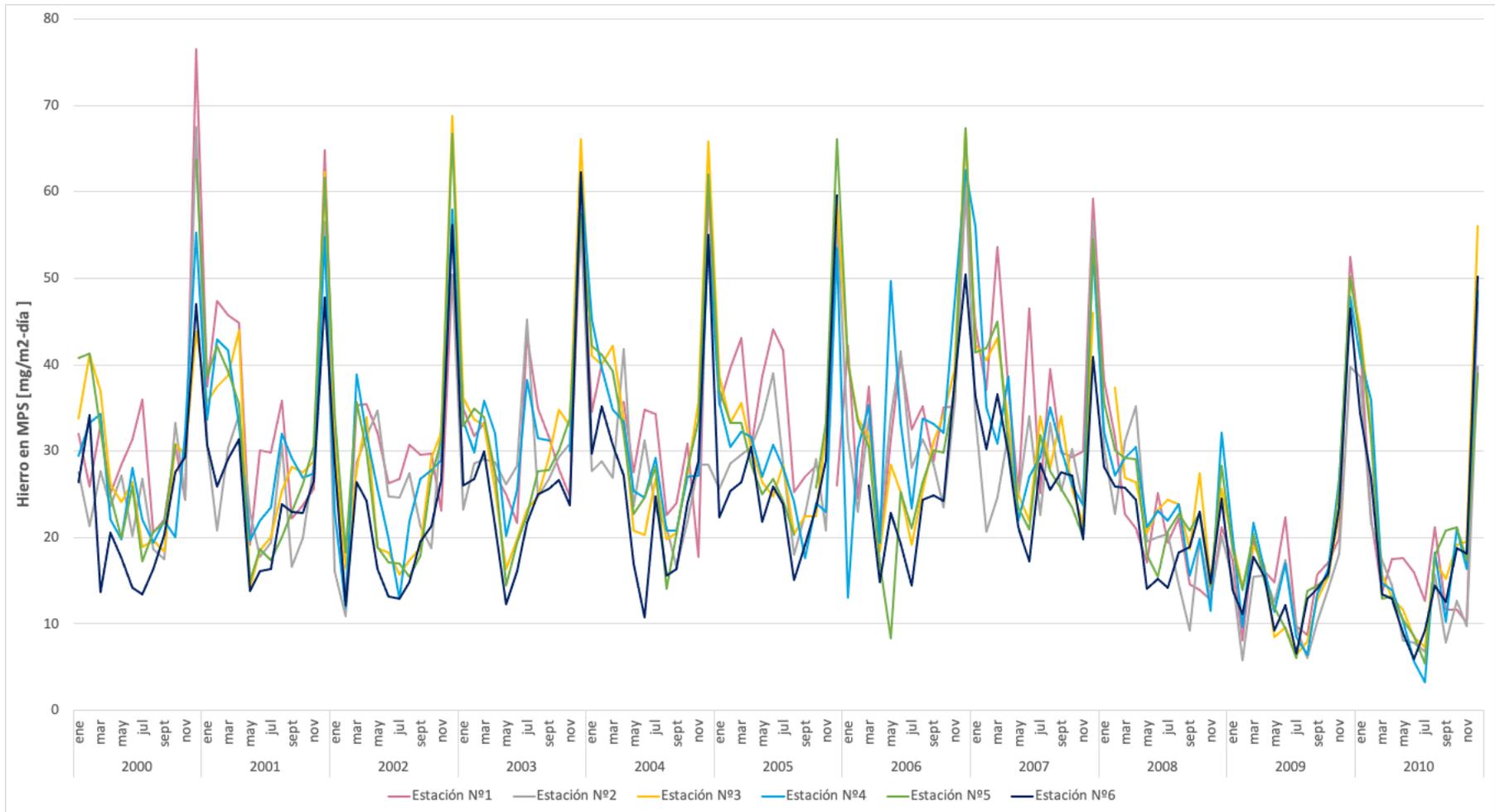


Figura 4-4 Serie temporal 2000-2010 de concentraciones mensuales de hierro en MPS por estación

Fuente: Elaboración propia

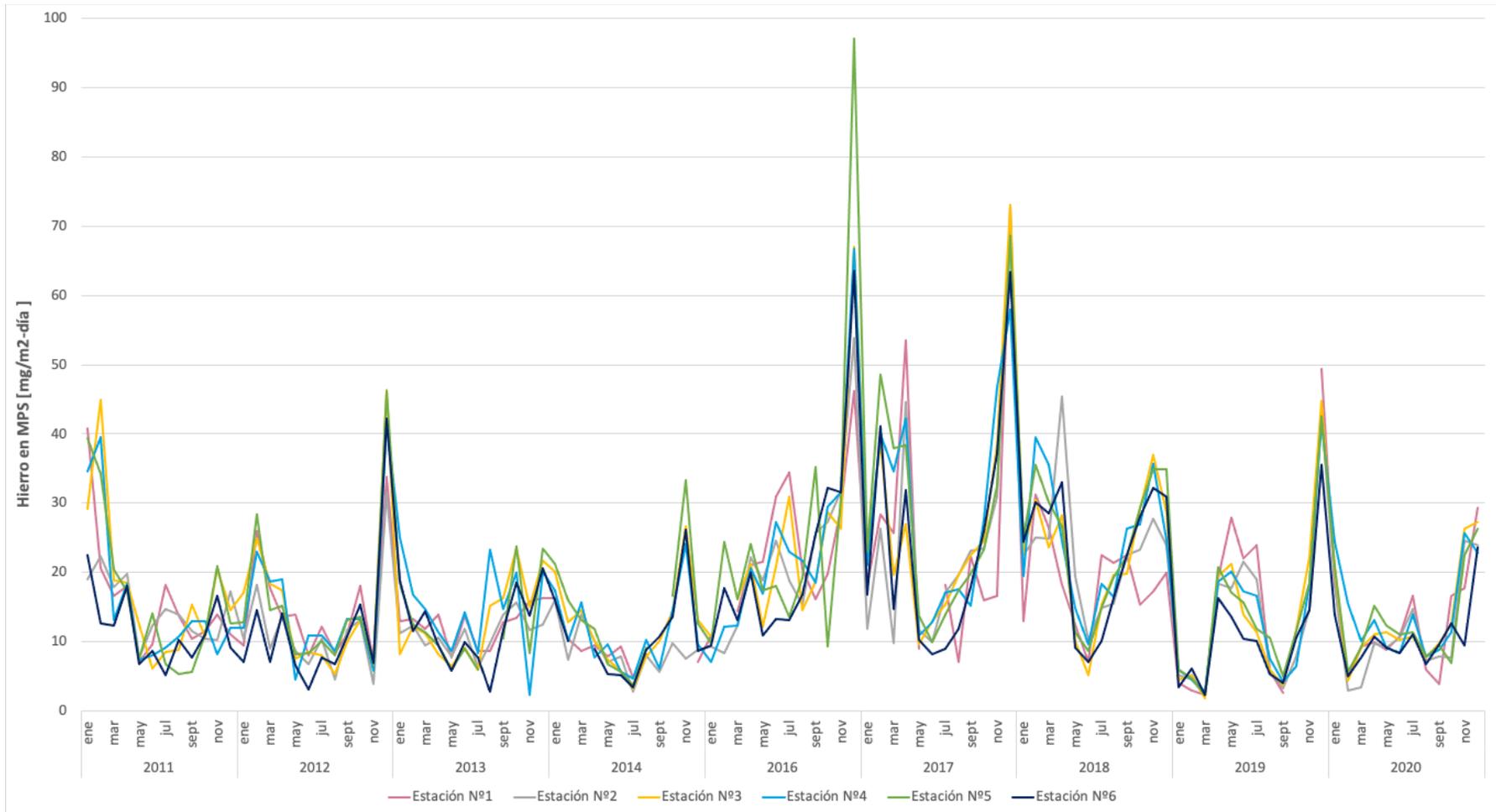


Figura 4-5 Serie temporal 2011-2020 de concentraciones mensuales de hierro en MPS por estación

Fuente: Elaboración propia

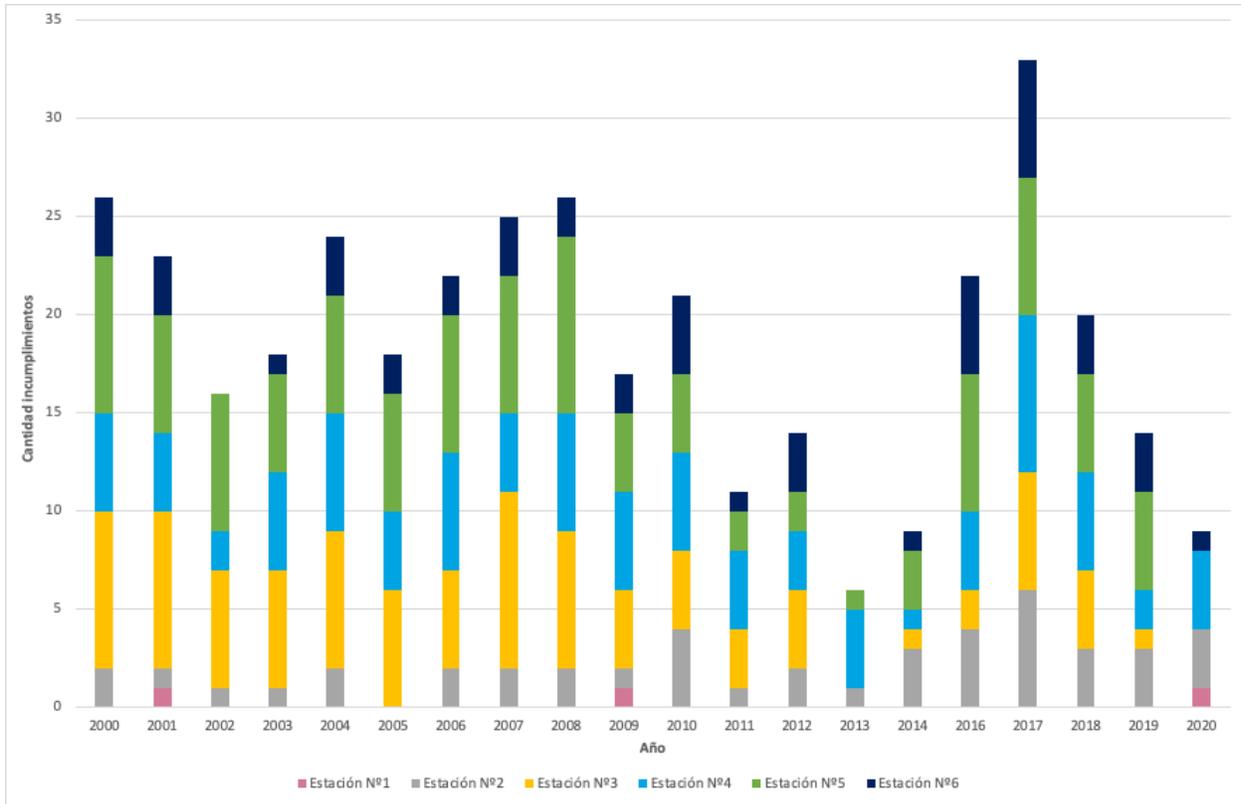
4.1.2.1 Evaluación en función de lo establecido en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI

La información recopilada es comparada con los valores máximos establecidos en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI, con el propósito de evaluar su cumplimiento histórico. La Tabla 4-3 y la Figura 4-6 presentan la cantidad de veces en cada año que las concentraciones medidas en cada estación sobrepasan el límite mensual de MPS, mientras que la Tabla 4-4 y la Figura 4-7 de hierro en MPS. Se puede notar que, a excepción del 2015, en todos los años analizados se incumple al menos en cuatro estaciones la normativa debido a la superación del límite definido para MPS. Además, durante 2007 se alcanza un máximo de 11 meses de incumplimientos en alguna de las estaciones, teniendo en cuenta que para el mes de diciembre se considera una evaluación para cada quincena. Por otro lado, se puede notar que se cumple el máximo permisible de hierro en MPS en siete años de la serie temporal, y se alcanza un máximo de cuatro meses de excedencia en 2003, 2006 y 2016 en alguna estación de monitoreo.

Tabla 4-3 Cantidad de incumplimientos históricos del límite mensual de MPS, en el marco del D.S. N°4/1992

Año	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
2000	0	2	8	5	8	3
2001	1	1	8	4	6	3
2002	0	1	6	2	7	0
2003	0	1	6	5	5	1
2004	0	2	7	6	6	3
2005	0	0	6	4	6	2
2006	0	2	5	6	7	2
2007	0	2	9	4	7	3
2008	0	2	7	6	9	2
2009	1	1	4	5	4	2
2010	0	4	4	5	4	4
2011	0	1	3	4	2	1
2012	0	2	4	3	2	3
2013	0	1	0	4	1	0
2014	0	3	1	1	3	1
2015	-	-	-	-	-	-
2016	0	4	2	4	7	5
2017	0	6	6	8	7	6
2018	0	3	4	5	5	3
2019	0	3	1	2	5	3
2020	1	3	0	4	0	1

Fuente: Elaboración propia



Nota: No se presenta el año 2015 debido a falta de datos.

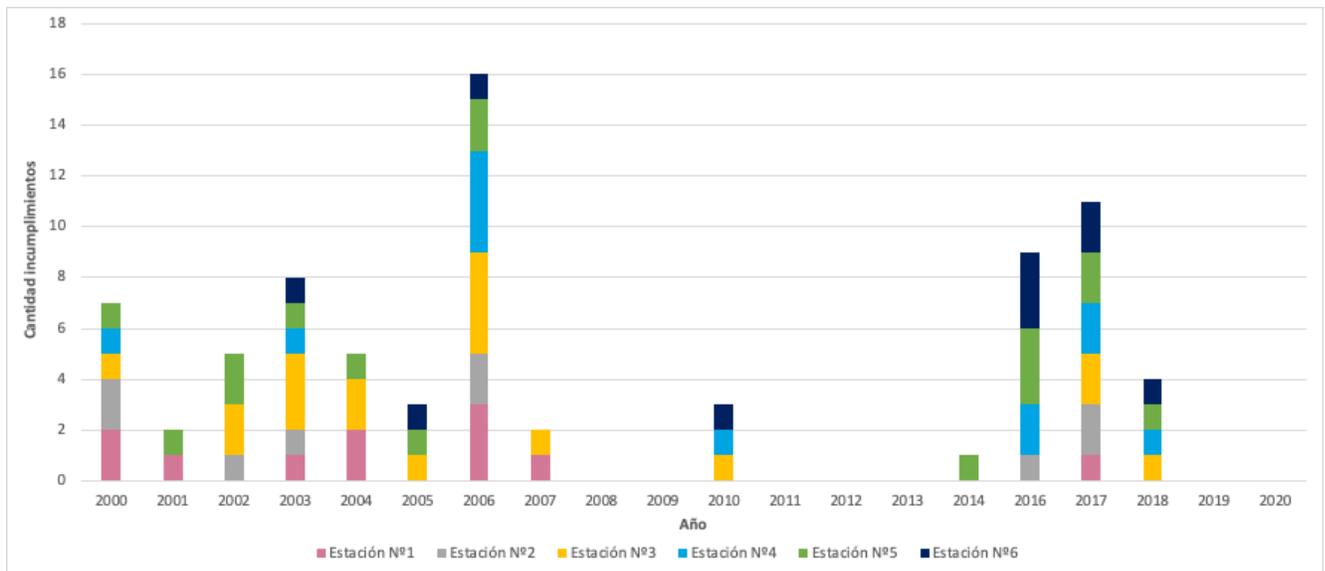
Figura 4-6 Cantidad de incumplimientos históricos del límite mensual de MPS, en el marco del D.S. N°4/1992

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-4 Cantidad de incumplimientos históricos del límite mensual de hierro en MPS, en el marco del D.S. N°4/1992

Año	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
2000	2	2	1	1	1	0
2001	1	0	0	0	1	0
2002	0	1	2	0	2	0
2003	1	1	3	1	1	1
2004	2	0	2	0	1	0
2005	0	0	1	0	1	1
2006	3	2	4	4	2	1
2007	1	0	1	0	0	0
2008	0	0	0	0	0	0
2009	0	0	0	0	0	0
2010	0	0	1	1	0	1
2011	0	0	0	0	0	0
2012	0	0	0	0	0	0
2013	0	0	0	0	0	0
2014	0	0	0	0	1	0
2015	0	0	0	0	0	0
2016	0	1	0	2	3	3
2017	1	2	2	2	2	2
2018	0	0	1	1	1	1
2019	0	0	0	0	0	0
2020	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia



Nota: No se presenta el año 2015 debido a falta de datos.

Figura 4-7 Cantidad de incumplimientos históricos del límite mensual de hierro en MPS, en el marco del D.S. N°4/1992

Fuente: Elaboración propia

En línea con lo anterior, en las siguientes figuras se evalúa la norma mensual de MPS para cada año comprendido entre 2016 y 2020, debido a la relevancia de este periodo por la implementación del PPA de Huasco. Se observa que, en 2016, la estación N°6 supera el límite en noviembre y la estación N°5 en diciembre. En el año 2017 la estación N°4 supera el límite en marzo y noviembre, mientras que en 2018 la estación N°5 lo supera en octubre. Por último, en 2019 no se sobrepasa la norma y en 2020 se sobrepasa en octubre y noviembre por las estaciones N°1 y 6, donde se registraron valores muy por encima del rango. En este último año, además, se supera la latencia en los meses de febrero y noviembre en las estaciones N°4 y 2, respectivamente. Se destaca la relevancia de las estaciones N°1 y 2 por su cercanía a la ciudad.

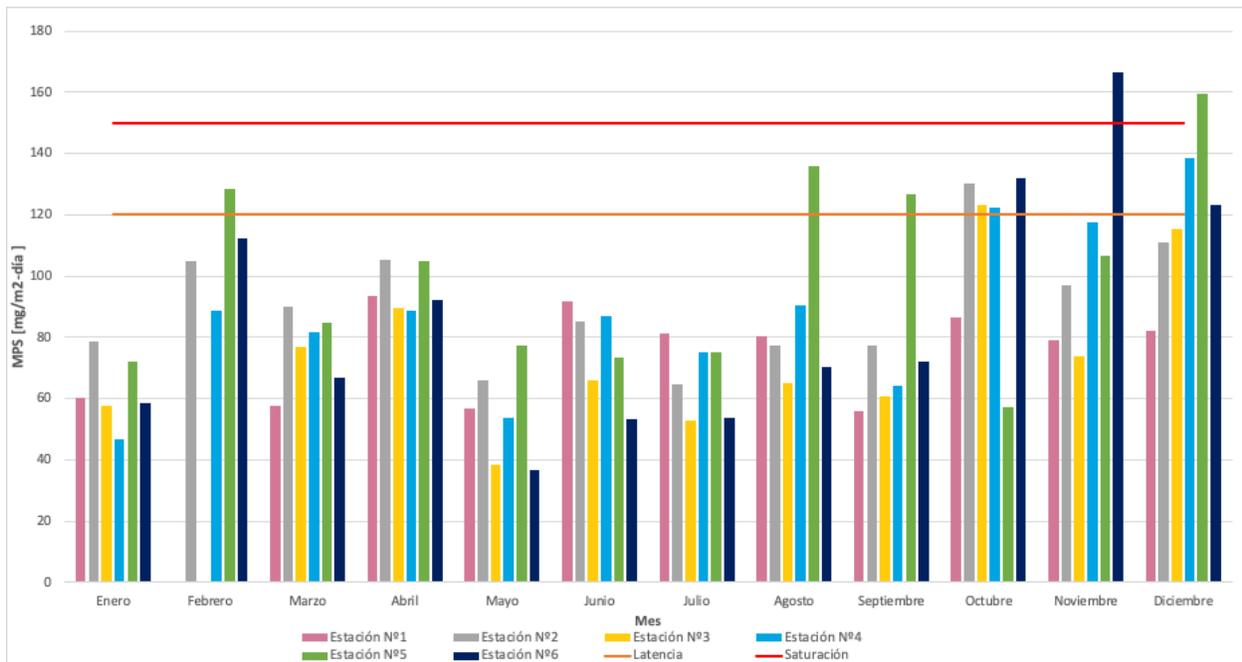


Figura 4-8 Evaluación norma mensual MPS, año 2016

Fuente: Elaboración propia

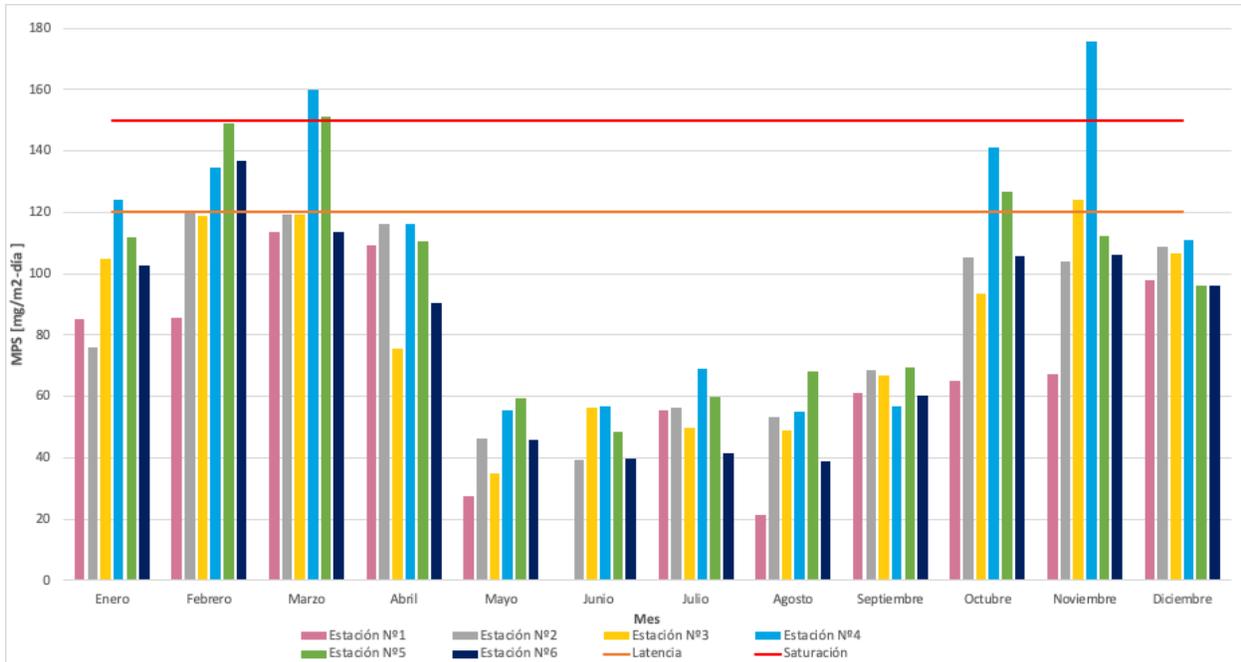


Figura 4-9 Evaluación norma mensual MPS, año 2017

Fuente: Elaboración propia

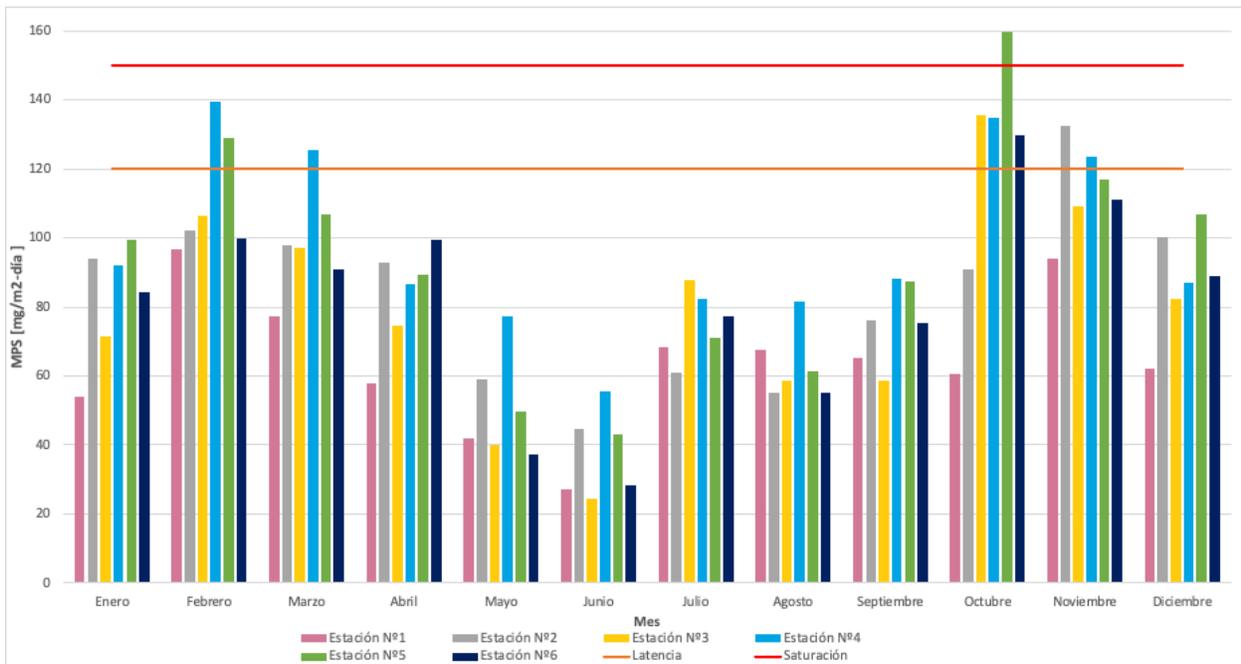


Figura 4-10 Evaluación norma mensual MPS, año 2018

Fuente: Elaboración propia

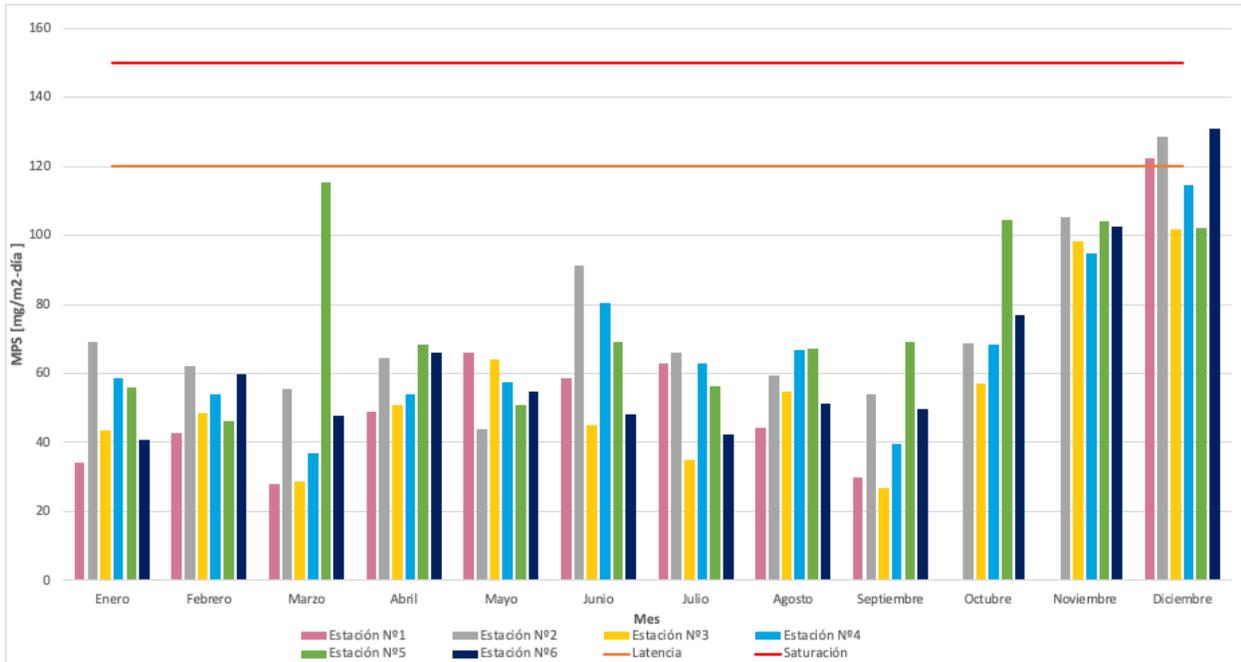


Figura 4-11 Evaluación norma mensual MPS, año 2019

Fuente: Elaboración propia

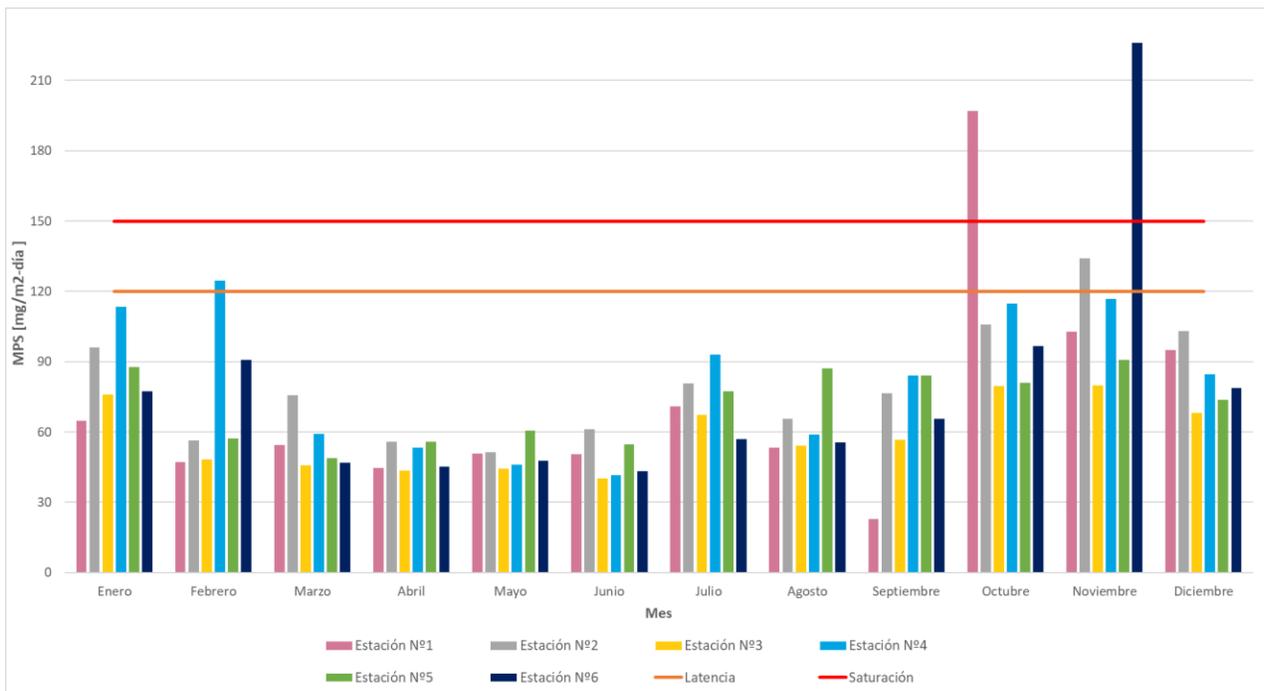
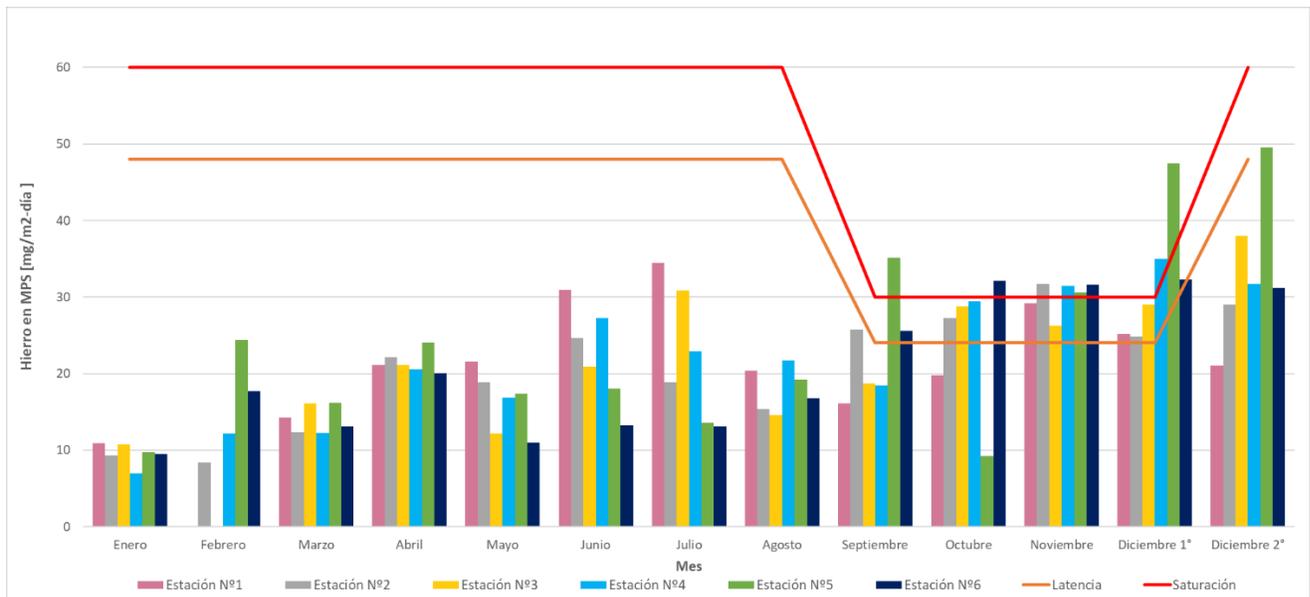


Figura 4-12 Evaluación norma mensual MPS, año 2020

Fuente: Elaboración propia

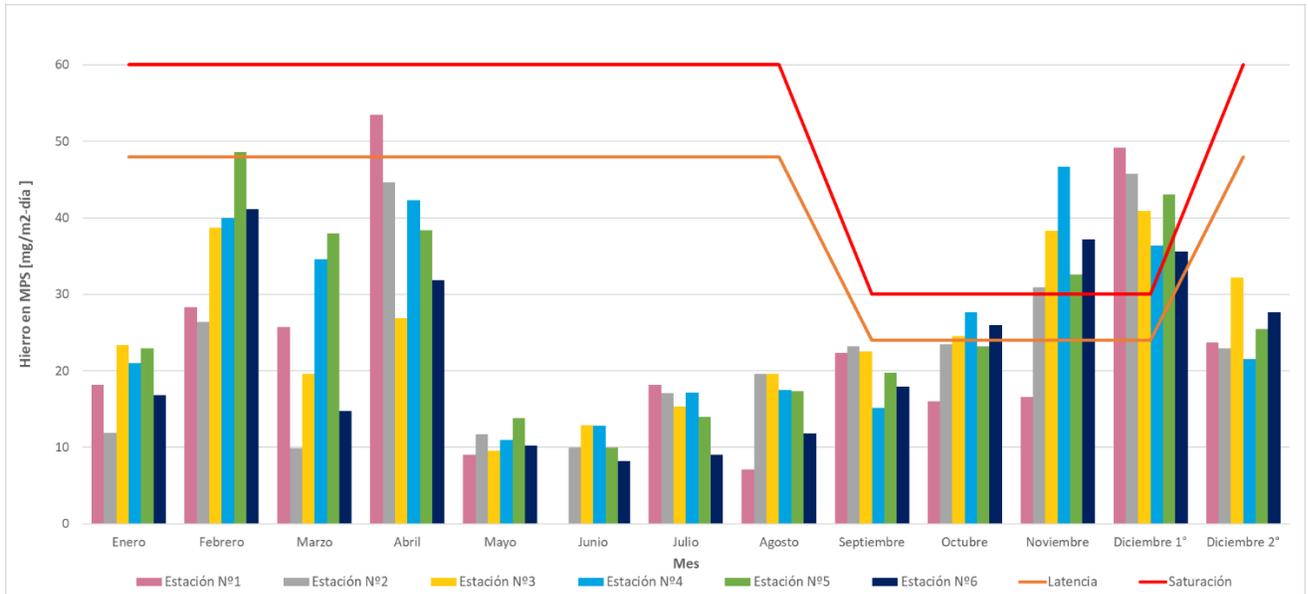
El mismo análisis anterior se presenta para la norma mensual de hierro en MPS. En la Figura 4-13 a la Figura 4-17 se presenta la evaluación de la norma mensual de hierro en MPS para los años entre 2016 y 2020. Se observa que, en 2016, en el periodo comprendido entre septiembre y la primera quincena de diciembre, en donde el límite es más restrictivo, este se ve superado al menos por una estación todos los meses. En el año 2017 se observan superaciones del límite en noviembre y la primera quincena de diciembre, mientras que en 2018 solo en noviembre. Ya en el año 2019 se puede observar que el límite no es sobrepasado por ninguna estación durante el año (ver Figura 4-16), y en 2020 en el mes de noviembre se registran superaciones únicamente del límite de latencia, en las estaciones N°2, 3 y 4.



Nota: El mes de diciembre se desagrega en quincenas: Diciembre 1° (primera quincena) y Diciembre 2° (segunda quincena).

Figura 4-13 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2016

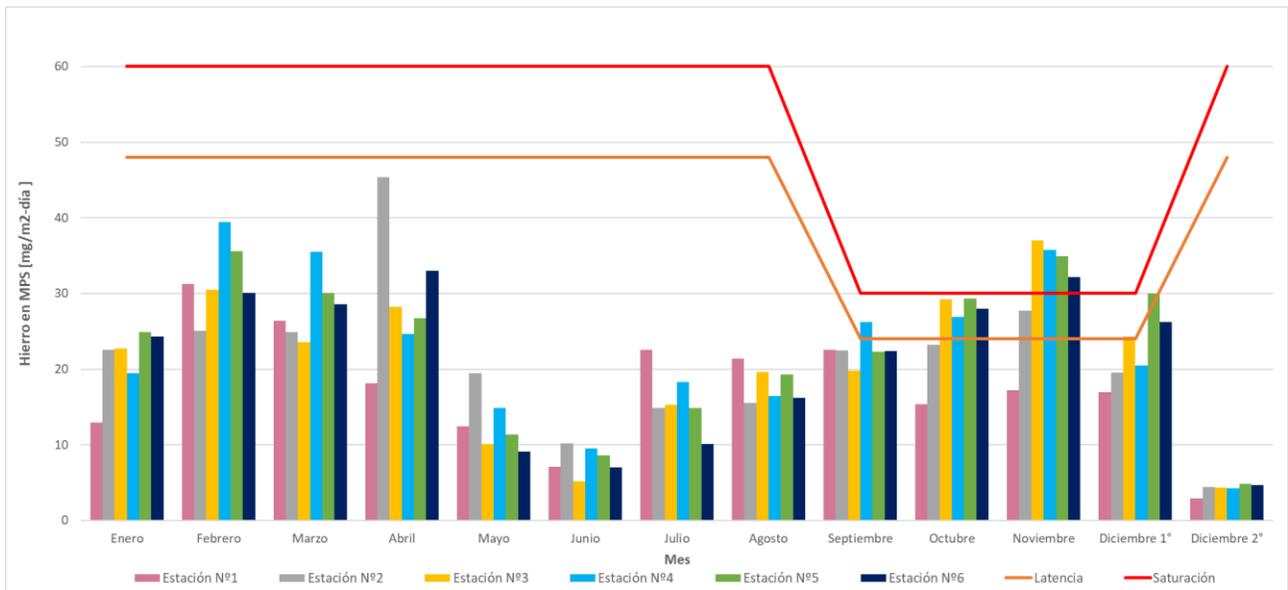
Fuente: Elaboración propia



Nota: El mes de diciembre se desgrega en quincenas: Diciembre 1° (primera quincena) y Diciembre 2° (segunda quincena).

Figura 4-14 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2017

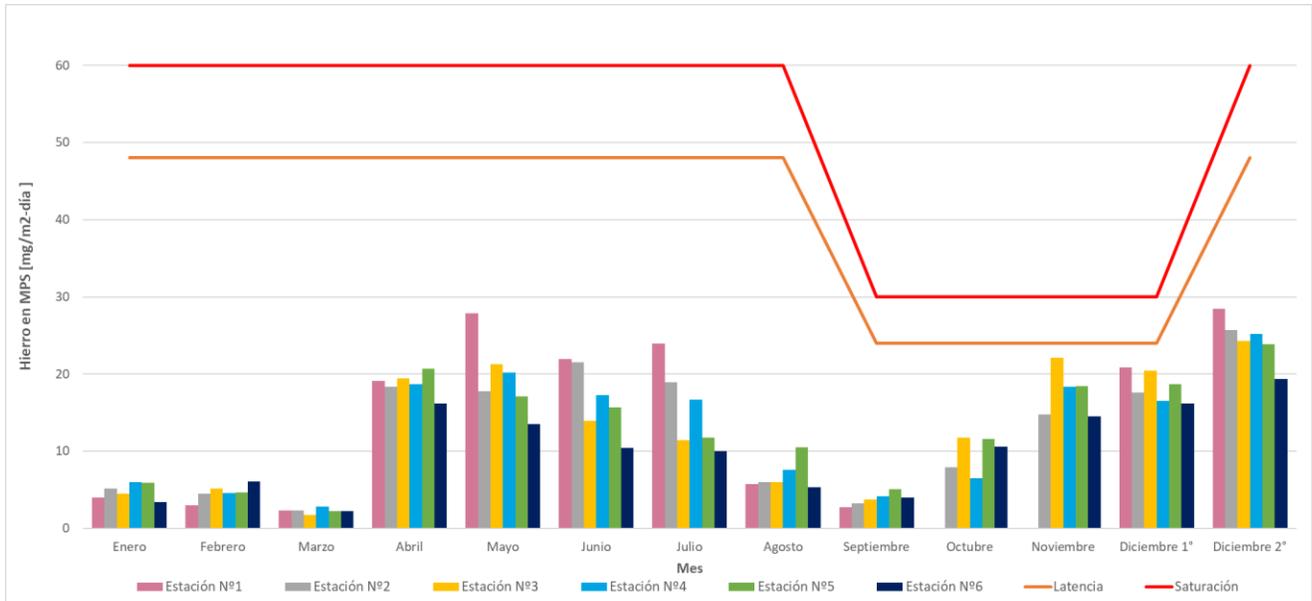
Fuente: Elaboración propia



Nota: El mes de diciembre se desgrega en quincenas: Diciembre 1° (primera quincena) y Diciembre 2° (segunda quincena).

Figura 4-15 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2018

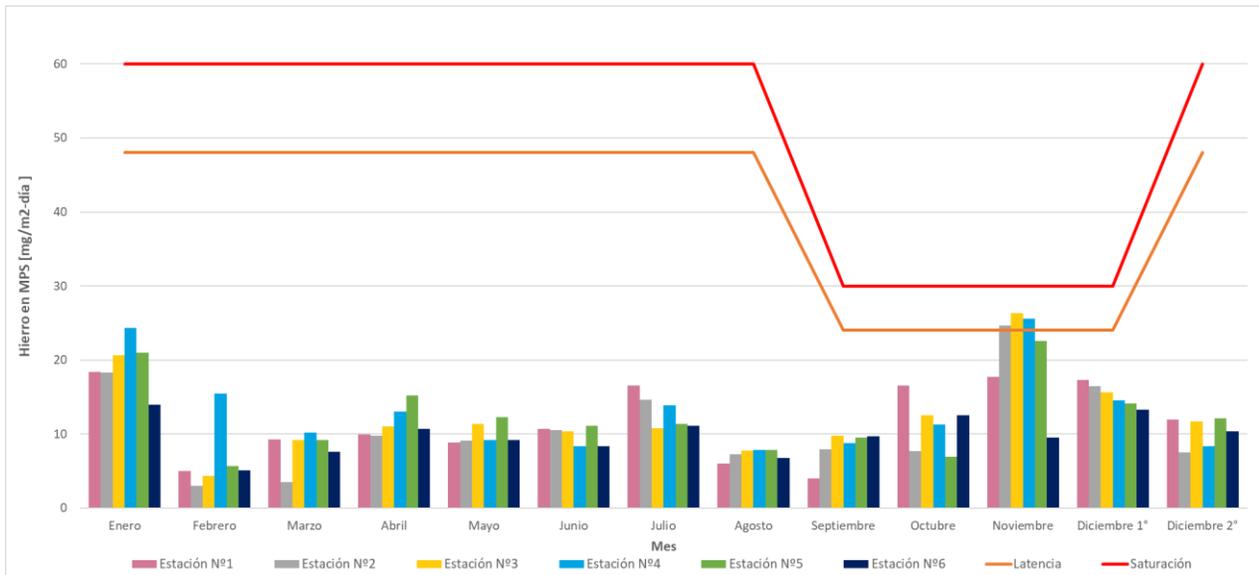
Fuente: Elaboración propia



Nota: El mes de diciembre se desagrega en quincenas: Diciembre 1° (primera quincena) y Diciembre 2° (segunda quincena).

Figura 4-16 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2019

Fuente: Elaboración propia



Nota: El mes de diciembre se desagrega en quincenas: Diciembre 1° (primera quincena) y Diciembre 2° (segunda quincena).

Figura 4-17 Evaluación norma mensual hierro en MPS, año 2020

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, respecto a la norma anual, la Tabla 4-5 junto con la Figura 4-18, y la Tabla 4-6 junto con la Figura 4-19, presentan el promedio anual de las concentraciones de MPS y hierro

contenido en MPS, respectivamente, para el periodo comprendido entre 2016 y 2020 por cada estación. Se puede observar que el año 2016 y 2017 se superó la normativa de MPS en las estaciones 5 y 4, respectivamente. Posterior a estos años se cumple con el máximo establecido en todas las estaciones, sin embargo, en las estaciones 2, 4 y 5 se supera la latencia en algunos años, a excepción del 2019, en donde se registraron los promedios más bajos. En cuanto al hierro contenido en MPS, en ningún año se supera el máximo legal, y se observa una clara tendencia a la baja.

Tabla 4-5 Promedio anual de las concentraciones de MPS, periodo 2016-2020

Año	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
2016	75,62	92,22	77,88	91,83	104,75	89,32
2017	73,94	86,35	85,11	105,09	96,88	82,63
2018	64,19	85,10	79,12	97,00	94,45	82,02
2019	60,01	76,68	58,18	69,42	77,76	69,40
2020	72,97	81,97	59,41	82,72	71,78	77,65

Fuente: Elaboración propia

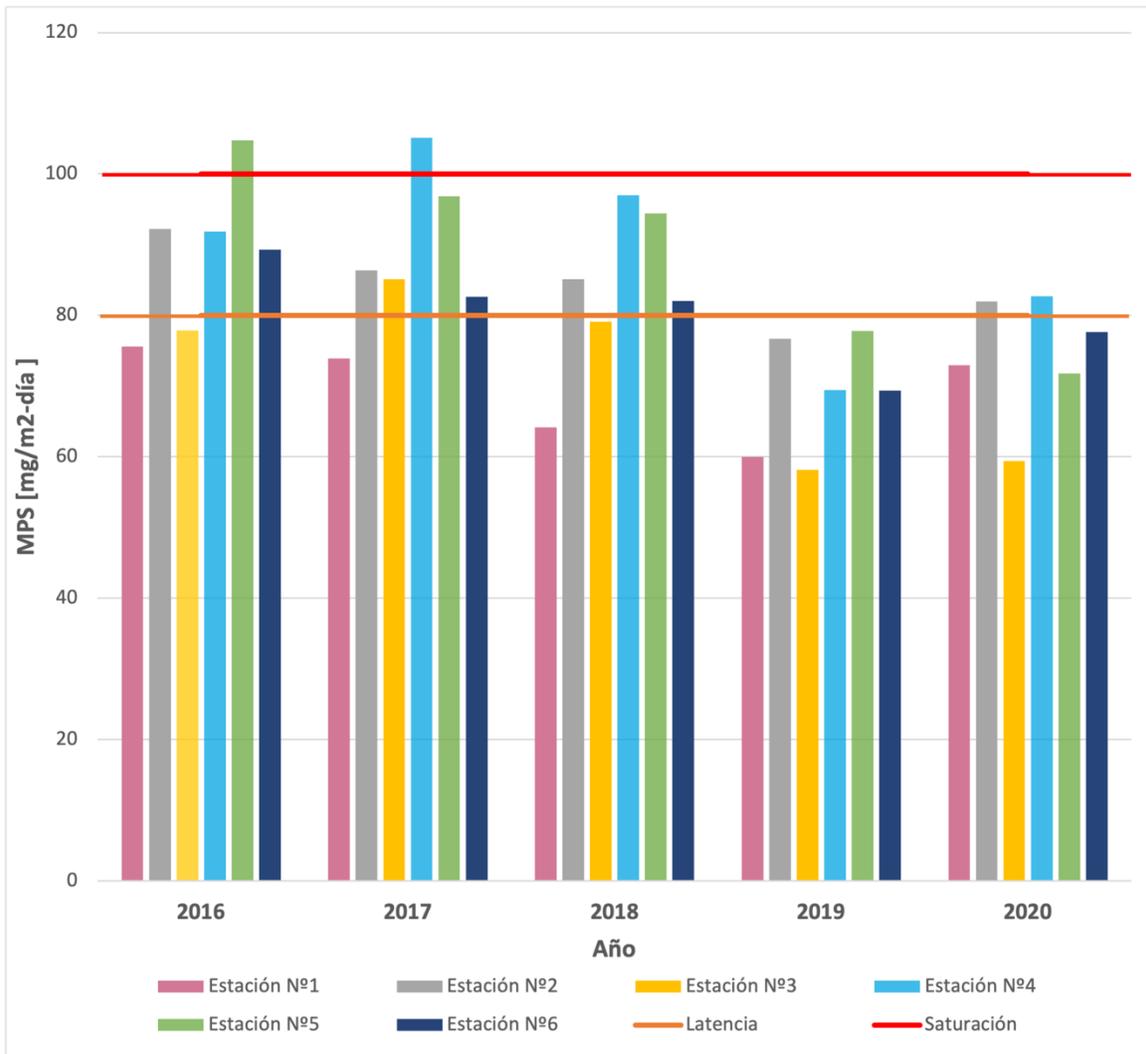


Figura 4-18 Evaluación norma anual de MPS, periodo 2016-2020

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-6 Promedio anual de las concentraciones de hierro en MPS, periodo 2016-2020

Año	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
2016	22,09	20,65	22,27	22,07	24,20	20,56
2017	23,98	22,87	24,95	26,43	26,70	22,16
2018	17,50	21,18	20,76	22,46	22,53	20,92
2019	14,55	12,60	12,75	12,65	12,79	10,15
2020	11,70	10,79	12,41	13,13	12,22	9,84

Fuente: Elaboración propia



Figura 4-19 Evaluación norma anual de hierro contenido en MPS, periodo 2016-2020

Fuente: Elaboración propia

En las secciones siguientes se analiza el comportamiento de las concentraciones históricas de MPS y su contenido de hierro en cada una de las estaciones de monitoreo mencionadas.

4.1.2.2 Estación N°1

En primer lugar, respecto a la estación N°1, en la Figura 4-20 se presenta la evolución de la concentración de MPS y en la Figura 4-21 la concentración de hierro en MPS. Se puede observar que no existe una tendencia clara en las concentraciones de MPS durante la serie temporal, aunque, en general, a partir del año 2008 la tendencia es principalmente a la baja. Se presentan concentraciones medianas en el rango de 47 a 108 mg/m²-día, donde el límite inferior describe los datos del año 2019, mientras que el superior corresponde al 2007. Si bien las concentraciones máximas tampoco reflejan una tendencia sostenida en el tiempo, se observa que los valores van desde 81 mg/m²-día en el año 2014, a 197 mg/m²-día en el año 2020, por lo que el último año

para el que se disponen datos presentó la mayor concentración de MPS del periodo, a pesar de que la concentración mediana reportada es baja en comparación al resto de los años. Esta concentración máxima supera el límite de 150 mg/m²-día establecido en la norma secundaria de calidad vigente en la cuenca.

Al comparar ambos tipos de mediciones de la estación N°1, es posible notar que el contenido de hierro en MPS tiene un comportamiento histórico similar, y las concentraciones medianas tienen valores entre 9 (año 2014) y 35 mg/m²-día (año 2005). La concentración máxima de la serie corresponde a 53,6 mg/m²-día y es medida en el mes de marzo del año 2007, por lo tanto, supera el máximo de 30 mg/m²-día normado.

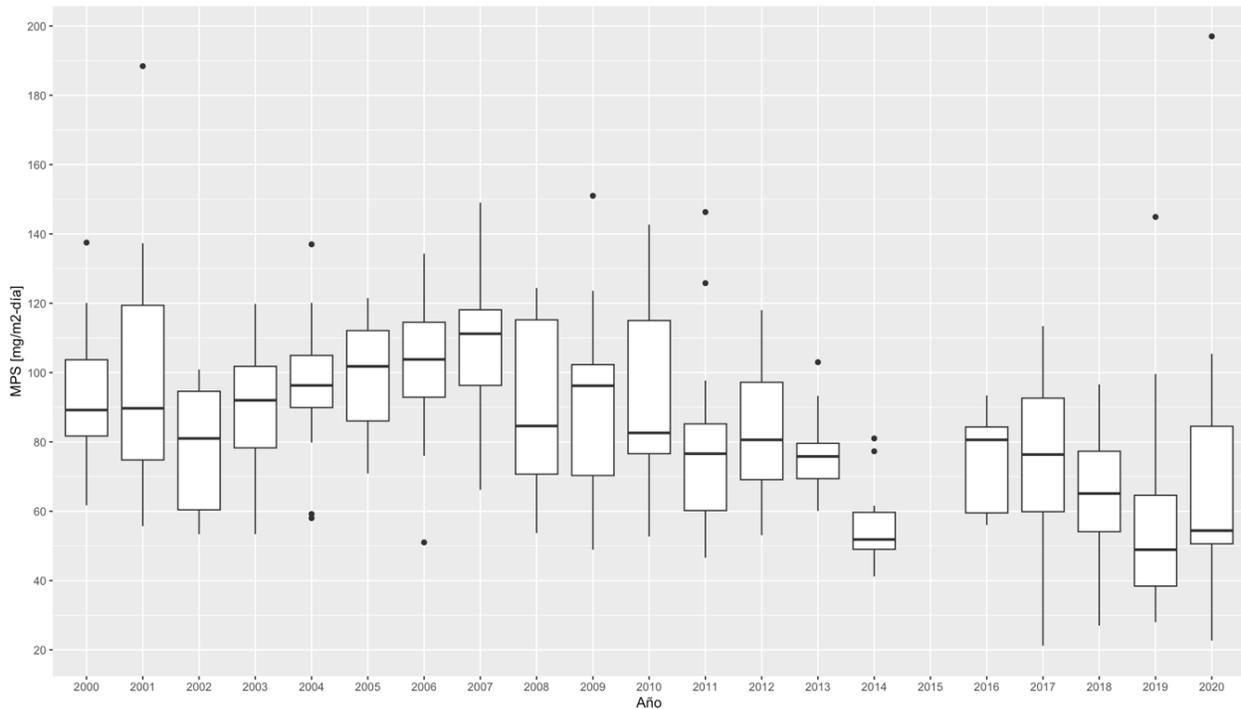


Figura 4-20 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°1

Fuente: Elaboración propia

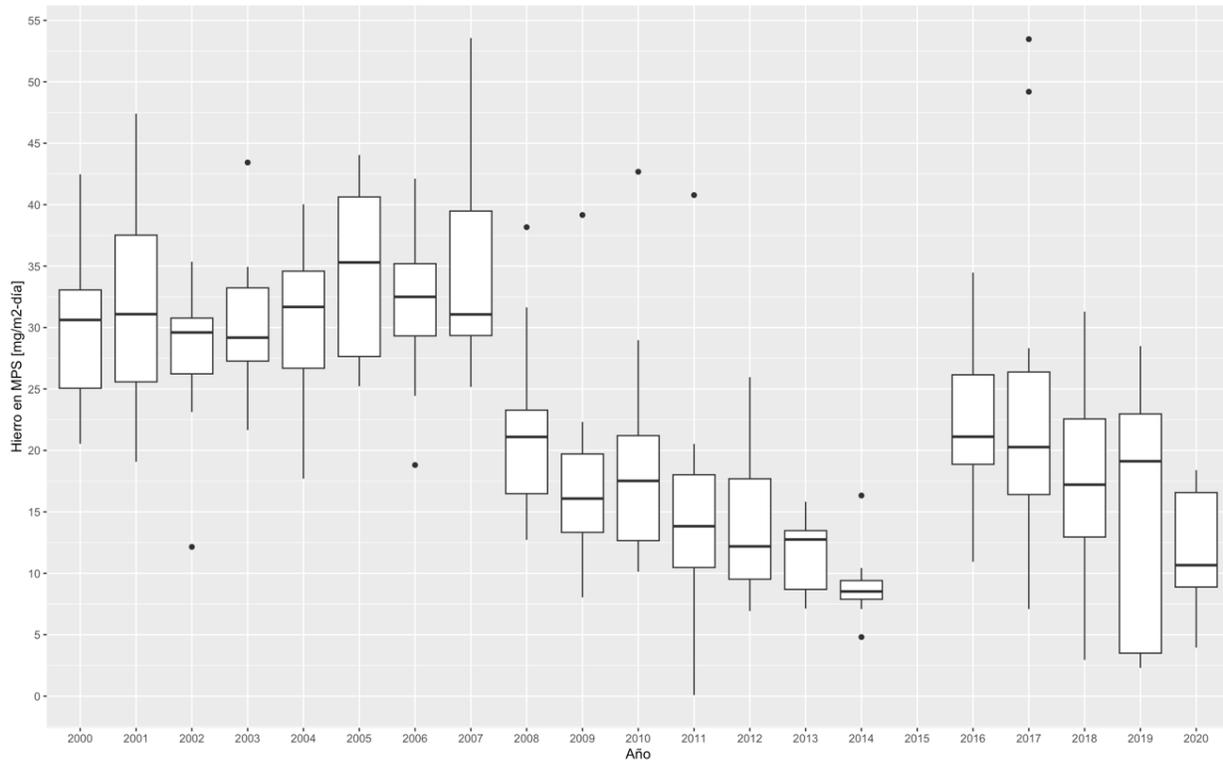


Figura 4-21 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-7 y Tabla 4-8 se resumen los estadígrafos de las concentraciones de MPS y hierro en MPS, respectivamente. Al comparar la concentración media anual de MPS con el límite anual de 100 mg/m²-día, se puede notar que este es superado en el año 2007. En el caso de hierro en MPS, el máximo anual de 30 mg/m²-día es incumplido en seis años, siendo la mayor superación en el año 2007.

Tabla 4-7 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°1

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	137,5	106,8	88,9	92,6	79,4	61,7
2001	188,4	112,0	83,5	97,4	73,3	55,7
2002	100,9	93,3	81,4	78,2	60,1	53,4
2003	119,8	99,5	90,8	87,4	76,3	53,4
2004	137,0	107,0	93,4	93,5	86,6	58,0
2005	121,5	112,1	101,8	99,9	86,1	70,9
2006	134,3	112,8	103,8	99,4	89,0	51,0
2007	149,0	118,9	108,3	108,8	100,1	66,2
2008	124,4	115,2	83,9	89,8	69,5	53,7
2009	151,0	98,0	91,8	86,8	69,2	48,9
2010	142,7	103,1	82,1	91,1	76,1	52,7
2011	146,3	88,3	75,1	80,4	58,9	46,6
2012	118,0	93,0	79,5	80,4	66,5	53,1
2013	103,0	81,1	76,5	77,3	70,5	60,1
2014	81,0	59,7	51,9	56,0	49,0	41,2
2015	-	-	-	-	-	-
2016	93,4	84,5	80,2	75,0	58,9	56,0
2017	113,4	91,8	67,3	71,8	58,5	21,2
2018	96,6	70,7	63,6	64,4	57,0	27,0
2019	144,9	62,0	46,6	53,8	36,3	28,0
2020	197,0	77,0	53,8	71,1	49,7	22,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-8 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°1

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	42,5	32,3	29,5	28,9	24,9	20,5
2001	47,4	39,3	31,2	32,8	25,1	19,1
2002	35,4	31,1	29,7	28,0	26,0	12,2
2003	43,4	33,6	30,1	30,4	26,7	21,7
2004	40,0	34,6	30,8	30,2	25,8	17,7
2005	44,0	40,6	35,3	34,5	27,6	25,2
2006	42,1	35,8	33,8	32,7	29,8	18,8
2007	53,6	40,7	33,5	35,6	29,5	25,2
2008	38,2	23,3	21,1	21,6	16,5	12,7
2009	39,2	19,8	16,6	16,3	13,5	8,0
2010	42,7	21,4	16,7	18,4	12,4	10,1
2011	40,8	18,1	13,9	15,5	10,3	5,5
2012	26,0	17,1	12,9	13,5	9,2	6,9
2013	15,8	13,5	12,8	11,8	8,7	7,7
2014	16,3	9,4	8,5	9,0	7,9	4,8
2015	-	-	-	-	-	-
2016	34,5	26,2	21,1	22,0	17,9	10,9
2017	53,5	27,0	18,2	22,8	16,3	7,1
2018	31,3	22,6	17,7	18,1	12,8	7,1
2019	28,5	23,5	12,4	13,5	3,3	2,3
2020	18,4	16,5	10,3	11,5	8,2	4,0

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3 Estación N°2

El mismo análisis anterior se realiza para la estación de monitoreo N°2, cuyas concentraciones de MPS se presentan en la Figura 4-22 y las de hierro en MPS en la Figura 4-23. Se puede notar que las mediciones de la estación se traducen en concentraciones medianas de MPS en el rango de 59 a 92 mg/m²-día, más acotado que en la estación anterior. En cuanto a los valores máximos, se observa un comportamiento fuera de lo común el año 2001, en donde la concentración máxima es de 255 mg/m²-día, medida en el mes de febrero. Respecto al contenido de hierro, los valores máximos no superan los 46 mg/m²-día correspondientes a la primera quincena de diciembre del año 2017, medición que incumple el límite normado.

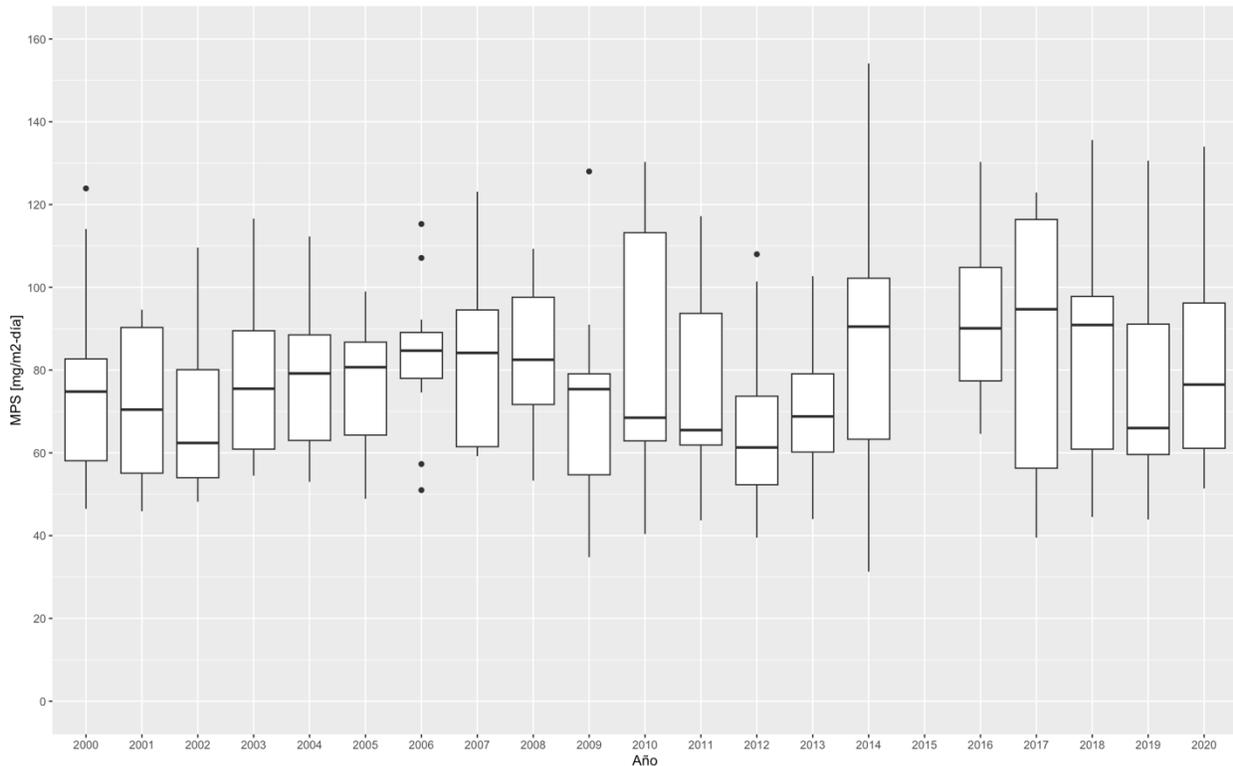


Figura 4-22 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°2

Fuente: Elaboración propia

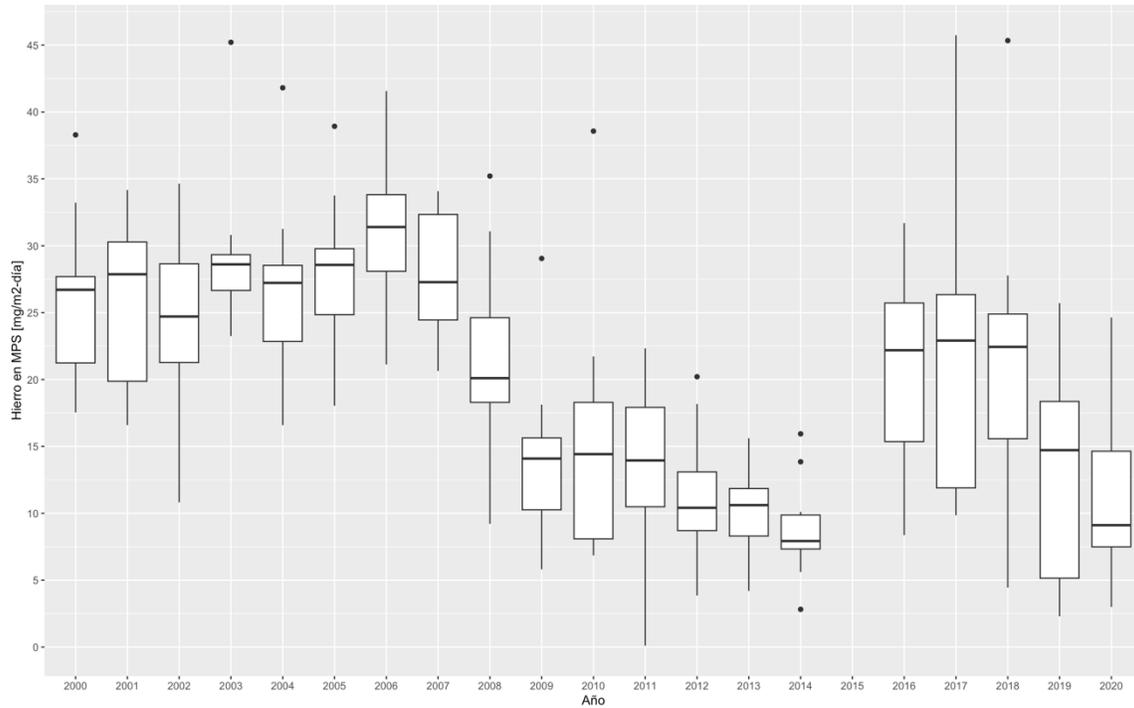


Figura 4-23 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°2

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-9 y Tabla 4-10 se presenta el detalle de los estadígrafos de las concentraciones medidas, donde se observa que las concentraciones medias anuales de MPS y de hierro en MPS no superan la normativa vigente.

Tabla 4-9 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°2

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	123,9	86,0	70,2	73,2	55,8	46,5
2001	255,2	92,2	70,5	85,9	55,1	45,9
2002	109,6	79,0	60,3	67,5	53,2	48,2
2003	116,6	86,0	75,3	76,8	60,4	54,5
2004	112,3	85,0	78,5	77,0	61,1	53,0
2005	99,0	86,8	80,7	76,4	64,3	48,9
2006	115,3	87,9	84,4	82,3	77,2	51,0
2007	125,5	94,5	84,2	81,6	61,5	59,2
2008	109,3	98,0	81,5	80,9	68,6	53,3
2009	128,0	78,0	75,3	70,6	54,3	34,8
2010	130,3	103,5	66,8	78,5	59,0	40,4
2011	117,2	89,6	67,9	73,0	64,2	43,7
2012	108,0	72,3	58,8	62,5	50,4	39,5
2013	102,7	82,0	70,6	72,2	59,4	47,5
2014	154,1	102,2	90,5	88,4	63,3	31,3
2015	-	-	-	-	-	-
2016	130,3	105,0	87,6	90,6	77,4	64,6
2017	122,9	110,7	90,0	84,5	55,6	39,5
2018	135,6	98,4	91,9	83,8	60,5	44,5
2019	130,6	74,7	65,3	72,4	58,6	43,9
2020	134,0	97,9	76,1	80,2	60,0	51,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-10 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°2

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	38,3	27,6	25,6	25,1	21,0	17,5
2001	34,2	30,4	25,6	25,0	19,7	16,6
2002	34,6	29,4	25,0	24,7	20,6	10,8
2003	45,2	29,1	28,4	29,1	26,6	23,3
2004	41,8	28,5	27,2	26,6	22,8	16,6
2005	38,9	29,8	28,6	27,9	24,9	18,0
2006	41,6	33,9	31,0	30,2	26,9	21,1
2007	34,1	32,3	27,3	27,9	24,5	20,6
2008	35,2	24,6	20,1	21,4	18,3	9,2
2009	29,1	16,1	14,7	13,3	10,1	5,8
2010	38,6	18,0	13,5	15,1	8,0	6,9
2011	22,3	18,2	13,1	14,1	10,4	7,7
2012	20,2	13,2	10,4	10,5	8,2	3,9
2013	15,6	12,0	10,9	10,6	9,1	6,3
2014	15,9	9,9	7,9	8,7	7,3	2,8
2015	-	-	-	-	-	-
2016	31,7	26,0	20,6	20,1	14,6	8,4
2017	45,7	27,5	21,4	21,9	11,9	9,9
2018	45,3	24,9	22,5	21,9	15,4	10,2
2019	21,7	18,5	11,3	11,8	5,0	2,3
2020	24,6	12,6	9,5	10,7	7,6	3,0

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.4 Estación N°3

En la misma línea, las siguientes figuras presentan la evolución de las concentraciones de MPS y contenido de hierro en la estación N°3. En este caso, las concentraciones medianas de cada año siguen una tendencia más bien a la baja, con un rango entre 50 y 128 mg/m²-día, mientras que la concentración máxima es de 205 mg/m²-día y se midió en el mes de diciembre de 2010, superando el máximo mensual normado. Además, se observa que el contenido de hierro en MPS posee medianas entre 11 y 31 mg/m²-día, y un valor máximo de toda la serie temporal correspondiente al año 2011.

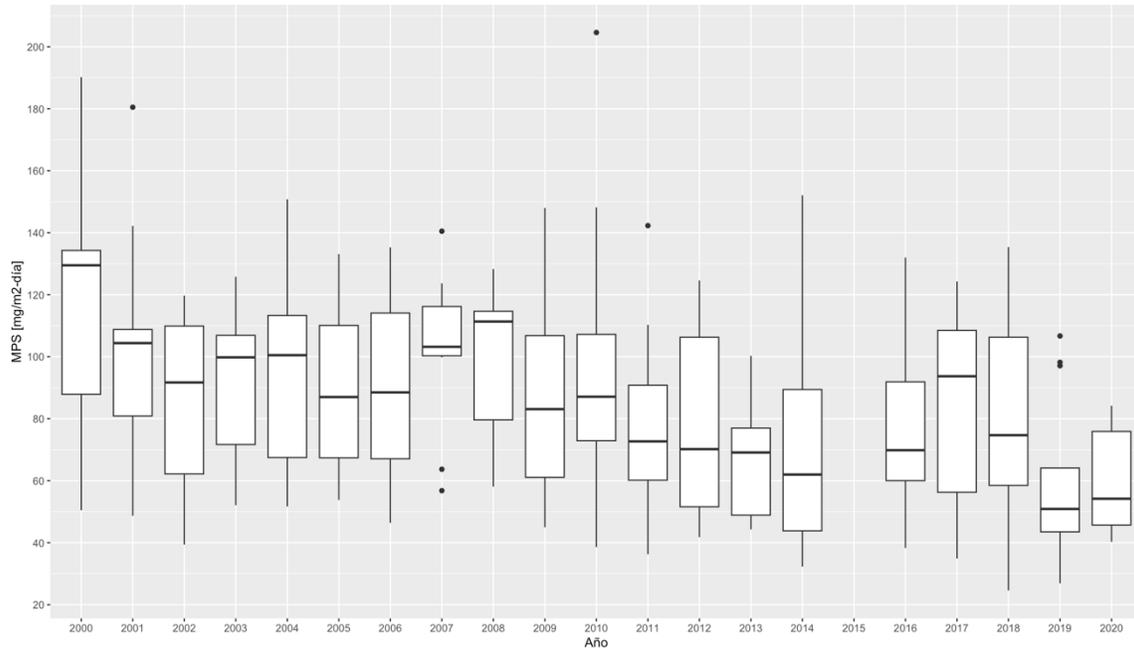


Figura 4-24 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°3
Fuente: Elaboración propia

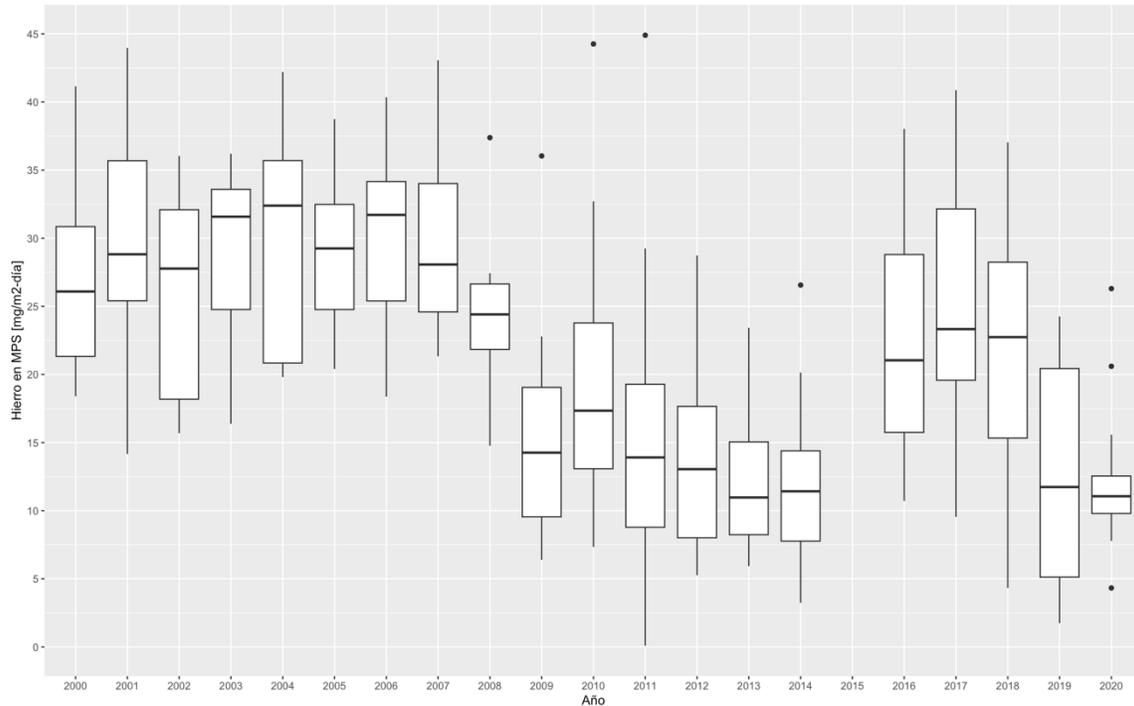


Figura 4-25 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°3

Fuente: Elaboración propia

Para un mayor detalle de la información anteriormente mencionada, en la Tabla 4-11 y Tabla 4-12 se resumen los estadígrafos utilizados para la elaboración de los gráficos. En la primera, es posible notar que la máxima media anual está asociada a las concentraciones medidas durante el año 2000 y tiene un valor de 118 mg/m²-día, por lo que no cumple con la normativa. Respecto a la segunda tabla, se observa una media anual máxima de 31 mg/m²-día correspondiente al año 2007, superando levemente el límite de hierro en MPS.

Tabla 4-11 Estadígrafos concentraciones de MPS [$\text{mg}/\text{m}^2\text{-día}$] en estación N°3

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	190,2	140,3	128,2	118,1	83,9	50,5
2001	180,5	112,3	103,6	101,9	79,1	48,7
2002	119,7	110,0	90,6	83,4	58,5	39,4
2003	125,8	106,5	97,9	89,8	69,7	52,1
2004	150,8	113,7	99,3	95,8	67,3	51,7
2005	133,1	105,1	83,7	87,3	67,3	53,8
2006	135,3	114,2	88,0	88,0	67,1	46,4
2007	140,5	111,6	103,9	102,3	100,2	56,8
2008	128,3	115,1	110,3	98,1	79,2	58,1
2009	127,4	96,6	82,0	82,5	58,6	45,0
2010	204,6	112,3	83,6	91,4	72,1	38,6
2011	142,3	90,8	72,7	76,1	60,2	36,3
2012	124,6	85,7	65,1	72,3	51,3	41,8
2013	100,3	78,7	67,5	66,1	48,4	44,3
2014	152,1	89,4	62,0	69,4	43,8	32,3
2015	-	-	-	-	-	-
2016	132,0	83,2	65,8	74,5	59,3	38,3
2017	124,3	109,7	84,6	83,3	54,7	34,9
2018	135,4	99,4	78,5	78,9	58,7	24,6
2019	106,7	58,7	49,8	54,5	41,3	26,9
2020	84,2	70,1	55,5	58,7	45,4	40,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-12 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [$\text{mg}/\text{m}^2\text{-día}$] en estación N°3

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	41,2	31,6	26,2	27,3	21,3	18,4
2001	44,0	36,1	28,5	29,1	24,1	14,2
2002	36,0	31,0	23,3	24,4	18,0	15,7
2003	36,2	33,2	31,1	28,5	24,4	16,4
2004	42,2	36,8	30,1	30,1	20,8	19,8
2005	38,8	32,7	29,0	28,7	24,2	20,4
2006	40,4	33,9	31,4	30,1	25,4	18,4
2007	43,1	35,6	30,6	31,0	24,5	21,5
2008	37,4	26,6	24,4	24,5	21,8	14,8
2009	36,0	19,1	14,8	14,8	9,3	6,4
2010	44,3	21,7	16,5	19,4	12,7	7,3
2011	44,9	19,3	13,9	16,2	8,8	0,1
2012	28,7	17,6	11,5	13,3	7,9	5,3
2013	23,4	15,1	11,0	11,8	8,2	5,9
2014	26,6	14,4	11,4	12,2	7,8	3,2
2015	-	-	-	-	-	-
2016	38,0	27,5	20,9	21,3	15,4	10,7
2017	40,9	29,3	22,9	24,0	18,5	9,6
2018	37,0	28,5	21,3	21,3	15,1	5,2
2019	24,3	19,9	11,6	11,9	5,0	1,8
2020	26,3	12,8	10,9	12,3	9,6	4,3

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.5 Estación N°4

Por otro lado, de la estación N°4 se cuenta con mediciones cuyas concentraciones medianas de MPS en todo el horizonte temporal van desde 61 a 99 mg/m²-día, y de hierro en MPS van desde 10 a 33 mg/m²-día. Lo anterior se puede observar a partir de la Figura 4-26 y Figura 4-27, junto con los estadígrafos de las mediciones de esta estación que se presentan en la Tabla 4-13 y Tabla 4-14. Además, a partir de las concentraciones máximas de MPS se puede notar que los años 2010 y 2017 fueron años en los que se superó la normativa mensual, debido a que se reportan valores máximos de 185 y 176 mg/m²-día, respectivamente. Analizando la media anual, se observa que el año 2010 se supera levemente el límite máximo para MPS, y el de hierro en MPS en los años 2003, 2006 y 2007.

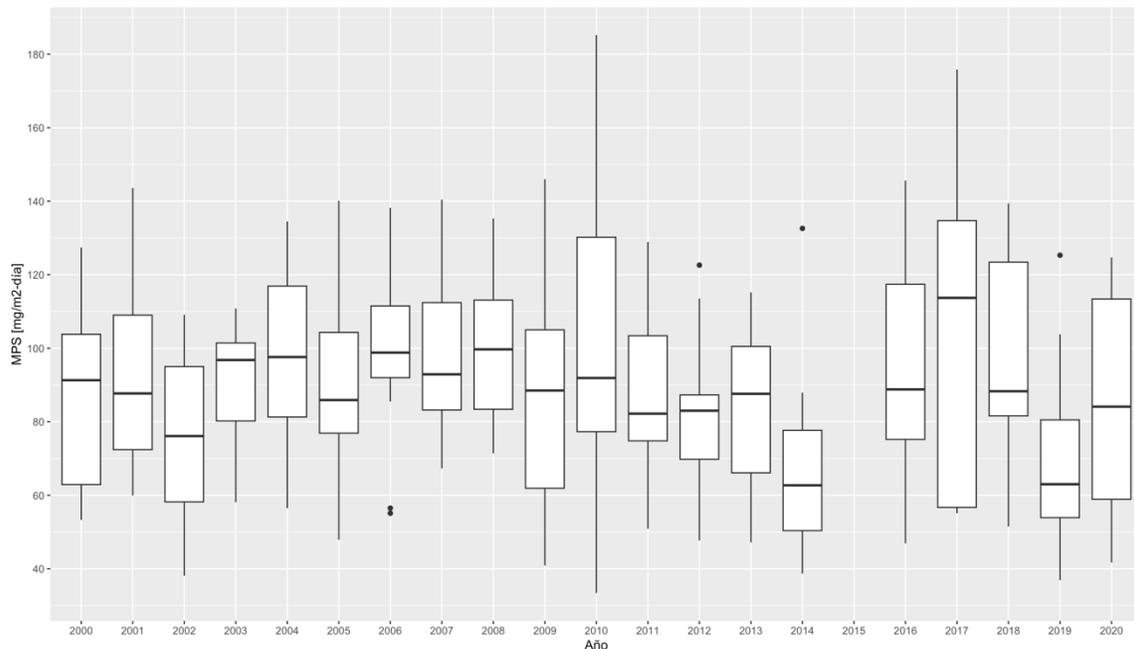


Figura 4-26 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°4

Fuente: Elaboración propia

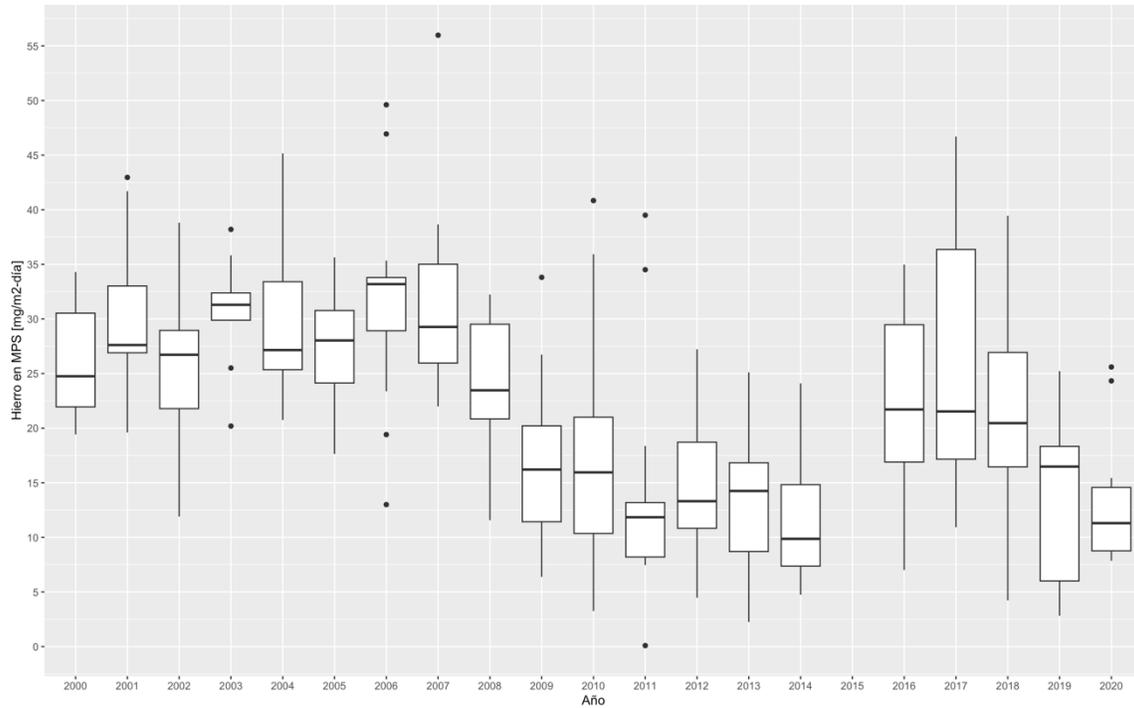


Figura 4-27 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-13 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°4

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	127,4	103,9	90,0	85,4	60,8	53,3
2001	143,6	103,8	83,7	90,3	71,1	59,9
2002	109,1	95,3	75,5	74,9	55,7	38,1
2003	110,8	101,1	97,8	90,3	80,1	58,1
2004	134,5	116,3	99,0	95,5	78,8	56,5
2005	140,1	102,0	84,4	87,9	75,5	47,9
2006	138,2	111,4	96,1	97,0	90,4	55,1
2007	140,4	112,6	91,0	95,5	81,0	67,3
2008	135,3	104,0	95,6	95,5	82,0	71,4
2009	146,0	102,0	86,9	87,7	61,4	40,9
2010	185,2	132,3	88,7	96,8	73,9	33,4
2011	128,9	101,5	81,5	89,3	74,7	50,9
2012	122,6	86,9	79,3	79,2	67,2	47,7
2013	115,2	101,0	81,3	83,8	72,0	47,2
2014	132,6	77,7	62,7	67,6	50,4	38,7
2015	-	-	-	-	-	-
2016	145,6	97,1	88,0	87,9	72,5	46,9
2017	175,8	136,3	113,5	104,6	56,7	55,1
2018	139,4	124,0	87,6	97,8	82,3	55,7
2019	125,3	71,3	60,8	65,7	53,9	36,9
2020	124,7	113,8	84,3	82,6	57,5	41,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-14 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [$\text{mg}/\text{m}^2\text{-día}$] en estación N°4

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	34,3	30,1	24,8	25,8	21,5	19,4
2001	43,0	33,2	28,3	29,9	26,0	19,6
2002	38,8	29,0	26,2	24,8	21,3	11,9
2003	38,2	32,8	31,2	30,8	29,9	20,2
2004	45,2	33,7	27,3	29,6	25,2	20,8
2005	35,6	31,0	27,5	27,6	24,1	17,6
2006	49,6	34,2	32,7	31,8	28,5	13,0
2007	56,0	35,0	29,7	31,7	26,5	22,0
2008	32,2	29,5	23,5	24,0	20,8	11,6
2009	33,8	20,6	16,3	16,0	11,0	6,4
2010	40,8	21,8	15,5	17,9	10,3	3,3
2011	39,5	14,5	11,8	15,1	8,2	6,0
2012	27,2	18,8	12,7	13,4	10,3	4,5
2013	25,1	17,6	14,4	14,1	9,7	2,3
2014	24,1	14,8	9,9	11,3	7,4	4,8
2015	-	-	-	-	-	-
2016	35,0	27,8	21,1	21,1	15,7	7,0
2017	46,7	35,9	24,3	26,2	16,7	10,9
2018	39,5	29,1	22,0	23,3	16,1	9,6
2019	25,2	18,4	12,1	12,0	5,6	2,8
2020	25,6	14,2	11,4	13,3	9,1	7,9

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.6 Estación N°5

En la estación N°5, como en las ya analizadas, se observa a partir de 2008 una tendencia a la baja, tendencia que se repite luego a partir de 2016. En particular, el año 2000 presenta un comportamiento distinto a la mayoría restante de la serie temporal, ya que tanto la concentración mediana como el valor máximo es mayor a los otros años; similar ocurre con el año 2008. Para mayor información sobre los valores graficados, en la Tabla 4-15 y Tabla 4-16 se presentan los estadígrafos, en donde se puede notar que el límite anual normado para hierro en MPS se mantiene en un rango permisible, mientras que el de MPS se supera en algunos años.

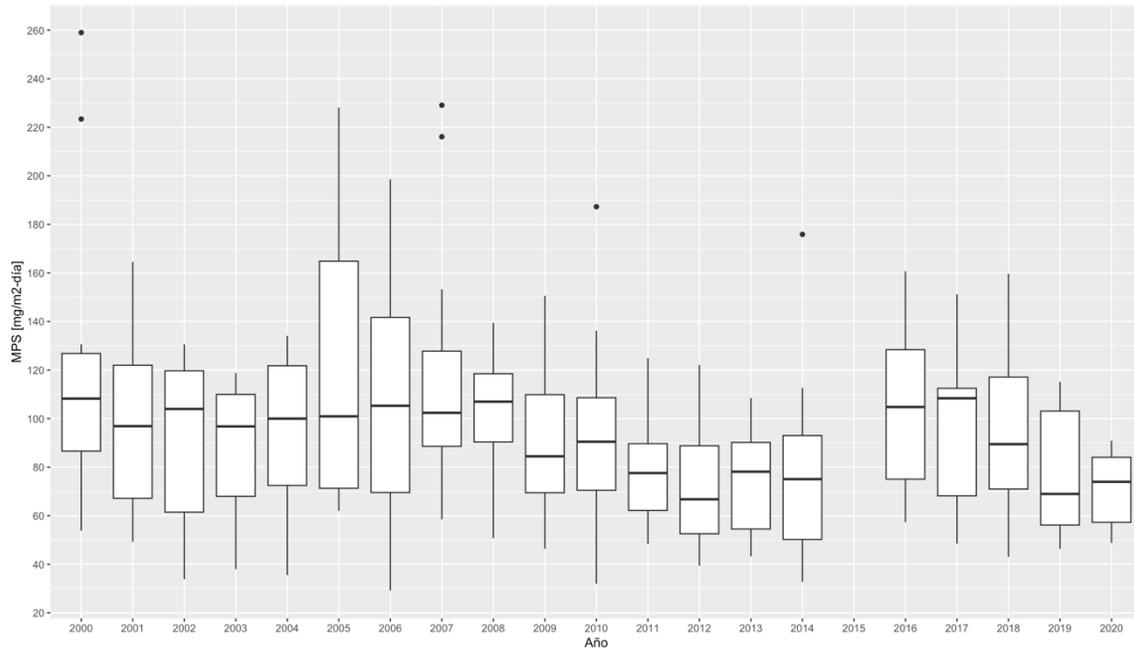


Figura 4-28 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°5
Fuente: Elaboración propia

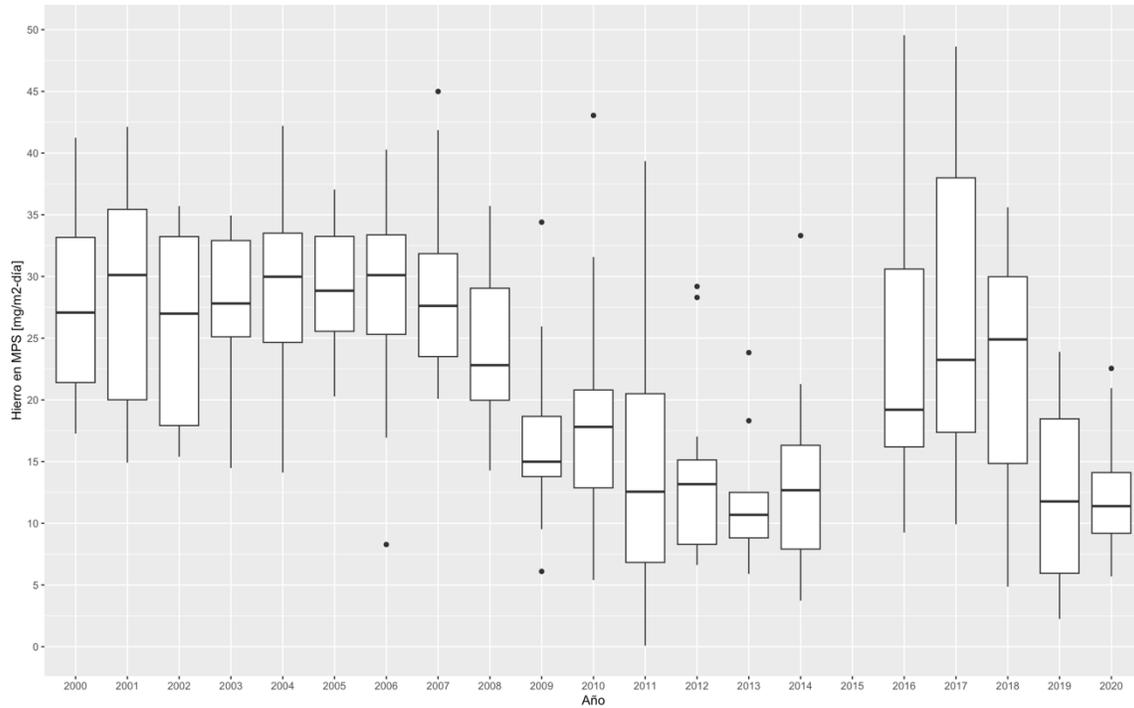


Figura 4-29 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-15 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°5

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	259,0	128,1	106,9	122,3	83,6	53,9
2001	164,6	118,1	90,4	95,9	66,3	49,3
2002	130,6	116,6	99,3	87,5	56,3	33,9
2003	118,8	107,4	92,6	86,5	67,9	38,0
2004	134,1	121,4	101,0	96,8	71,8	35,6
2005	228,1	135,6	95,6	110,1	69,7	62,0
2006	198,6	135,2	102,9	100,5	67,3	29,2
2007	229,1	131,2	98,4	117,2	87,6	58,5
2008	139,4	116,2	104,4	100,2	85,5	50,8
2009	150,6	101,0	84,4	87,0	68,7	46,4
2010	187,3	112,5	90,3	90,1	68,7	32,0
2011	124,9	86,3	80,6	79,7	60,7	48,4
2012	122,1	86,3	66,7	70,8	52,0	39,4
2013	108,5	92,8	73,5	74,8	54,1	43,3
2014	175,9	93,1	75,1	78,9	50,3	32,8
2015	-	-	-	-	-	-
2016	160,7	127,2	94,8	100,2	74,7	57,3
2017	151,2	116,1	103,3	96,9	66,1	48,5
2018	159,6	109,5	94,5	93,4	68,6	43,1
2019	115,2	102,5	68,6	75,7	56,1	46,4
2020	90,9	84,8	75,6	71,6	57,0	48,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-16 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [$\text{mg}/\text{m}^2\text{-día}$] en estación N°5

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	41,2	32,1	25,9	27,9	21,2	17,3
2001	42,1	36,2	28,4	28,1	19,7	14,9
2002	35,7	31,7	23,0	24,7	17,7	15,4
2003	34,9	33,1	28,3	27,8	26,3	14,5
2004	42,2	34,9	29,6	29,8	24,2	14,1
2005	37,1	33,2	28,4	29,1	25,4	20,3
2006	40,3	33,4	30,0	27,7	24,2	8,3
2007	45,0	34,2	27,4	29,9	23,5	20,1
2008	35,7	29,1	22,8	23,9	20,0	14,3
2009	34,4	19,1	14,7	15,8	13,3	6,1
2010	43,1	20,9	17,6	18,5	12,3	5,4
2011	39,4	20,6	12,6	15,8	6,7	5,3
2012	29,2	14,7	13,0	13,5	8,3	6,6
2013	23,8	12,1	10,4	11,5	8,7	5,9
2014	33,3	16,3	12,7	13,7	7,9	3,7
2015	-	-	-	-	-	-
2016	49,6	26,0	18,6	22,2	15,5	9,3
2017	48,6	35,2	23,1	26,1	16,5	9,9
2018	35,6	29,5	23,6	23,0	16,8	8,6
2019	23,9	17,4	11,7	12,1	5,7	2,3
2020	22,6	13,6	11,3	12,1	8,9	5,7

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.7 Estación N°6

Por último, como se muestra en las siguientes figuras, la estación N°6 presenta concentraciones de MPS con una tendencia poco marcada a lo largo de los años, mientras que el contenido de hierro refleja claramente una tendencia a la baja a partir de 2007, en 2016 vuelve a aumentar y los siguientes años disminuye. El valor máximo de MPS es de $226 \text{ mg}/\text{m}^2\text{-día}$ y corresponde al año 2020, específicamente en noviembre, mes cuyas mediciones generalmente entregan concentraciones altas, superando ampliamente el máximo permisible mensual. Los estadígrafos de las concentraciones de la estación en cuestión se resumen en Tabla 4-17 y Tabla 4-18, donde se observa que tanto las concentraciones medias anuales de MPS como las de hierro en MPS cumplen con la normativa.

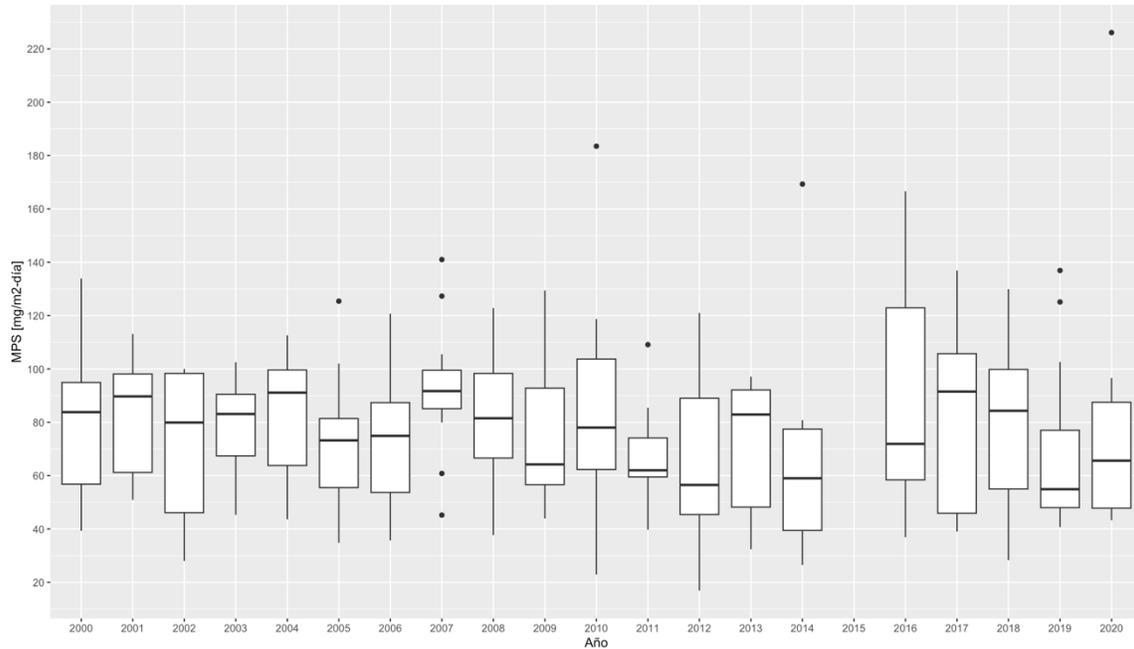


Figura 4-30 Concentraciones de MPS en estación de monitoreo N°6
Fuente: Elaboración propia

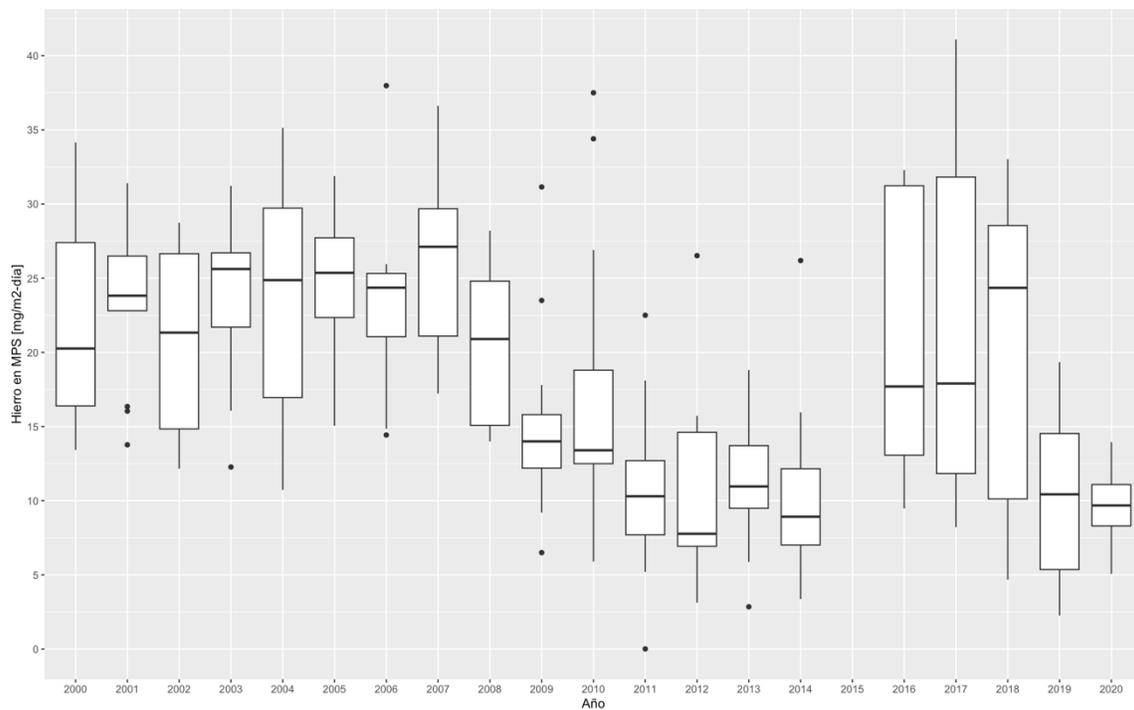


Figura 4-31 Concentraciones de hierro en MPS en estación de monitoreo N°6
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-17 Estadígrafos concentraciones de MPS [mg/m²-día] en estación N°6

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	133,9	97,7	83,0	81,4	56,3	39,3
2001	113,1	99,5	84,3	81,4	59,9	50,9
2002	100,0	86,4	72,6	67,4	43,0	28,0
2003	102,5	90,4	80,7	76,8	67,0	45,3
2004	112,6	100,3	86,8	80,0	61,6	43,6
2005	125,4	81,0	68,5	67,7	53,7	34,8
2006	120,7	89,5	72,3	72,5	53,7	35,7
2007	141,0	100,4	93,0	92,6	83,8	45,2
2008	122,8	96,7	79,8	79,4	66,2	37,7
2009	129,4	82,7	63,9	73,1	55,8	43,9
2010	183,5	105,3	74,3	80,5	61,9	22,9
2011	109,1	74,2	61,7	64,8	55,3	39,7
2012	121,0	77,0	55,5	63,8	44,5	16,9
2013	97,1	92,3	75,4	69,7	47,3	32,4
2014	169,3	77,5	59,0	65,8	39,5	26,5
2015	-	-	-	-	-	-
2016	166,6	115,1	71,2	86,5	57,2	36,9
2017	136,9	105,8	93,2	81,5	44,8	39,0
2018	129,9	99,6	86,7	81,4	70,4	28,3
2019	136,9	68,8	53,2	64,3	48,0	40,7
2020	226,1	81,8	61,3	77,6	47,6	43,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-18 Estadígrafos concentraciones de hierro en MPS [mg/m²-día] en estación N°6

Año	Máximo	3rd Qu.	Mediana	Media	1st Qu.	Mínimo
2000	34,2	26,7	20,4	21,4	15,8	13,4
2001	31,4	27,1	23,8	23,6	21,2	13,8
2002	28,7	26,5	20,4	20,4	14,4	12,2
2003	31,1	26,6	25,3	23,8	21,6	12,3
2004	35,1	29,0	25,9	23,9	16,8	10,7
2005	31,9	27,0	24,6	24,4	22,2	15,1
2006	38,0	25,1	24,3	23,4	20,2	14,4
2007	36,6	29,8	27,4	26,7	21,0	17,2
2008	28,2	24,8	20,9	20,6	15,1	14,0
2009	31,2	16,3	14,0	14,6	11,9	6,5
2010	37,5	20,4	13,9	16,7	11,7	5,9
2011	22,5	13,7	10,7	11,4	7,5	4,5
2012	26,5	14,2	7,5	10,1	6,9	3,1
2013	18,8	13,9	10,9	11,2	9,0	2,9
2014	26,2	12,2	8,9	10,6	7,0	3,4
2015	-	-	-	-	-	-
2016	32,1	27,1	17,2	19,6	13,1	9,5
2017	41,1	31,7	17,4	21,4	11,4	8,2
2018	33,0	28,9	23,4	21,4	14,1	7,0
2019	19,3	13,8	10,2	9,5	5,0	2,3
2020	14,0	11,3	9,6	9,7	8,1	5,1

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Análisis mensual/anual entre las concentraciones de MPS y las emisiones generadas por las principales fuentes emisoras

Con la intención de relacionar las emisiones de MPS generadas por las principales fuentes emisoras y las concentraciones de MPS medidas en las estaciones de la red de monitoreo de CAP, se utilizó el inventario de emisiones estimado en la Sección 3.6.1 (ver anexo digital “PPAHuasco2-Inventario_Emisiones_Tablas.xlsx” para mayor detalle) y las concentraciones de MPS analizadas en la sección anterior (ver Sección 4.1). La Tabla 4-19 presenta las emisiones anuales de MPS generadas por las principales fuentes emisoras de Huasco.

Tabla 4-19 Emisiones anuales de MPS por instalación, periodo 2017-2020 [t]

Instalación	2017	2018	2019	2020
Planta de Pellets Huasco	618,52	786,94	245,47	375,49
Termoeléctrica Guacolda	309,81	322,92	304,98	307,22
Puerto Las Losas	0,01	0,01	7,61	5,81
Central Térmica Huasco	3,42	4,19	4,62	6,10
Línea Férrea	23,81	23,81	23,81	23,81
Total	955,57	1.137,87	586,49	718,43

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en la Tabla 4-20 se presentan las concentraciones medidas en la red de monitoreo de MPS de CAP, promediadas a nivel anual y por estación. Se observa cómo estas han ido disminuyendo a través de los años, excepto en los últimos años, en donde se aprecia un aumento de un 8% entre los años 2019 y 2020. Se puede notar que, al comparar estas concentraciones con las emisiones presentadas anteriormente, se observa una disminución de las emisiones entre 2017 y 2019, al igual que una disminución de la concentración media anual en el mismo periodo. Además, la gran disminución de emisiones en el año 2019 coincide con la menor concentración media anual registrada el mismo año.

Tabla 4-20 Concentraciones medias anuales medidas por las estaciones de monitoreo de MPS de CAP, periodo 2016-2020

Año	2016	2017	2018	2019	2020
Concentración MPS promedio [mg/m²-día]	88,92	88,52	83,65	68,80	74,42

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la red de monitoreo de MPS de CAP

De forma complementaria a lo anterior, la Figura 4-32 presenta las emisiones versus las concentraciones medias de MPS en la zona de Huasco, para cada año comprendido entre 2017 y 2020, periodo ajustado al inventario de emisiones estimado y a la disponibilidad de datos de concentración. Se puede observar que las disminuciones y aumentos de emisiones y concentraciones coinciden, reflejando la relación existente entre las emisiones generadas por las principales fuentes de Huasco y la calidad del aire.

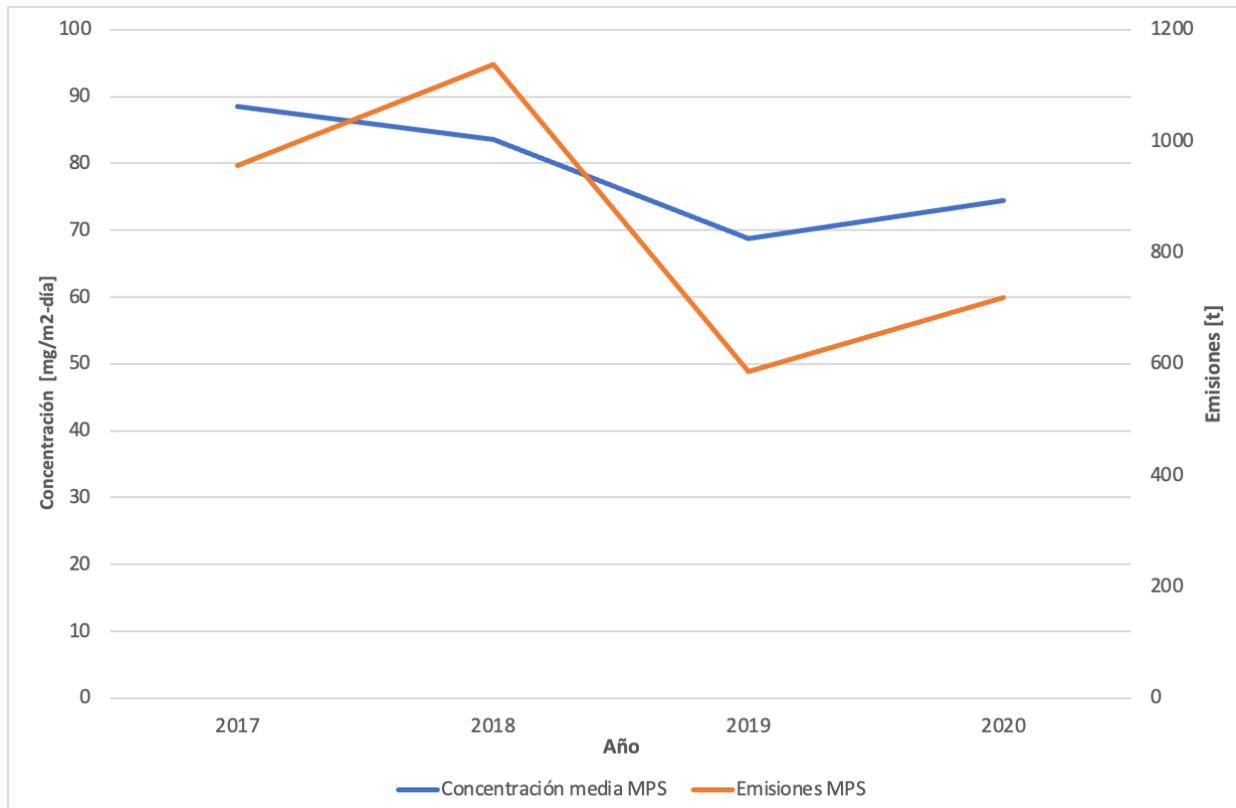


Figura 4-32 Comparación entre emisiones y concentraciones medias de MPS, periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la Tabla 4-21 y, de forma complementaria, la Figura 4-33, presentan las concentraciones mensuales de MPS medidas en la red de monitoreo para el periodo comprendido entre 2016 y 2020, promediadas para las estaciones. En general, se puede observar cierta estacionalidad en los datos, con concentraciones más altas durante los meses de invierno (junio a agosto) y concentraciones más bajas durante los meses de verano (diciembre a febrero). Cabe destacar que, debido a que no se posee un registro de emisiones mensuales de MPS, no es posible evaluar su relación con las concentraciones mensuales medidas.

Tabla 4-21 Concentraciones mensuales medidas por la red de monitoreo de MPS de CAP, periodo 2016-2020 [mg/m²-día]

Mes	2016	2017	2018	2019	2020
Enero	62,35	100,75	82,53	50,32	85,90
Febrero	108,60	124,23	112,20	52,23	70,80
Marzo	76,25	129,45	99,27	52,03	55,10
Abril	95,75	102,95	83,52	58,75	49,72
Mayo	54,88	44,95	50,85	56,20	50,12

Mes	2016	2017	2018	2019	2020
Junio	76,07	48,16	37,20	65,38	48,63
Julio	67,07	55,28	74,65	54,23	74,45
Agosto	86,50	47,63	63,15	57,37	62,40
Septiembre	76,20	63,87	75,17	44,80	64,95
Octubre	108,63	106,23	118,52	75,08	112,48
Noviembre	106,73	114,98	114,50	100,94	125,12
Diciembre	121,72	102,77	87,93	116,73	83,87

Fuente: Elaboración propia

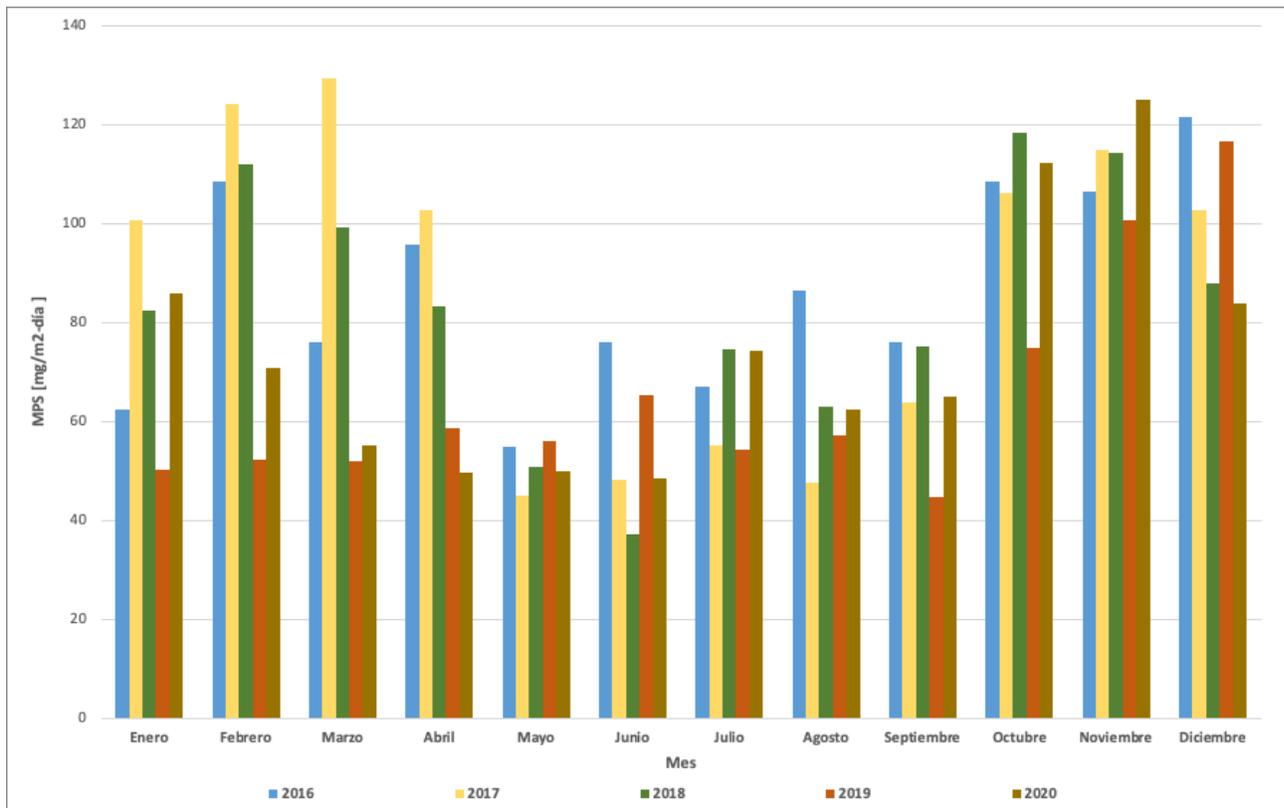


Figura 4-33 Concentraciones mensuales medidas por la red de monitoreo de MPS de CAP para cada año entre 2016 y 2020 [mg/m²-día]

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.1 Determinación de la relación emisión-calidad del aire para MPS

Los datos analizados anteriormente se utilizaron en la Sección 3.7.2 para modelar la dispersión del contaminante MPS en la zona, con el propósito de evaluar el impacto de las emisiones totales y por fuente emisora. A partir de los aportes obtenidos de MPS, se estiman los FEC por estación y fuente emisora, presentados en la Tabla 4-22. Los resultados se interpretan como la cantidad

de emisiones anuales de MPS necesarias para aumentar la concentración anual del mismo contaminante en 1 mg/m²-día.

Tabla 4-22 FEC MPS por fuente y estación de monitoreo

Fuente emisora	EME F	21 de Mayo	Huasco II	Huasco Sivica	EME ME	SM4	SM8
Chimenea U1&2	1.259,25	1.679,00	2.518,50	1.679,00	1.679,00	3.358,00	5.037,00
Chimenea U3	663,18	805,29	1.127,40	867,23	867,23	2.450,87	3.523,13
Chimenea U4	681,44	876,14	1.226,60	876,14	876,14	2.044,33	3.066,50
Chimenea U5	1.044,86	1.462,80	1.828,50	1.462,80	1.462,80	3.657,00	3.657,00
Guacolda areales sin caminos	1.103,30	1.103,30	1.103,30	1.103,30	1.103,30	2.758,24	3.677,66
Entrada a Guacolda - Pavimento	7,27	26,67	42,11	25,81	29,63	1.600,24	2.667,06
Guacolda a Vertedero Guacolda - Tierra	121,90	129,22	416,82	226,69	253,36	1.435,72	2.153,59
Chimenea 2A	190,86	296,89	296,89	381,71	445,33	1.336,00	2.672,00
Chimenea 2B	119,09	218,33	218,33	262,00	327,50	1.310,00	1.310,00
CMP areales sin caminos	254,07	337,69	306,64	430,29	468,03	1.569,28	2.223,15
Entrada a CAP - Pavimento	7,83	30,63	50,32	33,55	39,14	1.174,18	2.348,37
PLL a CAP - Pavimento	123,22	116,73	158,42	369,65	369,65	1.584,20	2.217,89
PLL areales sin caminos	90,71	79,37	48,84	235,16	264,56	1.269,88	2.116,47
PLL a CAP	66,75	70,26	60,68	266,99	266,99	1.668,70	2.224,93
CT Huasco	591,92	854,31	974,92	828,68	828,68	2.071,71	2.762,27
Línea férrea	64,35	5.411,36	440,93	216,45	317,47	44,09	626,58

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de la regulación internacional existente para la calidad del aire por MPS

Se realizó una búsqueda de la regulación internacional existente para la calidad del aire por MPS, y se analizó a través de las siguientes dos subactividades, descritas a continuación.

4.2.1 Descripción de las normas internacionales de MPS y de hierro en MPS, y comparación con la normativa nacional

Se identificaron y revisaron las normas internacionales existentes de MPS y de hierro en MPS. En primer lugar, se comenzó con la búsqueda de marcos regulatorios en países con mayor desarrollo de regulación ambiental en esta temática, específicamente EEUU, Unión Europea, Reino Unido y países OCDE⁵⁷. A partir de este proceso se pudo notar que, a nivel internacional, la presencia de

⁵⁷ Incluyendo diferentes estados federados de Australia y Canadá.

regulación de este contaminante es escasa, ya sea debido a la inexistencia histórica de esta o a que, en algunos países, la legislación actual ha derogado los límites legales anteriormente establecidos. En la Tabla 4-23 se resume la información recopilada, en donde se incluyen valores límites no vigentes y algunos propuestos por estudios para robustecer la comparación con la normativa nacional. Se detallan los valores y unidades de medida presentadas por cada país y, también, los límites unificados expresados en $\text{mg}/\text{m}^2\text{-día}$ para facilitar el análisis. Adicionalmente, se presenta la vigencia y fuente desde la que se obtuvo el valor, ya sea normativa o estudio. A partir de la información anterior se elabora la Figura 4-34, en donde se muestran los valores unificados por país.

Actualmente, en la Unión Europea, Reino Unido y Canadá no existe una normativa vigente que establezca un valor máximo permisible para la concentración de MPS. Por el contrario, Brasil posee un límite vigente de $467 \text{ mg}/\text{m}^2\text{-día}$ en el estado de Espírito Santo, establecido a través del Decreto 3463-R de 2013. Como se puede notar en la Figura 4-34, esta es la norma más permisible y su límite es bastante mayor al que se encuentra vigente en la localidad de Huasco. Adicionalmente, en Alemania se publicó en 2002 el Primer Reglamento Administrativo General de la Ley Federal de Control de Inmisiones, donde se establece un valor de inmisión para la protección contra molestias o desventajas significativas⁵⁸ debidas a la caída de polvo, correspondiente a $350 \text{ mg}/\text{m}^2\text{-día}$ como promedio anual.

Siguiendo la misma línea, en la provincia de Buenos Aires, Argentina, debido a su creciente actividad industrial, se aprobó el Decreto 1074/2018 en donde se fijó un máximo correspondiente a $333 \text{ mg}/\text{m}^2\text{-día}$, idéntico al del estado de Montana en EEUU. Además, Suiza ha establecido estándares de calidad del aire que forman parte de la Ordenanza sobre el Control de la Contaminación del Aire (OAPC, por sus siglas en inglés), en donde se encuentra vigente un valor límite para MPS, especificado como deposición total de polvo, correspondiente a $200 \text{ mg}/\text{m}^2\text{-día}$ como concentración media anual.

Adicionalmente, el Departamento de Conservación Ambiental del estado de Nueva York en EEUU define cuatro niveles de desarrollo social, económico y potencial de contaminación, y para cada uno establece un límite de MPS, diferenciado también por el porcentaje de las concentraciones promedio de 30 días que no deben excederlo en cada mes durante 12 meses⁵⁹. El nivel I se asocia a ciudades con la menor densidad poblacional y que se caracteriza por actividades de agricultura propias de zonas rurales, mientras que las ciudades del nivel IV poseen una alta densidad poblacional y fuerte actividad industrial, como Nueva York. Como se observa en la Figura 4-34, el nivel IV es el que posee un mayor límite de concentración de MPS, mientras que los niveles I y II tienen un máximo permisible más exigente, de $100 \text{ mg}/\text{m}^2\text{-día}$, igual al establecido en Huasco.

⁵⁸ En el reglamento, las molestias o desventajas se consideran significativas para el público en general si afectan al bienestar público por su tipo, extensión o duración.

⁵⁹ Se identificó con el símbolo * en el nombre del país/estado los límites que no deben ser excedidos por el 50% de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses consecutivos, y sin los que no deben ser excedidos por el 50% de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses consecutivos.

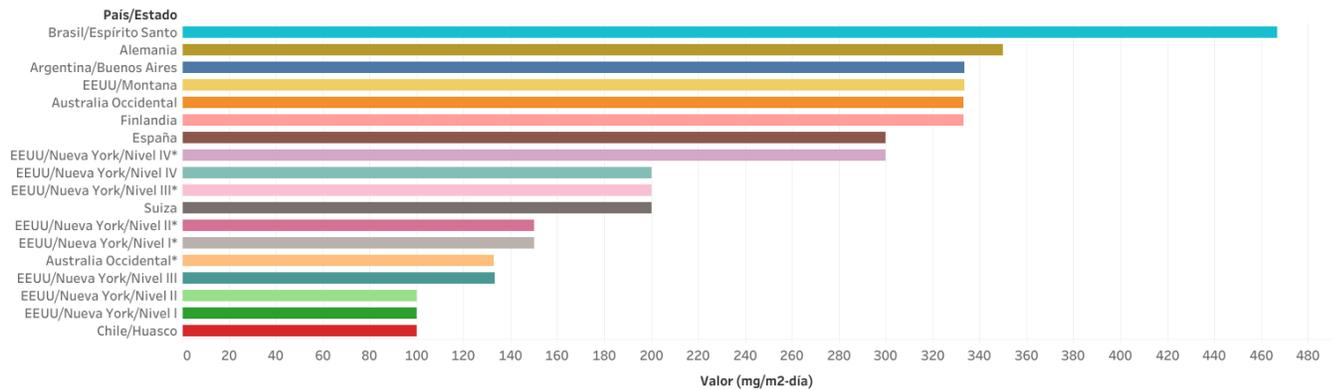
Por otro lado, en España, como se observa en la Figura 4-34, a través del Decreto 833/1975 se estableció un límite de $300 \text{ mg/m}^2\text{-día}$ como concentración media en 24 horas, sin embargo, este fue derogado el año 2002. Además, como se mencionó anteriormente, en el análisis se incluyeron valores presentados en estudios sobre el tema, como (Machado et al., 2018) donde se presenta el valor de $333 \text{ mg/m}^2\text{-día}$ para Finlandia, y el elaborado por Vallack y Shillito (1998), quienes proponen para Australia Occidental un límite inaceptable de empeoramiento de la calidad del aire y un valor para el que se percibe la primera molestia.

Tabla 4-23 Detalle de valores de referencia internacionales de MPS [mg/m²-día] identificados

País/Estado	Verificador	Valor Original	Unidad	Valor unificado [mg/m ² -día]	Referencia	Vigencia
Alemania	Promedio anual	0,35	g/m ² -día	350	Technical Instructions on Air Quality Control (TA Luft)	Vigente
Argentina/Buenos Aires	Promedio 30 días	1	mg/cm ² -mes	333	Decreto 1074/2018	Vigente
Brasil/Espírito Santo	Promedio 30 días	14	g/m ² -mes	467	Decreto N° 3463-R 2013	Vigente
Chile/Huasco	Promedio anual	100	mg/m ² -día	100	Decreto 4/1992	Vigente
EEUU/Montana	Promedio 30 días	10	g/m ² -mes	333	Regulación 17.8.220, MAAQS	Vigente
EEUU/Nueva York/Nivel I	Percentil 50 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses.	0,3	mg/cm ² -mes	100	Título 6 CRR-NY, 257-3.4	Vigente
EEUU/Nueva York/Nivel I*	Percentil 84 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses.	0,45	mg/cm ² -mes	150	Título 6 CRR-NY, 257-3.4	Vigente
EEUU/Nueva York/Nivel II	Percentil 50 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses.	0,3	mg/cm ² -mes	100	Título 6 CRR-NY, 257-3.4	Vigente
EEUU/Nueva York/Nivel II*	Percentil 84 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses.	0,45	mg/cm ² -mes	150	Título 6 CRR-NY, 257-3.4	Vigente
EEUU/Nueva York/Nivel III	Percentil 50 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses.	0,4	mg/cm ² -mes	133	Título 6 CRR-NY, 257-3.4	Vigente
EEUU/Nueva York/Nivel III*	Percentil 84 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses.	0,6	mg/cm ² -mes	200	Título 6 CRR-NY, 257-3.4	Vigente
EEUU/Nueva York/Nivel IV	Percentil 50 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses.	0,6	mg/cm ² -mes	200	Título 6 CRR-NY, 257-3.4	Vigente
EEUU/Nueva York/Nivel IV*	Percentil 84 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses.	0,9	mg/cm ² -mes	300	Título 6 CRR-NY, 257-3.4	Vigente
Suiza	Promedio anual	200	mg/m ² -día	200	Ordinance on Air Pollution Control (OAPC)	Vigente
Australia Occidental	Empeoramiento inaceptable	333	mg/m ² -día	333	(Vallack y Shillito, 1998)	No vigente
Australia Occidental*	Primera molestia percibida	133	mg/m ² -día	133	(Vallack y Shillito, 1998)	No vigente
España	Promedio 24 horas	300	mg/m ² -día	300	Decreto 833/1975	No vigente
Finlandia	Promedio anual	333	mg/m ² -día	333	(Machado et al., 2018)	No vigente

Nota: El símbolo * se utiliza para diferenciar los valores de referencia presentados para un mismo país/estado por su periodo de cumplimiento, como es el caso de Australia Occidental y todos los niveles de EEUU/Nueva York.

Fuente: Elaboración propia



Nota: El límite presentado para Australia Occidental* corresponde al valor desde el cual se percibe la primera molestia en la población.

Figura 4-34 Valores límites de MPS [mg/m²-día] identificados a nivel internacional

Fuente: Elaboración propia

También se realizó una revisión de la regulación existente respecto al contenido de hierro en MPS u otros componentes, sin embargo, ningún país, a excepción de Chile, tiene vigente un límite legal, y tampoco se encontraron valores de referencia. Esto se explica dado que el MPS en Huasco posee altas concentraciones de óxidos de hierro originadas por chimeneas industriales.

4.2.2 Principales ventajas y desventajas de la norma vigente en comparación con la normativa internacional

Con el propósito de revisar y, en caso de ser necesario, actualizar la normativa respecto a MPS y hierro contenido en MPS vigente en Huasco, se realizó una comparación de esta con las normas internacionales existentes o valores referenciales presentados anteriormente, basándose principalmente en la fuente emisora regulada, el método de medición que se utiliza para verificar su cumplimiento y el objeto de protección. Para el análisis se incorporaron los conceptos que se listan a continuación:

- Objeto de protección (ODP): Se refiere al receptor del riesgo al que el instrumento busca proteger.
- Fuente regulada: Se refiere a las actividades sobre las que se aplica la regulación o guía, la que se puede presentar en distintos niveles de detalle según cómo esta se define en los instrumentos revisados.

La normativa secundaria de MPS en cuestión, presente en el D.S. N°4/1992, tiene como objetivo proteger las áreas silvoagropecuarias y los recursos naturales renovables de la cuenca baja del río Huasco, específicamente los olivos y otros cultivos de la zona, de las depositaciones de óxidos de hierro, contaminante propio de las actividades industriales de la zona. En particular, las fuentes emisoras de MP que dieron origen a la norma corresponden a chimeneas industriales.

Los límites legales vigentes en Huasco se establecen en una regulación específica para el MPS, mientras que a nivel internacional están incluidos en normativas más generales sobre la calidad del aire. En la Tabla 4-24 se presenta un cuadro comparativo, en donde se detalla el objeto de protección de las normativas vigentes, el alcance territorial del límite establecido, junto con otras ventajas y desventajas específicas de cada norma. Se puede notar que el reglamento establecido en Alemania posee como objetivo la protección de la población contra los efectos nocivos de la contaminación del aire, estableciendo para esto límites legales para distintos contaminantes, entre ellos, MPS. Por consiguiente, no posee entre sus objetos de protección a los recursos naturales, como es el caso de la normativa analizada.

La normativa existente en la provincia de Buenos Aires, Argentina, se encarga de la protección del ambiente y, en particular, de los efluentes gaseosos, por lo que define estándares de calidad del aire respecto a diversos contaminantes, entre los que se encuentra el MPS. La fuente regulada corresponde a “todo generador de emisiones gaseosas, existente o a instalarse, que vierta las mismas a la atmósfera y se encuentre ubicado en el territorio de la provincia de Buenos Aires”. Es decir, al igual que en la norma chilena, regula cualquier fuente de emisiones atmosféricas existente o a instalarse en el territorio en el que rige. Además, el límite establecido se presenta como un valor máximo permisible para el flujo másico vertical de partículas sedimentables con un tiempo de medición de un mes, sin embargo, no se entregan detalles acerca de los equipos de medición. Por otro lado, la normativa no regula la composición química del MPS lo que, junto con lo anteriormente mencionado, refleja una regulación menos exhaustiva del contaminante en comparación con la vigente en Huasco.

Por otro lado, el valor presentado para la normativa del estado de Espírito Santo, Brasil, corresponde a lo que el decreto define como Meta Intermedia Etapa 1 (MI1), lo que significa que el límite es temporal y podría ser actualizado al establecer los valores de la Etapa 2, Etapa 3 y la norma final (PF). La existencia de metas intermedias tiene el objetivo de mejorar gradualmente la calidad del aire mediante una disminución progresiva de las emisiones, por lo tanto, se pretende que los valores sean cada vez más exigentes y respaldados por estudios técnicos. Lo anterior resulta similar a las medidas establecidas en el PRAS (MMA, 2017d) y que dan lugar al presente estudio, específicamente a la revisión y actualización de la norma para MPS.

En el caso de la normativa del estado de Nueva York, esta posee como objeto de protección el bienestar humano y la agricultura, siendo su principal objetivo “aliviar la molestia de la caída de polvo y reducir el costo económico de la contaminación del aire”. Lo anterior permite que los límites establecidos sean comparables con la normativa de Huasco, ya que la agricultura es parte del enfoque de esta, en específico la protección de los olivos. Los valores definidos en los niveles geográficos I y II son iguales al vigente en Huasco, sin embargo, las zonas en las que aplican son de baja densidad poblacional y se desempeña principalmente la agricultura como actividad económica. Esto podría marcar una diferencia, ya que Huasco es una zona con alta actividad industrial. A pesar de lo anterior, la diferenciación de una concentración máxima permisible por zona geográfica logra considerar las distintas condiciones climáticas y económicas de un mismo territorio nacional. Esto resulta importante a tener en cuenta para la actualización de la

normativa de Huasco, en caso de que se quisiera extender su alcance a nacional, principalmente debido a las grandes diferencias existentes en Chile a nivel territorial.

Por último, si bien la normativa existente en Suiza posee un límite menos exigente que en Huasco, esta se utiliza muchas veces como referencia en otras zonas de Chile debido a que su objeto de protección también es la naturaleza, y debido al mayor avance en reglamentación ambiental del país. Sin embargo, la protección de los recursos naturales en la normativa suiza, en particular de los glaciares, tiene un propósito principalmente turístico, por lo que no coincide con el objetivo de Huasco. A pesar de lo anterior, la norma posee un alcance nacional, lo que sugiere un límite permisible más estándar para ser aplicado en territorios con condiciones distintas. En esta línea, en la Figura 4-34 se puede notar que posee el límite más bajo entre las normas de alcance nacional analizadas. En este sentido, la definición de una concentración máxima más exigente en Huasco está relacionado, en parte, con el territorio de aplicabilidad del límite.

Tabla 4-24 Cuadro comparativo para normativa existente de MPS

País/Estado	Objeto de protección	Fuente regulada	Alcance territorial	Ventajas	Desventajas	Referencia
Alemania	Bienestar población	Fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos existentes o a instalarse	Nacional	País con amplia experiencia en regulación ambiental. Límite aplicable a todo el territorio nacional.	No es específica de MPS. No posee como objeto de protección los recursos naturales. Concentración máxima permisible menos exigente.	TA Luft
Argentina/Buenos Aires	Recursos naturales	Fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos existentes o a instalarse	Provincial	No posee ventajas respecto a la norma chilena.	Adaptada a actividad industrial de la provincia. Concentración máxima permisible menos exigente.	Decreto 1074/2018
Brasil/Espírito Santo	Bienestar población y recursos naturales	Fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos existentes o a instalarse	Estatal	Establecimiento de límites máximos intermedios por etapas, que pretenden que los valores sean cada vez más exigentes.	No es específica de MPS. Concentración máxima permisible menos exigente.	Decreto N° 3463-R 2013
Chile/Huasco	Recursos naturales y actividad silvoagropecuaria	Fuentes emisoras de MP existentes o a instalarse	Comunal*	Específica y adaptada a las condiciones de Huasco. Concentración máxima permisible exigente. Establece límite para hierro en MPS.	Posible no aplicabilidad al resto del territorio nacional con diferentes condiciones. Fue promulgada en 1992 y no ha sido actualizada.	Decreto 4/1992
EEUU/Montana	Bienestar población y recursos naturales	Fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos existentes o a instalarse	Estatal	Enfoque en bienestar de la población, adicional a recursos naturales.	No es específica de MPS. Diferencia en condiciones climáticas y económicas. Concentración máxima permisible menos exigente.	Regulación 17.8.220, MAAQS

País/Estado	Objeto de protección	Fuente regulada	Alcance territorial	Ventajas	Desventajas	Referencia
EEUU/Nueva York	Bienestar población y costo económico	Fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos existentes o a instalarse	Estatal	Límites diferenciados por zona geográfica y sus condiciones. Concentración máxima permisible exigente.	No es específica de MPS. Diferencia en condiciones climáticas y económicas respecto a Huasco.	Título 6 CRR-NY, 257-3.4
Suiza	Bienestar población y recursos naturales	Fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos existentes o a instalarse	Nacional	País con amplia experiencia en regulación ambiental. Límite aplicable a todo el territorio nacional. Enfoque en bienestar de la población, adicional a recursos naturales.	No es específica de MPS. Protección de recursos naturales por su valor paisajístico.	OAPC

*Cuenca del río Huasco.

Fuente: Elaboración propia

4.3 Estimación del potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de MPS

Se estima el potencial de reducción de emisiones para fuentes emisoras de MPS a través de las actividades descritas a continuación.

4.3.1 Identificación de las potenciales tecnologías de abatimiento para reducir emisiones de MPS

Se identificaron medidas con potencial de aplicación para la reducción de emisiones de MPS en las fuentes identificadas, presentadas en la Tabla 4-25. Estas medidas fueron analizadas y seleccionadas específicamente para la reducción de MPS.

Tabla 4-25 Medidas recopiladas posibles para reducción de MPS

Medida	Eficiencia	Referencia
Barrera cortaviento	30%	RCA revisadas
Pavimentación	99,6%	Estimado en base a las diferencias de factores de emisión de caminos pavimentados y de tierra.
Filtro de mangas	99,0%	(US-EPA, 2016a)
Precipitador electrostático seco	98%	(US-EPA, 2016a)

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Estimación del potencial de reducción de emisiones de medidas propuestas para MPS

A continuación, se presenta en detalle cada medida:

- **Barrera cortaviento**

Medida que consiste en la implementación de una malla de polietileno del tipo “malla sombra” con 30% cobertura dispuesta en postes distanciados cada tres metros, con una altura no menor a 2 metros por sobre la operación. Esta barrera rodeará el perímetro de la zona en donde se realiza la carga y descarga y en canchas de acopio, lo que permite disminuir la velocidad y turbulencia del viento y evitar así la volatilización de material particulado (MINAGRI, 2022).

- **Pavimentación**

Para el control de emisiones de polvo resuspendido se considera la medida de pavimentación de las calles de Huasco que se encuentren sin asfaltar. Para las instalaciones se considera la pavimentación en todas las vías. La eficiencia de incorporar la pavimentación en caminos no

pavimentados se obtiene de la diferencia de los Factores de Emisiones y corresponde a un 99,6% para MPS.

- **Filtro de manga**

Los filtros de mangas consisten en la captación del material particulado desde alguna edificación cerrada como un domo o en una chimenea. Esta medida tiene una eficiencia del 99%, es una tecnología innovadora y se considerará su incorporación en chimeneas o espacios encapsulados.

- **Precipitador electrostático seco (ESP)**

El precipitador electrostático seco o ESP, es un sistema que retiene el material particulado mediante la ionización de las partículas, evitando que se vayan a la atmósfera. Tiene una eficiencia de 98%, una vida útil de 20 años y se incorpora en chimeneas.

- **Ciclón**

Los ciclones son un tipo de recolectores mecánicos que utilizan la inercia para remover partículas de un flujo de gas. Se utiliza generalmente para remover material particulado y su eficiencia depende en gran medida del tamaño de las partículas que se quieren remover. Se ha registrado una eficiencia de entre el 85 y 90% en la remoción de partículas de 10 micras (EPA, 1998a), pero esta eficiencia aumenta con partículas de mayor tamaño, como MPS. Es importante destacar que los ciclones por sí solos no suelen ser suficientes para cumplir con reglamentaciones ambientales, sino que sirven como pre-limpiadores antes del equipo de control final, como los precipitadores electrostáticos.

A partir de lo anterior y el inventario elaborado, se estima el potencial de reducción de las medidas mencionadas, presentado en la Tabla 4-26. Cabe destacar que se presentan solo las medidas que, en la práctica, efectivamente generan reducciones de MPS en las fuentes evaluadas.

Tabla 4-26 Potencial de reducción de emisiones de MPS

Instalación	Medida	Potencial de reducción [t/año]
Planta de Pellets Huasco	Barrera cortaviento	4,222
	Pavimentación	2,191
	Filtro de manga	0,156
	Ciclón	0,030
Termoeléctrica Guacolda	Pavimentación	24,544
Puerto Las Losas	Pavimentación	0,092
Central Térmica Huasco	Pavimentación	8,203
	Precipitador electrostático	0,000

Instalación	Medida	Potencial de reducción [t/año]
Huasco*	Pavimentación	35,020

*Se refiere a los caminos de Huasco.

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Costo de medidas propuestas para MPS

En esta sección se presentan los costos de las medidas propuestas para la reducción de MPS. Se debe considerar que son consistentes con lo expuesto en la Sección 3.9.3.1.

Es importante destacar nuevamente que todos los costos son normalizados a UF, desde valores de pesos chilenos y de dólares de distintos años, lo que permite la correcta comparación entre las distintas medidas.

- **Barrera cortaviento**

Las características de la malla son que tiene una vida útil de entre 3 a 5 años debido a la deterioración por la exposición al sol. El costo unitario corresponde a 3.120 CLP2022/m lineal (0,094 UF/m) para la provincia de Huasco, por lo que considerando que se requieren 3 recambios de la malla en el periodo de evaluación, considerando el promedio de recambio de 4 años. Considerando, además, un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento del 6% anual, el costo de aplicación de esta medida traído a valor presente resulta de 0,20 UF/año.

Se estima un perímetro estándar de aplicación de 20 m, es decir 25 m², lo que por cada instalación se considera un costo anual de 3,97 UF/año. En los casos de evaluación de depósitos con un perímetro evidentemente mayor, se calculan sus propios costos correspondientes a cada caso.

- **Pavimentación**

El detalle de costos unitarios de la pavimentación se encuentra en la Tabla 3-83 según los procesos y materiales necesarios para su implementación, recopilados del estudio: “Investigación de bases y subbases de pavimentación” del ministerio de vivienda y urbanismo (MINVU, 2007b). La vida útil de una calle pavimentada se estima en 30 años (MINVU, 2007b).

Los costos unitarios de inversión para la pavimentación se dividen en dos categorías: costos por metro cuadrado (m²) y costos por metro lineal (ml). Estos costos se asocian a los procesos, materiales y herramientas necesarias para la pavimentación de un camino.

La Tabla 3-83 presenta los costos unitarios por metro cuadrado, los cuales se estiman en aproximadamente \$7.600 CLP por metro cuadrado pavimentado.

La Tabla 3-84 presenta los costos unitarios por metro lineal, los cuales se estiman en aproximadamente \$7.700 CLP por metro lineal pavimentado.

Los costos de mantención asociados a la medida de pavimentación fueron obtenidos de un estudio publicado por el MOP (Dirección de Planeamiento, 2001). En este se estima un costo anual básico de mantención para caminos pavimentados en 1.627 USD2001 por cada kilómetro pavimentado.

La extensión total de caminos no pavimentados se obtiene del “Diagnóstico de conectividad vial” realizado por el GORE de Atacama (2019b), y corresponde a un total de 1.285 kilómetros de camino por pavimentar. Además se consideran 13,7 kilómetros de caminos no pavimentados al interior de las instalaciones de las plantas Guacolda y CMP.

Considerando los costos de construcción y mantenimiento presentados anteriormente, la extensión de caminos por pavimentar, un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento del 6% anual, se obtiene que el costo de aplicación de esta medida traído a valor presente corresponde a aproximadamente 3.706.906 UF.

- **Filtro de manga**

Medida con un costo unitario de \$34 USD1998/scfm (1,84 UF/m³/hr) y un costo de operación y mantención de \$13 USD1998/año (0,71 UF/m³/hr) (US-EPA, 2016a). Se debe considerar que la aplicación de esta medida debe ser incorporada en una fuente emisora cerrada, como por ejemplo con un domo o en una chimenea.

- **Precipitador electrostático seco (ESP)**

Para la central generadora Guacolda, específicamente para la unidad 4 de generación, se propone incorporar un precipitador electrostático (ESP) como medida de mitigación de material particulado. Para estimar el costo de aplicación de esta medida fueron considerados los costos de inversión el cual corresponde a 27 USD/scfm (pie cúbico estándar por minuto), operación y mantenimiento el cual corresponde a 16 USD/scfm, gasto energético el cual corresponde a 0,067 USD/kWh y los costos asociados a la acumulación de polvo debido a la actividad del precipitador el cual corresponde a 25 USD/ tonelada de MP reducida. Tanto la metodología como los valores de los costos fueron obtenidos de la guía *Control Strategy Tool* (US-EPA, 2016a).

Considerando dichos costos, los parámetros de operación de la unidad 4 de Guacolda, los valores promedio del dólar y la UF de 1995, año para el cual se definieron los costos en la guía de la EPA, un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento del 6% anual, el costo de aplicación de esta medida traído a valor presente resulta de aproximadamente 1.377.438 UF.

- **Ciclón**

De acuerdo al estudio “Cost-benefit análisis of electrocyclone and cyclone” (Chi-Jen Chen & Leonard F.S. Wang, 2001) el costo de inversión de un ciclón corresponde a, con las transformaciones de unidades pertinentes, 717,32 UF y su costo total de operación y mantenimiento corresponde a 176,96 UF/año.

Considerando estos costos, un horizonte de evaluación de 10 años, y una tasa de descuento de 6% anual, el costo de aplicación de esta medida traído a valor presente resulta de aproximadamente 1.920,96 UF.

4.3.4 Selección de medidas para MPS por costo-eficiencia

A partir del costo anualizado de cada medida de reducción de emisiones aplicable, presentado en el ítem precedente, y considerando el total de emisiones reducidas en el horizonte temporal y el FEC (ver Sección 4.1.3.1) se estima el costo por mg/m²-día de MPS reducido. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo Digital “PPAHUASCO2-Inventario_Emissiones_Tablas.xlsx”.

Las medidas seleccionadas bajo el criterio de costo-eficiencia corresponden a la pavimentación de todos los caminos de Huasco y los caminos internos de las instalaciones, y la incorporación de barreras cortaviento en zonas de carga y descarga de material y en canchas de acopio de la Planta de Pellets.

4.4 Generación de antecedentes para la revisión y/o actualización de la norma de MPS

Por medio de las siguientes subactividades, se generan antecedentes para la revisión y/o actualización de la Norma de MPS. La recopilación de los estudios revisados se encuentra disponible en el anexo digital “PPAHuasco2-BDEstudios_MPS.xlsx”.

4.4.1 Recopilación y sistematización de resultados y conclusiones de los estudios realizados en la zona de Huasco respecto al MPS

Se recopilan y sistematizan los resultados y las conclusiones de los estudios realizados en la zona de Huasco respecto al MPS, que han sido ejecutados con financiamiento público y/o privado, desde el año 2000 en adelante. En las siguientes secciones se resumen cuatro estudios previos que abordan la problemática de la calidad del aire en el valle de Huasco respecto al MPS.

4.4.1.1 Estudio Para Evaluar el impacto de la Contaminación Atmosférica Sobre el Rubro Olivícola, Sector Costero Valle del Huasco

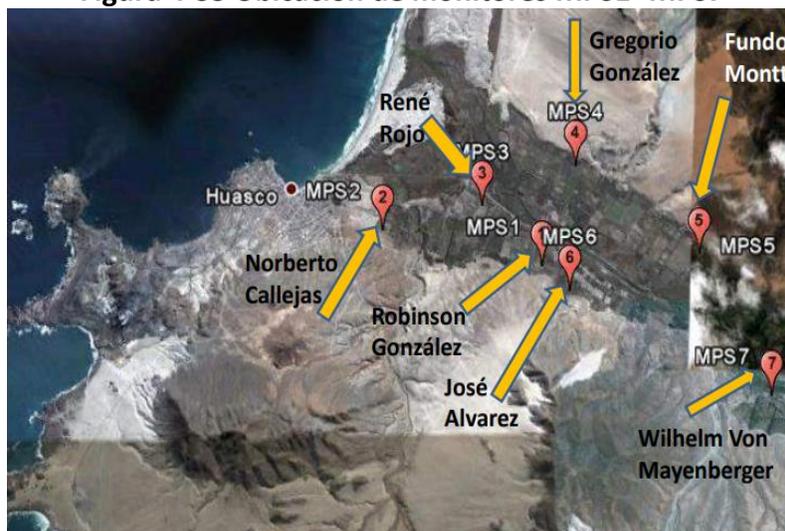
En este estudio realizado por DICTUC & Facultad de Agronomía PUC (2012) se evalúan los impactos ambientales negativos producidos por la emisión de contaminantes atmosféricos en la

zona costera del Valle Huasco, generados por el Complejo Industrial, enfocado a actividades olivícolas de la zona analizando la presencia de polvo en cultivos de gran parte del valle.

Respecto a la sedimentación total de partículas (MPS), se realizó el mapa de concentraciones de contaminantes aplicando el modelo CALMET/CALPUFF con los datos disponibles del año 2009, generando la deposición promedio mensual. Estos muestran que los mayores impactos se producen a la cercanía de las fuentes principales, reduciéndose las concentraciones hacia el valle. Además, la extensión de la pluma varía según el mes, en invierno los impactos tienen características más locales en comparación con los meses más cálidos que existe una mayor cobertura espacial debido a vientos más intensos. Los meses con mayores concentraciones son septiembre y octubre y se constata estacionalidad en las mediciones de MPS, con valores mínimos en los meses de invierno. También, se evidenció que en al menos 4 meses del año hubo una excedencia a la norma mensual para MPS.

Por otro lado, el estudio realiza un monitoreo complementario de MPS desde julio a diciembre 2011 en el cual ubican nueve monitores de MPS desde el valle de Huasco hasta la zona de Vallenar, en la Figura 4-35 y Figura 4-36 se muestran la ubicación de cada uno.

Figura 4-35 Ubicación de monitores MPS1- MPS7



Fuente: DICTUC & Facultad de Agronomía PUC (2012)

Figura 4-36 Ubicación de monitores MPS8-MPS9


Fuente: DICTUC & Facultad de Agronomía PUC (2012)

Los valores de la medición de MPS se encuentran en la Tabla 4-27. Los resultados del estudio muestran una variación de la deposición total de MPS la cual disminuye a medida que el sitio de monitoreo se desplaza hacia el este, observándose las menores concentraciones en los sitios MPS8 y MPS9. Entre julio y septiembre se encuentran los valores mínimos de cada sitio encontrando los valores más bajos en julio y agosto, 8 y 11,6 mg/m²-día respectivamente, mientras que en noviembre y diciembre se encontraron valores más altos, con 153 y 126 mg/m²-día respectivamente. También se observa que el sitio con mayor cantidad de MPS en toda la red es el MPS5, cuyo comportamiento se debe a actividades locales, las que no están directamente relacionadas al complejo industrial, como el manejo de suelos agrícolas, tránsito de vehículos por caminos sin pavimentar, entre otras.

Tabla 4-27 Valores del monitoreo de MPS en [mg/m²-día]

Sitios	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio 2011 ^(f)
MPS1	43,3	32,0	30,5	50,1	46,4	(e)	40,46
MPS2	97,4	73,5	68,1	(a)	(a)	(a)	79,67
MPS3	34,2	36,8	46,1	46,7	42,9 ^(c)	56,5	43,87
MPS4	22,3	36,8 ^(b)	35,7	52,1	46,6	66,1	43,27
MPS5	70,5	34,2	40,5	99,5	153,4	126,6	87,45
MPS6	42,5	31,1	33,8	41,3	40,3 ^(d)	60,7	41,62
MPS7	38,7	26,2	37,5	43,3	45,5	(e)	38,24
MPS8	8,0	11,6	30,2	34,6	42,4	52,7	29,92
MPS9	26,3	13,1	32,0	16,1	17,3	35,7	23,42

Notas:

(a): Vaso colector fue roto, posteriormente fue robado y en el último mes no se colocó colector.

(b): Vaso contenía aceitunas, las que se removieron para el pesaje del MPS.

(c): Presencia de hormigas en el frasco colector.

(d): Indicios de caída del frasco colector.

(e): Monitor y vaso colector en el suelo, pérdida de la muestra.

(f): Promedio realizado con los datos del estudio para el 2011.

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados de DICTUC & Facultad de Agronomía PUC (2012)

El estudio realiza un análisis de la composición elemental del del Material Particulado Sedimentable, en el que se analizan elementos y metales pesados que están presentes en forma de porcentaje con respecto al total de MPS. Los resultados de la composición elemental permiten evaluar la capacidad de monitoreo de elementos de traza emitido por actividades antropogénicas. Se determina que el MPS está compuesto mayoritariamente por minerales férricos, siendo el hierro (Fe) uno de los elementos de mayor validez diagnosticada, debido a que elementos como el magnesio (Mg), calcio (Ca) y aluminio (Al) son elementos que se encuentran naturalmente en el suelo y otras fuentes contaminantes. En base a estos valores se realizó la Tabla 4-28 en la que se muestran la concentración de hierro en MPS. Los valores indican variabilidad entre los datos medidos en la red del estudio, además se observa que los mayores valores de concentración de hierro depositado ocurren en el sitio MPS2 en los meses que hubo mediciones válidas.

Tabla 4-28 Valores del monitoreo de hierro en MPS en [mg/m²-día]

Sitios	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	2011 ^(a)
MPS1	6,14	6,55	9,52	3,70	6,73	-	5,44
MPS2	30,60	12,29	18,34	-	-	-	10,21
MPS3	2,16	6,61	12,66	3,90	7,30	5,91	6,42
MPS4	2,29	2,68	6,04	9,02	5,05	11,45	6,09
MPS5	14,18	4,54	5,56	6,69	8,97	8,44	8,06
MPS6 ^(b)	-	-	-	-	-	-	-
MPS7	0,92	4,17	2,30	3,51	1,98	-	2,14
MPS8	1,21	1,47	7,93	3,73	4,75	10,00	4,85
MPS9	3,15	0,48	2,94	0,16	2,33	4,14	2,20

Notas:

(a): Promedio realizado con los datos del estudio para el 2011.

(b): El sitio MPS6 no presenta resultados de composición elemental en el informe.

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados DICTUC & Facultad de Agronomía PUC (2012)

4.4.1.2 Emisiones y calidad del aire en Huasco

GAC consultores (2014) realiza un estudio sobre las características de las emisiones en Huasco, identificando las emisiones por fuente. Se especifica información sobre Planta de Pellets, Central Térmica Guacolda, Central Térmica Huasco, Puerto Las Losas, Central Térmica Punta Alcalde y fuentes menores, junto con una modelación de Calidad del Aire para la zona. Las estaciones analizadas fueron: "Red Guacolda Huasco" con los puntos de muestro EME-M, EME-F, 21 de Mayo; "PLL-CAP Huasco" con las estaciones Las Losas, Población Huasco II; "CAP MPS" con seis estaciones denominadas "Estación N°1-2-3-4-5-6" y la estación "SIVICA MMA".

Sobre el Material Particulado Sedimentable, se entrega una línea base con información sobre la tasa mensual y anual de las seis estaciones que compone la Red de Monitoreo de MPS de Planta

de Pellets en Huasco, con información desde enero 2008 hasta diciembre 2014. Cuyas redes monitoreadas son: “Estación N°1”, “Estación N°2”, “Estación N°3”, “Estación N°4”, “Estación N°5” y “Estación N°6”. En la Figura 4-37 se muestra la ubicación de las estaciones.

Figura 4-37 Ubicación de Red de Monitoreo de CAP MPS



Fuente: GAC consultores (2014)

En la Tabla 4-29 se presentan los resultados de las concentraciones promedio anuales desde el 2008 – 2014 en los puntos muestreados. Los resultados obtenidos presentan que las tasas de sedimentación anuales han sido considerablemente inferiores a 100 mg/m²-día en el Valle de Huasco mientras que se alcanza hasta 145 mg/m²-día en las zonas costeras de la cuarta región, esto sugiere que fuentes de MPS de origen natural pueden ser más relevantes que una o más fuentes industriales. En el periodo evaluado, se observa que el máximo valor encontrado corresponde a la media anual en 2008 con 100,2 mg/m²-día en la Estación N°5, observando una tendencia de disminución de concentración en los años evaluados llegando a un valor mínimo anual de 56 mg/m²-día en la Estación N°1 en el año 2014 y máximo de 88,4 mg/m²-día en la Estación N°2.

Tabla 4-29 Sedimentación anual MPS entre 2008 – 2014 en [mg/m²-día]

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Estación N°1	89,7	86,7	91,2	80,4	80,4	77,2	56,0
Estación N°2	80,8	70,5	78,5	73,0	62,5	72,2	88,4
Estación N°3	98,1	82,4	91,4	77,5	72,3	66,1	69,4
Estación N°4	95,5	87,5	96,8	89,3	79,2	83,8	67,6
Estación N°5	100,2	86,8	90,1	79,7	70,8	74,8	78,9
Estación N°6	79,4	73,0	80,5	64,8	63,8	69,7	65,8

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de GAC consultores (2014)GAC consultores (2014)GAC consultores (2014)

Con relación al contenido de hierro en MPS, en la Tabla 4-30 se muestran las respectivas concentraciones anuales. Según el informe, las tasas de sedimentación en el Valle de Huasco se

encuentran entre 10 y 15 mg/m²-día mientras que en las zonas costeras de la cuarta región los valores se encuentran entre 5 y 15 mg/m²-día, lo que puede indicar que las fuentes industriales implican un aporte entre 0 y 5 mg/m²-día. Con respecto a los valores obtenidos se encuentra el máximo en el año 2009 en la Estación N°4 con un valor de 26,7 mg/m²-día, mientras que el mínimo se presenta en el año 2014 con 8,7 mg/m²-día y un máximo en el mismo año 13,7 mg/m²-día, presentando una tendencia a la baja de la sedimentación de hierro en MPS en el tiempo. Además, en los años evaluados se observa que hubo un periodo de latencia a la norma en tres ocasiones, dos en el 2008 y una en el 2009, presentando una latencia de 82%, 80% y 89% respectivamente, luego decae notablemente la sedimentación en los últimos años del estudio.

Tabla 4-30 Sedimentación anual de hierro en MPS entre 2008 – 2014 en [mg/m²-día]

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Estación N°1	21,6	16,2	18,4	15,1	19,4	16,8	13,3
Estación N°2	21,4	13,3	15,1	14,1	10,5	10,6	8,7
Estación N°3	24,5	14,7	19,4	16,8	13,3	11,8	12,2
Estación N°4	23,3	26,7	20,6	14,6	16,7	11,4	10,1
Estación N°5	23,9	15,8	18,5	15,8	13,5	11,5	13,7
Estación N°6	20,6	14,6	16,7	11,4	10,1	11,2	10,6

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de GAC consultores (2014)

El estudio determina que las fuentes que destacan por su magnitud de actividades es Planta de Pellets y Central Termoeléctrica Guacolda, por otro lado, las fuentes industriales menores son Puerto Las Losas y la Central Térmica Huasco.

4.4.1.3 Caracterización de polvo negro en la comuna de Huasco, III Región

En Ortiz Poblete (2018) se analizan las principales fuentes de emisión de polvo negro en la comuna de Huasco. En noviembre 2015 se realiza este estudio que consiste en realizar una caracterización de polvo negro con la instalación de 15 muestreadores de MPS distribuidos desde Huasco hasta Freirina, en la Figura 4-38 se muestra la ubicación de estos, los cuales estaban compuestos por colectores de modelo británico modificado según las exigencias del D.S. N°4/92 y la Resolución N°099 SAC III Región. El análisis de las muestras fue realizado en el Laboratorio de Química Ambiental del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). El objetivo del estudio fue determinar la cantidad de MPS insoluble, soluble y total; y los metales pesados que componen el MPS, la medición se realizó mediante la técnica ICP-AES dónde se realizaron muestreos en diferentes matrices ambientales.

Figura 4-38 Ubicación de muestreadores MPS1-MPS15 del estudio



Fuente: CENMA para estudio Ortiz Poblete (2018)

El estudio entrega la caracterización de muestras desde diciembre 2015 a febrero 2016, en la que se distinguen los resultados de MPS insoluble, soluble y total. En la Tabla 4-31 se muestran los valores mensuales de MPS insoluble en la cuenca mientras que en la Tabla 4-32 se muestran los valores de MPS total. Para comparar los valores obtenidos con los límites del Decreto Exento N°4 de 1992 se promedió los valores de MPS insoluble de los 15 puntos de muestreo.

Los resultados muestran medias mensuales MPS insoluble por debajo de la normativa cuyos valores específicos son 65,6; 111,6; 107,2 mg/m²-día para cada mes respectivamente. Sin embargo, en los puntos específicos MPS-1 y MPS-2 ambos ubicados en la zona de Huasco se supera considerablemente la norma, superando por sobre un 200% los valores máximos, mientras que en el punto MPS-3 existe una latencia con respecto a la norma, el resto de los puntos no presenta superación de la norma.

Por otro lado, los resultados de MPS insoluble indican que los puntos más cercanos a la Central Guacolda y Planta de Pellets sobrepasaron la Norma de calidad del aire, comprobando que estas corresponden a las principales fuentes de contaminación de la zona. En los puntos de muestreo más cercanos a la Central Guacolda y Planta de Pellets sobrepasan los valores de la Norma de Calidad del Aire, incluso en el punto de muestreo MPS-1 se presentan mayores concentraciones de los metales analizados en el estudio.

Tabla 4-31 Valor promedio mensual de MPS insoluble en zona de estudio[mg/m²-día]

Identificación	Sector	Dic-15	Ene-16	Feb-16
MPS-1	Casa Miguel Marambio	40,8	180,7	546,1
MPS-2	Escuela Básica Mirella Zuleta	-	315,9	70,5
MPS-3	Estación Sivica-Huasco	147,6	104,3	148,6

Identificación	Sector	Dic-15	Ene-16	Feb-16
MPS-4	Estación 4 SAG - Huasco	52,3	57,4	61,4
MPS-5	Hacienda Olivos Centenarios	57,0	86,0	78,0
MPS-6	Estación 6 SAG - Huasco	53,0	53,3	41,1
MPS-7	Olivícola Quinta Miramar - Huasco	116,6	101	124,9
MPS-8	Estación Sector Las Tablas	31,6	42,7	27,7
MPS-9	Hacienda Nicolasa	42,6	51,9	51,8
MPS-10	Escuela G98 Javiera Carrera - Vallenar	31,6	42,7	27,7
MPS-11	Freirina	42,6	51,9	51,8
MPS-12	Los Guindos	70,2	88,7	76,4
MPS-13	Fundo Totora – Freirina	39,7	145,2	45,1
MPS-14	UDA Vallenar	74,1	157,2	98,7
MPS-15	Sector Rinconada Las Pavonas Vallenar	57,0	109,3	58,4
Valor promedio mensual en la zona de estudio		65,6	111,6	107,2

Fuente: Elaboración propia en base a datos de CENMA para estudio Ortiz Poblete (2018)

Tabla 4-32 Valor promedio anual de MPS total en la cuenca del Río Huasco en [mg/m²-día]

Identificación	Sector	Dic-15	Ene-16	Feb-16	2016 ^(a)
MPS-1	Casa Miguel Marambio	136,7	198,8	586,5	307,3
MPS-2	Escuela Básica Mirella Zuleta	_(b)	351	363,7	357,4
MPS-3	Estación Sívica-Huasco	192,6	122,1	169	161,2
MPS-4	Estación 4 SAG - Huasco	82,2	64	74	73,4
MPS-5	Hacienda Olivos Centenarios	122,5	116,7	87,3	108,8
MPS-6	Estación 6 SAG - Huasco	94,7	63,9	87,8	82,1
MPS-7	Olivícola Quinta Miramar - Huasco	166,1	113,2	150,9	143,4
MPS-8	Estación Sector Las Tablas	108,9	108,4	109,7	109,0
MPS-9	Hacienda Nicolasa	53,2	49,6	84,7	62,5
MPS-10	Escuela G98 Javiera Carrera - Vallenar	68,9	57,9	60,3	62,4
MPS-11	Freirina	111,6	114,1	98,7	108,1
MPS-12	Los Guindos	56,9	176	58,4	97,1
MPS-13	Fundo Totora – Freirina	104,1	180,3	111,5	132,0
MPS-14	UDA Vallenar	97,2	101,8	84,6	94,5
MPS-15	Sector Rinconada Las Pavonas Vallenar	78,3	116,3	60,4	85,0
Valor promedio mensual en la zona de estudio		105,3	128,9	145,8	132,3

Notas:

(a): Valor obtenido con el promedio de concentraciones de los meses del estudio.

(b): No fue posible su medición porque la muestra se encontró contaminada con tierra, lápices y basura.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de CENMA para estudio Ortiz Poblete (2018)

Con respecto a los metales pesados que componen el MPS, se estudió la presencia en las zonas de estudio a nivel de concentraciones [mg/kg] en la fracción insoluble y soluble. Se realizó el

análisis de metales comparando con el nivel de background de cada elemento. Además, se determina que el valor de background para el hierro es de 40.857 mg/kg (valor 95% UCL).

En la Tabla 4-33 se muestran los valores promedio de cada metal, en rojo se destacan aquellas concentraciones que superan el nivel de background. En la Figura 4-39 se muestra la distribución de Fe en la zona de estudio.

Tabla 4-33 Valores promedio [mg/kg] de metales en suelo en los diferentes sectores de la zona de estudio, comparados con los niveles de background de la zona de estudio

Elementos	Valor promedio en la ciudad de Huasco	Valor promedio en la zona industrial de Huasco	Valor promedio en el Valle de Huasco	Valor promedio en la Ciudad de Vallenar	Valor 95% UCL Background de la zona
Cd	18,4	24,7	5,4	3,5	1,0
Zn	102,3	58,3	66,8	97,2	121,2
Cr	22,7	24,2	21,9	24,6	32,1
Cu	69,8	23,1	59,1	265,2	75,6
Ni	20,0	27,1	13,6	15,1	21,2
Pb	24,1	74,6	13,8	29,8	15,4
Mn	375,5	363,1	922,4	577,2	1.252
V	350,9	414,1	70,8	75,3	100,4
Ba	34,9	162,4	62,4	84,2	70,6
Co	15,2	13,9	10,8	15,3	23,8
Fe	121.565	139.244	28.229	29.478	40.857

Fuente: CENMA para estudio Ortiz Poblete (2018)

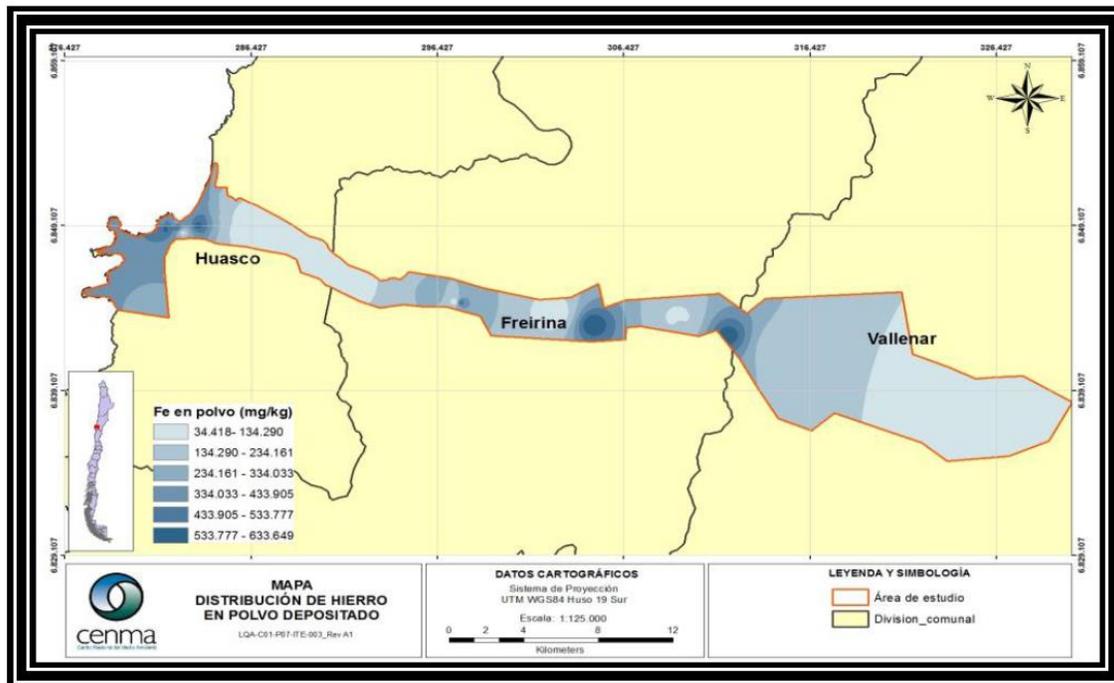


Figura 4-39 Concentración de Fe [mg/kg] en polvo depositado.

Fuente: CENMA para estudio Ortiz Poblete (2018)

El análisis de la concentración de metales en las muestras de polvo negro evaluó las principales fuentes de contaminación de la zona (Central termoeléctrica Guacolda y Planta de Pellet). El estudio obtuvo que las muestras estaban compuestas por Cd, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Mn, V, Ba, Co, y Fe, a su vez se evidenció una excesiva concentración de Fe. Los patrones de distribución para Cd, Fe, V resultaron similares, con altas concentraciones en la ciudad de Huasco, en un sector del valle, coincidiendo con la trayectoria del tren que transporta mineral rico en Fe y V. También, se supera el nivel de *background* en Cd, Pb, V y Fe, determinando que esta superación se debe a la actividad antropogénica propia en la zona que contamina con estos metales. El polvo negro depositado en Huasco fue superior al de Vallenar en Cd, Ni, V, y Fe, producto al uso de petkoke el cual contiene trazas de metales y en su composición azufre, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Además, el polvo depositado en el suelo de Huasco se encontró más concentrado que en el sector industrial, lo que indica que el mecanismo de movilización del polvo es mediante transporte de partículas a nivel del suelo.

Con los antecedentes anteriores, el estudio deduce que existe la presencia de polvo negro por dos fuentes antropogénicas en Huasco: La Central Termoeléctrica Guacolda y el Complejo perteneciente a CAP.

4.4.1.4 Informe Técnico Cumplimiento de Normas de Calidad del Aire por MP10, Plomo, MPS, NO₂ y SO₂

En el informe de SMA (2022) se presenta la evaluación del cumplimiento de las normas de calidad del aire para MP10, norma primaria para NO₂ y Pb, norma secundaria para SO₂ y material particulado sedimentable. Mediante la actividad de fiscalización correspondiente a un examen de información se presentan los datos validados proporcionados por los titulares de Guacolda S.A. y por la Compañía Minera del Pacífico.

El análisis se realizó para el periodo encontrado desde el 1° de enero 2019 hasta el 31 de diciembre 2021, utilizando instrumentos de medición con aprobación EPA. En el caso de muestreo de MPS se monitorearon las estaciones N°1, N°2, N°3, N°4, N°5 y N°6 de CAP que cuentan con la aprobación de la red del Servicio Agrícola y Ganadero, en el estudio se muestra la información detallada a nivel mensual y promedio anual del periodo evaluado.

Con respecto al MPS, la evaluación de la norma mensual se realizó en las 6 estaciones de la red, comparando con el límite máximo establecido en la Ley de 150 mg/m²-día. Los resultados del estudio mostraron que para el año 2019 la norma fue superada a nivel mensual por las 6 estaciones en diciembre, siendo la concentración más alta de 262 mg/m²-día equivalente a 175% del límite mensual. En el año 2020 en la mayoría de los meses la norma mensual no fue superada, a excepción del mes de noviembre cuya concentración más alta observada fue 226,1 mg/m²-día, equivalente a 151% de la norma mensual. Para el año 2021, la mayoría de los meses no fue superada la norma, siendo la concentración más alta observada en el mes de diciembre con 377,7 mg/m²-día equivalente a 252% de la norma mensual.

Tabla 4-34 Concentración mensual para MPS para el periodo del 2019 en [mg/m²-día]

	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
Enero	34,1	69,2	43,5	58,5	55,9	40,7
Febrero	42,7	62,0	48,6	53,9	46,4	59,8
Marzo	28,0	55,6	28,7	36,9	115,2	47,8
Abril	48,9	64,6	50,9	53,9	68,2	66,0
Mayo	66,1	43,9	64,1	57,3	50,9	54,9
Junio	58,7	91,1	45,0	80,5	69,0	48,0
Julio	63,1	66,0	34,8	63,0	56,2	42,3
Agosto	44,3	59,6	54,9	66,8	67,2	51,4
Septiembre	29,7	53,8	26,9	39,5	69,2	49,7
Octubre	*	68,7	56,9	68,2	104,6	77,0
Noviembre	**	105,1	98,2	94,8	104,0	102,6
Diciembre	244,5	257,3	203,8	229,1	204,1	262,0

(*) Estación 1 sin embudo. No se puede calcular el dato debido a que se debe el tiempo real de exposición del muestreo.

(**) Estación 1 se realiza reinstalación de frascos colectores, por embudos sustraídos, se ingresan nuevos valores del área.

Fuente: Elaboración propia con base a los datos de SMA (2022)

Tabla 4-35 Concentración mensual para MPS para el periodo del 2020 en [mg/m²-día]

	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
Enero	64,7	96,2	75,9	113,4	87,8	77,4
Febrero	47,1	56,5	48,4	124,7	57,3	90,8
Marzo	54,4	75,7	45,7	59,2	48,8	46,8
Abril	44,5	55,9	43,5	53,4	55,9	45,1
Mayo	50,7	51,4	44,3	46,0	60,5	47,8
Junio	50,6	61,1	40,3	41,7	54,8	43,3
Julio	71,0	80,8	67,4	93,1	77,4	57,0
Agosto	53,2	65,7	54,2	58,9	87,0	55,4
Septiembre	22,7	76,5	56,7	84,1	84,1	65,6
Octubre	197,0	105,9	79,5	114,9	81,0	96,6
Noviembre	102,8	134,0	80,0	116,9	90,9	226,1
Diciembre	189,9	205,9	136,4	169,1	147,6	157,6

Fuente: Elaboración propia con base a los datos de SMA (2022)

Tabla 4-36 Concentración mensual para MPS para el periodo del 2021 en [mg/m²-día]

	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
Enero	95,0	126,1	72,8	92,5	74,1	88,8
Febrero	79,1	66,5	51,1	63,8	48,8	64,0
Marzo	73,1	104,5	77,2	158,7	81,2	85,8
Abril	55,6	82,8	67,4	96,3	59,9	61,9
Mayo	69,5	107,6	58,0	51,2	62,6	50,6
Junio	30,8	38,6	45,4	56,3	29,4	25,1
Julio	27,8	26,8	46,5	33,2	23,6	35,6
Agosto	38,9	97,1	35,6	51,1	39,9	37,3
Septiembre	70,8	100,5	74,8	79,9	77,1	84,3
Octubre	61,3	127,8	64,6	84,8	142,3	89,7
Noviembre	64,9	151,6	93,7	114,5	104,2	127,9
Diciembre	175,6	377,7	240,9	228,2	229,0	236,1

Fuente: Elaboración propia con base a los datos de SMA (2022)

En la Tabla 4-37 se muestra el promedio de concentraciones a nivel anual para el periodo evaluado. De los resultados se obtiene que la norma de MPS no fue superada en los años 2019 y 2020, pero se observa superación al 80% del límite de la norma anual. En el año 2021 fue superada en la estación 2 con una concentración de 117,3 mg/m²-día (en un 117%), además en las estaciones N°2, N°4 y N°5 se observa una superación al 80% de la norma, presentando latencia. Las máximas concentraciones promedio entre las estaciones de monitoreo fueron: para el año 2019 un valor de 84,2 mg/m²-día, en el 2020 con 89,6 mg/m²-día y 2021 con 117,3 mg/m²-día.

Tabla 4-37 Concentraciones anuales para MPS para el periodo 2019-2021 en [mg/m²-día]

Año	2019	2020	2021
Estación N°1	_(a)	79,1	70,2
Estación N°2	83,1	88,8	117,3
Estación N°3	63,0	64,4	77,3
Estación N°4	75,2	89,6	92,5
Estación N°5	84,2	77,8	81,0
Estación N°6	75,2	84,1	82,3

(a): Número de meses menor a lo requerido para calcular la concentración anual.

Fuente: Elaboración propia con base a los datos de SMA (2022)

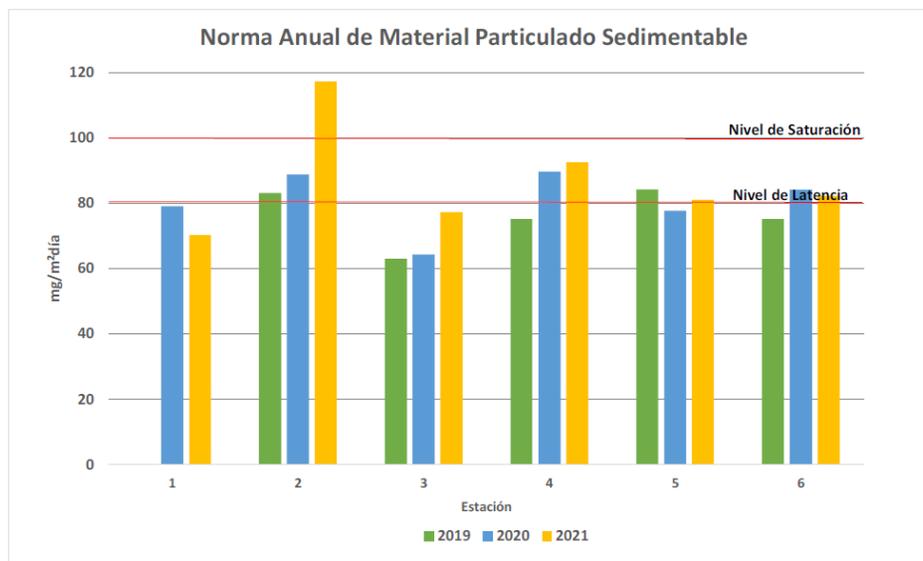


Figura 4-40 Gráfico de concentración anual de MPS para los años 2019, 2020 y 2021

Fuente: SMA (2022)

Con respecto al nivel mensual para hierro en MPS, se evalúa según normativa en dos periodos según lo estipulado en D.S. N°4/1992. Se compara con el límite de 60 mg/m²-día entre el 15 de diciembre y 31 de agosto y 30 mg/m²-día para los desde 1 septiembre a 15 diciembre. En el año 2019 no se observa una superación de norma ni latencia en ambos periodos que evalúa la norma. Para el año 2020, no fue superada la norma entre enero y agosto, pero se observa superación del 80% del límite para el periodo de septiembre, octubre, noviembre, y primera mitad de diciembre con concentraciones de 24,65 mg/m²-día, 26,3 mg/m²-día y 25,6 mg/m²-día respectivamente. Para el 2021, la norma mensual no fue superada entre enero y agosto, pero se observó una superación en la segunda quincena de diciembre con 76,6 mg/m²-día y se observan superaciones al 80% del límite de la norma en noviembre y primera quincena de diciembre con concentraciones de 27,2 mg/m²-día y 24,9 mg/m²-día.

Tabla 4-38 Concentración mensual para hierro en MPS para el periodo del 2019 en [mg/m²-día]

	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
Enero	3,99	5,15	4,53	6,01	5,95	3,42
Febrero	3,01	4,53	5,13	4,54	4,64	6,07
Marzo	2,30	2,30	1,75	2,82	2,25	2,26
Abril	19,12	18,36	19,41	18,66	20,69	16,22
Mayo	27,90	17,74	21,26	20,18	17,08	13,52
Junio	21,96	21,49	13,90	17,23	15,66	10,43
Julio	23,98	18,94	11,42	16,67	11,77	10,02
Agosto	5,73	6,00	5,97	7,60	10,54	5,36
Septiembre	2,70	3,25	3,77	4,19	5,05	4,01
Octubre	*	7,92	11,74	6,46	11,56	10,60
Noviembre	**	14,72	22,12	18,33	18,46	14,53
Diciembre¹	20,82	17,63	20,43	16,48	18,68	16,16
Diciembre²	28,49	25,71	24,26	25,22	23,89	19,34

(*) Estación 1 sin embudo. No se puede calcular el dato debido a que se debe el tiempo real de exposición del muestreo.

(**) Estación 1 se realiza reinstalación de frascos colectores, por embudos sustraídos, se ingresan nuevos valores del área.

¹Reporte primera quincena de diciembre.

²Reporte de segunda quincena de diciembre.

Fuente: Elaboración propia con base a los datos de SMA (2022)

Tabla 4-39 Concentración mensual para hierro en MPS para el periodo del 2020 en [mg/m²-día]

	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
Enero	18,39	18,26	20,60	24,33	20,95	13,95
Febrero	4,98	3,00	4,33	15,44	5,70	5,07
Marzo	9,29	3,47	9,14	10,17	9,19	7,63
Abril	9,92	9,79	11,06	13,05	15,20	10,72
Mayo	8,88	9,11	11,34	9,18	12,27	9,16
Junio	10,66	10,52	10,31	8,32	11,11	8,30
Julio	16,54	14,64	10,78	13,84	11,39	11,09
Agosto	5,98	7,27	7,78	7,85	7,86	6,73
Septiembre	3,95	7,91	9,80	8,76	9,49	9,68
Octubre	16,57	7,70	12,55	11,30	6,88	12,56
Noviembre	17,72	24,64	26,30	25,60	22,55	9,52
Diciembre¹	17,30	16,47	15,58	14,57	14,11	13,25
Diciembre²	11,97	7,49	11,70	8,31	12,14	10,32

¹Reporte primera quincena de diciembre.

²Reporte de segunda quincena de diciembre.

Fuente: Elaboración propia con base a los datos de SMA (2022)

Tabla 4-40 Concentración mensual para hierro en MPS para el periodo del 2021 en [mg/m²-día]

	Estación N°1	Estación N°2	Estación N°3	Estación N°4	Estación N°5	Estación N°6
Enero	17,57	18,52	17,12	16,11	19,06	19,69
Febrero	11,86	4,63	7,52	10,16	7,66	8,48
Marzo	11,55	17,06	19,02	28,20	14,69	16,52
Abril	10,80	12,10	16,00	13,50	13,10	10,20
Mayo	12,90	13,30	12,90	10,90	11,60	11,20
Junio	9,60	4,60	2,00	5,50	3,80	3,50
Julio	1,00	4,20	6,00	7,00	5,70	4,40
Agosto	10,20	14,10	10,00	0,50	7,90	10,10
Septiembre	17,20	13,70	20,10	14,20	13,20	14,80
Octubre	6,80	7,90	8,70	6,60	8,90	6,00
Noviembre	3,80	11,90	3,60	15,60	13,60	27,20
Diciembre¹	16,50	18,20	15,90	19,90	22,20	24,90
Diciembre²	1,70	76,60	13,40	9,20	11,80	31,10

¹Reporte primera quincena de diciembre.

²Reporte de segunda quincena de diciembre.

Fuente: Elaboración propia con base a los datos de SMA (2022)

En la Tabla 4-41 se muestra el promedio de concentraciones a nivel anual del nivel de Hierro en MPS y en la Figura 4-41 se muestra el gráfico respectivo. El máximo permisible anual es 30 mg/m²-día como concentración media aritmética, se observa que a nivel anual no se presentan superaciones en los periodos 2019, 2020, 2021. La concentración más alta de las estaciones durante el año 2021 se observa con 18,1 mg/m²-día equivalente al 60% de la norma anual. Las máximas concentraciones promedio entre las estaciones de monitoreo fueron: el año 2019 con 13,9 mg/m²-día, en el 2020 con 14,2 mg/m²-día y 2021 con 18,1 mg/m²-día equivalente al 60% del límite de la norma.

Tabla 4-41 Concentraciones anuales para hierro en MPS para el periodo 2019-2021

Año	2019	2020	2021
Estación N°1	60	12,7	11
Estación N°2	13,6	11,7	18,1
Estación N°3	13,8	13,4	12,7
Estación N°4	13,7	14,2	13,1
Estación N°5	13,9	13,2	12,8
Estación N°6	11	10,7	15,7

Fuente: Elaboración propia con base a los datos de SMA (2022)

⁶⁰ Número de meses menor a lo requerido para calcular la concentración anual.

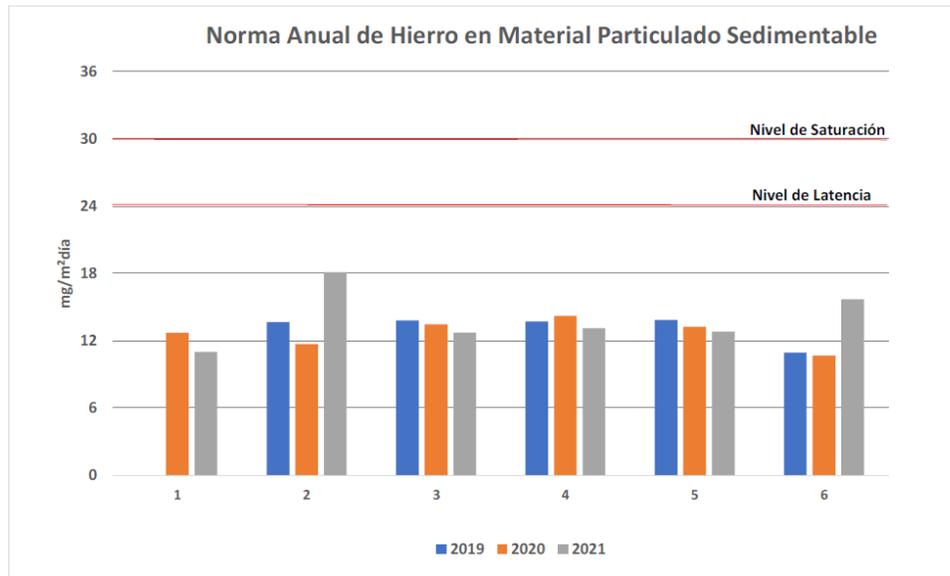


Figura 4-41 Gráfico de concentración anual de hierro en MPS para los años 2019, 2020 y 2021
Fuente: SMA (2022)

4.4.1.5 Comparación y conclusiones de estudios de MPS en la zona de Huasco

Los estudios anteriores recopilan la caracterización de MPS en el tiempo para la zona de Huasco. En DICTUC & Facultad de Agronomía PUC (2012) se realiza un estudio que evalúa las concentraciones específicas de julio a diciembre del 2011, en GAC consultores (2014) presenta los valores desde 2008 al 2014, en Ortiz Poblete (2018) se realiza una caracterización del polvo negro para los meses de diciembre 2015 a febrero 2016 y por último en SMA (2022) se presenta el informe de cumplimiento con lo monitoreado desde 2019 al 2021. En todos los estudios se evalúan las concentraciones de MPS y hierro en MPS, comparándolo con la normativa nacional existente.

En DICTUC & Facultad de Agronomía PUC (2012) se observa gran variabilidad de concentración de MPS entre un sitio y otro cercano, lo que indica que el tipo de medición de partículas sedimentables están afectadas por actividades locales no asociadas al complejo industrial como manejo de suelos agrícolas tránsito de vehículos por caminos sin pavimentar, etc. El monitoreo realizado no puede estimar con precisión hasta dónde llega la influencia del complejo industrial en el valle.

En GAC consultores (2014) se observa la tendencia a la baja de los datos de concentraciones anuales observados desde 2008 – 2014 tanto la sedimentación de MPS como hierro en MPS. En el periodo evaluado, se observó la mayor concentración la media anual del 2008 para la Estación N°5 con 100,2 mg/m²-día, en el último año evaluado se observa concentraciones medias máxima de 88,4 mg/m²-día en la Estación N°2 y mínima de 56,0 en la Estación N°1.

En Ortiz Poblete (2018) los resultados de MPS insoluble indican que los puntos de muestro más cercanos a la Central Guacolda y Planta de Pellets presentaban mayores concentraciones de MPS en el tiempo de estudio, específicamente la concentración más alta en la estación MPS-1 (Casa Miguel Marambio) fue en febrero 2016 con 546,1 mg/m²-día y en la estación MPS-2 (Escuela Básica Mirella Zuleta) fue 315,9 mg/m²-día en el mes de enero 2016, representando superaciones de 564% y 315% de superación respectivamente. También, la estación MPS-1 presenta las mayores concentraciones de los metales estudiados, el estudio determina que el MPS está compuesto mayoritariamente por elementos como hierro (Fe), magnesio (Mg), calcio (Ca) y aluminio (Al), elementos que se encuentran naturalmente en el suelo y también tienen aporte de las fuentes contaminantes.

En SMA (2022) se evaluó el cumplimiento de las normas de calidad del aire en la zona de Huasco, para el MPS se consideraron las estaciones de monitoreo de la red CAP S.A. Con respecto a las concentraciones de MPS, la evaluación de la norma mensual mostró que para el 2019 la norma no fue superada en la mayoría de los meses, excepto por diciembre en la que las 6 estaciones se observó superación y la más alta observada fue en la estación 6 con 262 mg/m²-día, un 175% del límite mensual. En el 2020 se observó el cumplimiento de la mayoría de los meses con excepción de seis ocasiones, se superó la norma en la estación 1 en octubre, estación 6 en noviembre y en diciembre en 4 estaciones, la concentración más alta observada fue en la estación 6 en el mes de noviembre con 226,1 mg/m²-día superando un 151% la norma mensual. Finalmente en el 2021, se superó la norma en marzo en la estación 4, noviembre en la estación 2 y diciembre en las 6 estaciones, la concentración más alta observada fue en la estación 2 en diciembre con 377,7 mg/m²-día, un 252% de la norma mensual. A nivel anual, en el 2019 y 2020 no hubo superación, pero si se observa una superación del 80% del límite, en el 2021 fue superado en la estación 2 con 117,3 mg/m²-día, un 117% de la norma anual.

Por el lado de el monitoreo de hierro en MPS, en el 2019 no se observó superación de la norma a nivel mensual, en el 2020 tampoco se observó superación, pero si hubo superación del 80% en las estaciones 2, 3 y 4 con concentraciones 24,64 mg/m²-día, 26,3 mg/m²-día y 25,6 mg/m²-día respectivamente. Para el 2021 se superó en una ocasión la segunda quincena de diciembre en la estación dos con 76,6 mg/m²-día y también se observa superación al 80% del límite en noviembre y primera quincena de diciembre en la estación 6 con 27,2 mg/m²-día y 24,9 mg/m²-día respectivamente. A nivel anual no fue superada la norma en ninguna de las estaciones en los años 2019, 2020 y 2021, la concentración más alta se observa en el 2021 en la estación 2 con 18,1 mg/m²-día equivalente al 60% del límite.

Al comparar las concentraciones mensuales y anuales se evidencia que la Norma de Calidad del Aire no ha sido superada a nivel general, en casos puntuales de monitoreo se presentaba un nivel de latencia o superación de la en estaciones específicas más cercanos a las instituciones. En la Tabla 4-42 se muestra un resumen de los estudios recopilados. En la columna de "Concentración MPS" se muestran los valores mínimos, máximos y promedio encontrados entre las estaciones de monitoreo o punto de muestreo de los diferentes estudios.

Tabla 4-42 Resumen de estudios realizados en la zona de Huasco

Título del estudio	Referencias	Contenido	Periodo de evaluación	Rango Concentración MPS [mg/m ² -día]			Rango de Concentración de hierro en MPS [mg/m ² -día]		
				min	prom	max	min	prom	max
Estudio Para Evaluar el impacto de la Contaminación Atmosférica Sobre el Rubro Olivícola, Sector Costero Valle del Huasco.	DICTUC & Facultad de Agronomía PUC, 2012.	Evaluación de impactos ambientales negativos producidos por la emisión de contaminantes atmosféricos en la zona costera del Valle Huasco. Se realiza un estudio complementario de MPS evaluando desde julio a diciembre 2011.	2011	23,4	47,5	87,5	2,2	7,1	20,4
Emisiones y calidad del aire en Huasco.	GAC, 2016.	Caracterización de las emisiones en Huasco, identificando emisiones por tipo de fuente en el complejo industrial. Se muestra la caracterización de línea base de MPS para el periodo 2008 – 2014.	2008	79,4	90,6	100,2	20,6	22,6	24,5
			2009	70,5	81,2	87,5	13,3	16,9	26,7
			2010	78,5	88,1	96,8	15,1	18,1	20,6
			2011	64,2	77,5	89,3	11,4	14,6	16,8
			2012	62,5	71,5	80,4	10,1	13,9	19,4
			2013	66,1	74,0	83,8	10,6	12,2	16,8
			2014	56,0	71,0	88,4	8,7	11,4	13,5
Caracterización de polvo negro en la comuna de Huasco, III Región.	Ortiz Poblete, 2018.	Análisis de metales presentes en el polvo negro en Huasco. Se realiza la caracterización de MPS desde diciembre 2015 hasta febrero 2016. Además, se presenta background de valores promedio de metales en el suelo.	2016	62,4	132,3	357,4	N/A	N/A	N/A
Informe Técnico Cumplimiento de Normas de Calidad del Aire por MP10, Pb, MPS, NO2 y SO2.	SMA, 2022.	Evaluación del cumplimiento de normas de calidad en las redes de calidad del aire de Huasco para el periodo 2019 – 2021.	2019	63	76,1	84,2	11	13,2	13,9
			2020	64,4	80,6	89,6	10,7	12,65	14,2
			2021	70,2	86,8	117,3	11	13,9	18,2

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Resultados de investigaciones científicas que aportan a las actualizaciones sobre efectos del MPS en recursos naturales

A continuación, se resumen los artículos científicos seleccionados luego de una revisión bibliográfica sobre los efectos del MPS en distintos recursos naturales. La búsqueda se centró sobre todo en el impacto en especies vegetales. El motor de búsqueda utilizado fue Clarivate (conocido anteriormente como Web of Science). Las palabras claves utilizadas en la búsqueda se listan a continuación:

iron work – iron smelter – steel industry - plants – agriculture – heavy metal – magnetite – hematite – iron oxides – settleable particulate matter – dust – dust deposition – leaf traits – leaf deposition – foliage – water

4.4.2.1 A Review on Seasonal Changes in Particulate Matter Accumulation by Plant Bioindicators: Effects on Leaf Traits

En el estudio realizado por Ghosh et al. (2023) se estudian todos los posibles cambios en las características de las hojas de distintas especies de plantas, causadas por el depósito de material particulado de distintos tamaños, incluyendo MP con diámetro superior a 10 μm . Adicionalmente, se revisa la captura de MP en función de las variaciones estacionales. Cabe mencionar que este estudio es una revisión bibliográfica exhaustiva, por lo que no se conducen experimentos u observaciones y no está asociado a un único lugar de estudio.

En específico, en cuanto al MP de diámetro superior a 10 μm , se observó que estas partículas afectan el área foliar específica⁶¹, que es una propiedad de las hojas significativamente mayor en zonas contaminadas, por lo que en la literatura se ha planteado que es una de las características asociadas a la respuesta adaptativa de las plantas en ambientes contaminados.

El estudio concluye que las hojas, en respuesta al estrés abiótico causado por la contaminación por material particulado evolucionan creando mecanismos de defensa a través de cambios bioquímicos, fisiológicos y morfológicos, que buscan que la planta se adapte al ambiente tóxico.

4.4.2.2 Combined effects of different leaf traits on foliage dust-retention capacity and stability

El estudio realizado por Xu et al. (2022) en China tiene como objetivo determinar qué características del follaje de una planta son determinantes en la retención de MP de distintos tamaños. Para ello, se analizó la capacidad de retención de las hojas de seis especies distintas: *Forsythia suspensa (Thunb.) Vahl*, *Hibiscus syriacus L.*, *Cerasus serrulata var. Lannesiana (Carri.)*

⁶¹ Área por masa seca de la hoja.

Makino, *Ligustrum quihoui* Carr., *Rhus typhina* y *Euonymus japonicus* Thunb. La metodología consistió en tomar muestras de las especies de interés y el análisis se realizó con el método de enjuague y pesaje. Esto permitió cuantificar la retención de MP y el diámetro de las partículas.

El análisis preliminar arrojó que la componente dominante del polvo depositado en las hojas era PM₁₀₀, con rangos de entre 99,36% hasta 99,7% del total de MP depositado para las distintas especies. En cuanto a la capacidad de retención de PM por unidad de área, independiente del diámetro de las partículas, esta disminuye en la medida en que incrementa el tamaño de la hoja. Sin embargo, la retención de MP por hoja incrementa en la medida en que el tamaño de la hoja crece. Esto último se debe a que mientras mayor sea el área de la hoja, provee de una mayor superficie para el depósito de MP.

Adicionalmente, se estudiaron otros rasgos foliares que podrían impactar potencialmente la capacidad de retención de MP. En el caso de la relación largo-ancho, se determinó que no impacta la retención de MP, mientras la presencia de pelos vegetales tiene un impacto positivo en la retención de MP, debido a que incrementa la superficie para el depósito de polvo y hace que su remoción sea más difícil.

4.4.2.3 Seasonal variation of dust deposition on plant leaves and its impact on various photochemical yields of plants

En el estudio realizado por Meravi et al. (2021) se estudiaron 23 especies de plantas (ver Tabla 4-43) situadas en las cercanías de una planta termoeléctrica localizada en India, con el fin de determinar el impacto de la presencia de polvo en los parámetros fotosintéticos de las distintas especies vegetales. Adicionalmente, se estudia la variación estacional en el depósito de polvo en las plantas.

Tabla 4-43 Lista de especies y sus respectivas familias

Nombre de la especie	Familia	Nombre de la especie	Familia
<i>Calotropis procera</i>	Asclepiadaceae	<i>Madhuca indica</i>	Sapotaceae
<i>Butea monosperma</i>	Papilionaceae	<i>Plumeria acutifolia</i>	Apocynaceae
<i>Zizyphus mauritiana</i>	Rhamnaceae	<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae
<i>Zizyphus nummularia</i>	Rhamnaceae	<i>Eukalyptus sp</i>	Myrataceae
<i>Mangifera indica</i>	Anacardiaceae	<i>Bauhinia purpurea</i>	Caesalpiniaceae
<i>Ficus religiosa</i>	Moraceae	<i>Cassia fistula</i>	Caesalpiniaceae
<i>Ficus benghalensis</i>	Moraceae	<i>Acacia auriculiformis</i>	Mimosaceae
<i>Delbergia sisso</i>	Papilionaceae	<i>Nerium indicum</i>	Apocynaceae
<i>Azadirachta indica</i>	Meliaceae	<i>Thevetia nerifolia</i>	Apocynaceae
<i>Dendrocalamus strictus</i>	Poaceae	<i>Melia azedarach</i>	Meliaceae
<i>Aegle marmelos</i>	Rutaceae	<i>Bombax ceiba</i>	Bombacaceae
<i>Annona squamosa</i>	Annonoaceae		

Fuente: Meravi et al. (2021)

Se determinó que el polvo depositado en las plantas contiene distintos metales pesados. Meravi et al. (2021) mencionan que en la literatura ya se ha demostrado que existe una relación entre la exposición a metales pesados y respuestas fisiológicas por parte de las plantas, tales como cambios en el contenido de clorofila y en la actividad fotosintética. Además, como principal resultado se obtuvo que el depósito de polvo causa impactos adversos en los parámetros fotosintéticos y afecta negativamente la productividad de la planta, especialmente en climas cálidos, secos y con alta irradiación en verano.

En relación con la respuesta y capacidad de retención de las distintas especies estudiadas, se determinó que aquellas que mayor cantidad de MP retienen son las que poseen superficies rugosas, pelos vegetales, cera, gran tamaño de hoja y pecíolos pequeño. Las primeras características fisiológicas mencionadas contribuyen a la mayor adherencia de la partícula en la hoja y a incrementar el área de depósito, mientras que la última reduce el movimiento de las hojas. Adicionalmente, en el estudio se determinó que las condiciones meteorológicas también influyen en la cantidad de MP retenido en las hojas. Por un lado, la presencia de humedad ambiental, que generalmente ocurre en invierno, contribuye a la retención de partículas. Por otro lado, en el período seco, que en general es el período estival, disminuye. Así mismo, en las épocas lluviosas la retención también disminuye debido a que la concentración ambiental de MP baja.

4.4.2.4 Impact of dust accumulation on the physiological functioning of selected herbaceous plants of Delhi, India

El objetivo del estudio realizado por Chaurasia et al. (2022) en Delhi, India es evaluar la acumulación de polvo en la superficie de las hojas y entender el efecto de esto en distintos aspectos del metabolismo de las plantas. El estudio comprendió el análisis de una variedad de cinco especies herbáceas (*Amaranthus viridis*, *Achyranthes aspera*, *Acalypha indica*, *Parthenium hysterophorus*, *Trianthema portulacastrum*), localizadas en dos sitios con distintos niveles de contaminación. El primer sitio, localizado en un centro botánico, presentaba bajos niveles de contaminación, mientras que el segundo presentaba altos niveles causados por un alto flujo vehicular y la actividad de una zona industrial cercana. El primer sitio se utilizó como el caso control dentro del estudio.

Para el análisis, se tomaron las muestras de las plantas de ambos sitios, luego fueron lavadas con agua destilada en una placa Petri, desde donde luego se evaporó para posteriormente pesar el material restante en la placa, de forma que la diferencia entre el peso antes y después de la evaporación es equivalente al polvo acumulado por la hoja.

En cuanto a la retención por especie, aquella que retuvo una mayor cantidad de polvo en ambos sitios fue la *A. aspera*, mientras que la especie que menos retuvo fue *T. portulacastrum*. Además, la cantidad de polvo acumulado en la superficie incrementó significativamente con la duración de la exposición a contaminación en todas las especies.

En relación con la actividad metabólica, las especies del sitio contaminado mostraron menor eficiencia fotosintética, tasa de intercambio de gases reducida y menor eficiencia en el uso del agua. La disminución en la tasa de intercambio de gases se puede deber al bloqueo físico de las estomas al depositarse partículas de pequeño tamaño en ellos, lo que a su vez genera que la tasa de transpiración y fotosíntesis decrezcan.

Chaurasia et al. (2022) discuten que la reducción en la tasa fotosintética podría deberse a la disminución del nivel de radiación fotosintéticamente activa que alcanza a la antena de clorofila, debido al revestimiento de polvo que cubre la superficie de la hoja. Así mismo, la cobertura de polvo podría estar aumentando la absorbancia de la radiación incidente y por ende la temperatura de la hoja, lo que explicaría el aumento significativo de la tasa de transpiración en la *A. aspera*.

En cuanto a cómo se comportaron las distintas especies, las plantas con mayor capacidad acumuladora de polvo (i.e. *A. aspera*) fueron aquellas que exhibieron la mayor reducción en la tasa fotosintética, mientras que las especies con menor capacidad acumuladora (i.e. *A. viridis*) mostraron una mínima reducción.

Finalmente, el estudio concluye que la acumulación de polvo lleva a cambios sustanciales en la fisiología de la planta, lo que se evidencia en una disminución de clorofila, tasa de fotosíntesis y conductividad de las estomas. Además, la actividad antioxidativa, ascorbato y metabolitos fueron mayores en las plantas en el sitio de mayor contaminación, lo que evidencia una mayor actividad protectora por parte de la planta.

4.4.2.5 Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes

El estudio elaborado por Nadgórska–Socha et al. (2017) analiza el potencial de biomonitoreo y los patrones de bioacumulación de metales pesados de cuatro especies vegetales presentes en el sitio de estudio: *Taxacum officinale*, *Plantago lanceolata*, *Betula pendula* y *Robinia pseudocacia*. Las dos primeras son especies herbáceas y las dos últimas son especies arbóreas.

En específico, se analiza la acumulación de Zn, Pb, Cd, Cu, Mn y Fe en una ciudad reconocida por estar dentro de una región industrializada al sur de Polonia y por ser una de las más contaminadas dentro del país. Dentro de esta región hay distintas industrias dedicadas a la siderurgia, plantas de procesamiento de residuos, planta productora de *coke* y grandes avenidas con alto flujo vehicular. Para analizar la acumulación de los metales antes mencionados, se calcula el Índice de Acumulación de Metales (MAI, por su nombre en inglés). Mientras mayor sea el valor de este índice, mejor desempeño tiene una especie a ser plantada en zonas contaminadas.

Las muestras de hojas de las especies y de suelo fueron tomadas desde un total de 10 sitios distintos. De estos, 3 sitios se encontraban directamente a las afueras de la planta de fundición de hierro, más específicamente en una calle adyacente a la planta, en el estacionamiento y en

una segunda calle aledaña localizada entre la fundición de hierro y la planta de producción de *coke*. El resto de los sitios se localizaba en las cercanías de la planta de *coke*, zonas con alto tráfico vehicular, centro de la ciudad y un área verde alejada del centro de la ciudad.

Los resultados arrojaron un alto contenido de Pb en el follaje de *P. lanceolata* en los sitios más cercanos a la industria siderúrgica, mientras que la mayor concentración de Fe fue hallada en la misma especie en uno de los sitios con alto flujo vehicular. Además, en general, las concentraciones más altas de Fe fueron halladas en las plantas cercanas a la industria de hierro y la planta de *coke*. En el caso del suelo, la mayor concentración de Cd, Mn, Fe, Zn y Pb fue encontrado en las muestras tomadas en la avenida adyacente a las tres industrias antes mencionadas y en una avenida con alto tráfico

En general, se encontraron menores niveles de clorofila en las plantas localizadas en las inmediaciones de las industrias para las 4 especies estudiadas. Mientras que las mayores concentraciones de ácido ascórbico se encontraron en el follaje de plantas cercanas a avenidas con alto tráfico y en *T. officinale* en los sitios cercanos a emisiones industriales.

Las autoras discuten que la nutrición de las plantas depende significativamente de la composición del suelo, y que el Fe es un componente presente de forma natural en estos, y que de hecho en Polonia está presente en altas concentraciones alcanzando un 1,8%. Sin embargo, mencionan, que en zonas altamente urbanizadas esta concentración se eleva aún más.

Los metales más acumulados en las zonas investigadas eran Zn y Fe. La concentración de Fe, Zn, Pb y Cd en las hojas de las especies estudiadas mostraron mayor diferenciación que el Cu y e Mn entre los distintos estudios consultados. Esto sugiere que el nivel de estos metales (Fe, Zn, Pb y Cd) está más influenciado por las emisiones de la industria local, tráfico y actividad.

Finalmente, Nadgórska–Socha et al. (2017) concluyen que hay diferencias entre la concentración de metales acumulados en las plantas y presente en los sitios seleccionados. Lo que confirma que el contenido de metales depende de las especies. Además, en cuanto al MAI, la tolerancia de las especies, en orden descendente, es *B. pendula* > *P. lanceolata* > *T. officinale* > *R. pseudocacia*.

4.4.2.6 Atmospheric particulate matter from an industrial area as source of metal nanoparticle contamination in aquatic ecosystems

El estudio realizado por Souza et al. (2021) tiene como objetivo entender cómo el material particulado sedimentable puede contribuir a la contaminación acuática al asentarse en agua. Para ello, se toma como sitio de estudio las cercanías de un complejo industrial de acero localizado en la Bahía Vitória en Brasil. La hipótesis por testear es que las partículas de tamaños no incluidos en las regulaciones de calidad del aire presentan un peligro mayor para los sistemas acuáticos y atmosféricos.

Para ello, se tomaron muestras de MPS desde los techos (a 20 m de altura con respecto al suelo) de las cercanías de Vitória por 30 días consecutivos. Estas muestras se fraccionaron según 8 rangos de tamaño: 425 a 250 μm , 250 a 150 μm , 150 a 75 μm , 45 a 32 μm , 32 a 22 μm , 22 a 10 μm y menores a 10 μm . Estas fracciones fueron analizadas física y químicamente.

Posteriormente, el MPS fue caracterizado en función del tamaño de las partículas, potencial de aglomeración y cargas superficiales. El análisis químico consideró la medición de 27 elementos: B, Al, V, Cr, Mn, Fe56, F57, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ag, Cd, Sn, Ba, La, Se, Ta, W, Hg201, Hg202, Pb y Bi.

Los resultados del análisis mostraron que cada fracción de MPS estaba constituida por aglomeraciones de nanopartículas de tamaño entre 14,2 a 467 nm. Además, el metal que se encontraba en mayor concentración era el hierro, que alcanzó un total de entre 80-90% según fracción. En la Tabla 4-44 se puede observar la concentración de Fe56 y Fe57 en el material particulado. Luego, al analizar el diámetro hidrodinámico del MPS disuelto en agua, se confirma la presencia de partículas de tamaño nanométrico.

Souza et al. (2021) discuten que los resultados obtenidos muestran que las aglomeraciones de nanopartículas que componen el MPS, al disolverse en agua, se dispersan y liberan pequeñas partículas, nanopartículas y probablemente elementos disueltos, que se transforman en una fuente de contaminación en el medio acuático. Lo anterior, respaldaría la hipótesis de que el MPS representa una amenaza inminente para los ecosistemas acuáticos. Por ende, además de la vía de exposición aérea, en las regulaciones se debería considerar una segunda vía de exposición, considerando que los sistemas acuáticos podrían ser receptores directos o indirectos de MPS. Además, se debería tener en cuenta que las nanopartículas presentes en el MPS pueden pasar a formar parte de la biota acuática y ser transferida a los seres humanos a través de la ingesta de alimentos.

Tabla 4-44 Concentración de Fe56 y Fe57 en material particulado atmosférico recolectado en Vitória, Brasil.

Isotopo	MP total [$\mu\text{g mL}^{-1}$]	MPS [$\mu\text{g mL}^{-1}$]
Fe56	823005	630320
Fe57	825454	631002

Nota: MP total es la suma de todas las fracciones de material particulado y MPS es la suma de todas salvo de aquellas partículas de diámetro menor a 10 μm .

Fuente: Elaboración propia a partir de Souza et al. (2021).

4.4.2.7 Metal/metalloid bioconcentration dynamics in fish and the risk to human health due to water contamination with atmospheric particulate matter from a metallurgical industrial area

El MPS está constituido de diferentes metales, incluyendo nanopartículas metálicas, y su concentración ha ido en aumento en el mundo. Esto podría causar problemas ambientales y contaminación de la biota. Frente a esto Fortes et al. (2023) realizaron un estudio en Vitória, Brasil con el objetivo de evaluar la biodisponibilidad de metales en agua y la bioconcentración de estos en la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) luego de una exposición de 30 días a MPS, para luego evaluar los riesgos a la salud humana producto de la ingesta de metales contenidos en la tilapia. Para ello, se tomaron muestras de MPS en un punto localizado a 14 km de la planta de procesamiento de hierro y acero. Paralelamente, se condujo un experimento con un total de 222 tilapias, divididas en dos grupos: el grupo control y el expuesto. A los acuarios del grupo expuesto se añadió MPS.

Por un lado, los resultados en relación con el MPS arrojaron que estaba compuesto mayoritariamente de Fe, seguido de Al, Ti, Mn y Zn. Por otro lado, la concentración de metales en agua varió a lo largo del tiempo del experimento y en el caso de los metales de interés (Fe, Al, Ti, Mn, Cu, Pb, Ce, La, Zr, Y y Cr), la concentración en el grupo expuesto fue siempre mayor que en el agua del grupo de control, salvo en el caso de elementos como B, Rb, Ni y W, en donde la concentración a lo largo del tiempo siguió el mismo patrón en ambos grupos.

En cuanto a los peces, ninguno pereció durante el experimento. La concentración de metales incrementó en las vísceras y el filete de los individuos expuestos a MPS, en comparación al grupo de control. Además, se evidenció una bioconcentración significativamente mayor en las vísceras que en el filete. En cuanto al efecto que esto tiene en la salud del pez se evidencia que el MPS induce estrés oxidativo en los glóbulos rojos y reduce el contenido de hemoglobina en las células, lo que lleva a la disminución en la capacidad de transportar oxígeno.

Los resultados asociados a salud humana indicaron que el consumo de largo plazo puede tener impactos negativos, asociados a la bioacumulación de As, Zr, La y Hg en niños y que por ende no es seguro su consumo bajo los estándares propuestos por la Organización Mundial de la Salud.

Finalmente, Fortes et al. (2023) concluyen que la mezcla de metales que componen el MPS es una fuente de contaminación del agua y peces. Aunque los impactos no son letales, la bioacumulación de metales en las vísceras y filete son perjudiciales para el estado de salud del pez y es además una vía de exposición para los seres humanos, entre quienes el grupo etario más vulnerable serían los niños.

4.4.2.8 Uptake of iron oxide nanoparticles inhibits the photosynthesis of the wheat after foliar exposure

El estudio elaborado por Lu et al. (2020) se enfoca en la captación, translocación y efectos de la exposición del follaje de trigo a $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ (nanopartículas de óxido de hierro), en distintas concentraciones (0, 60 y 180 μg por planta) y por distintos períodos de tiempo (1, 7, 14 y 21 días). Este estudio se realizó en condiciones de laboratorio, con la conducción de un experimento por

parte del equipo investigador, por lo que no está asociado a las condiciones climáticas, atmosféricas o geográficas de algún sitio en específico.

Una vez finalizado el experimento, que consistió en exponer plántulas de trigo a distintas concentraciones de $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ por distintos periodos de tiempo, se cosecharon las raíces, tallos y hojas. Luego, se realizó un análisis de estas componentes para comprender la influencia de la exposición al contaminante en los parámetros de crecimiento de la planta. Se observaron y compararon aspectos como la longitud y grosor del tallo, masa de las componentes y contenido de clorofila.

Los resultados obtenidos sugieren que los impactos de la exposición a $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ afectan de distinta forma a las plantas y están fuertemente asociados a la dosis aplicada. Los tallos de las plántulas expuestas eran más delgados y largos que en el grupo de control, lo que podría impactar negativamente la resistencia del trigo al acame⁶². De forma similar, aquellas plántulas expuestas a la mayor dosis (180 μg) exhibieron una menor masa seca en comparación al grupo de control. Las plántulas expuestas a la dosis intermedia (60 μg) no mostraron diferencias significativas en la longitud de las hojas, tallo o raíces con respecto al grupo de control.

Lu et al. (2020) argumentan que el hierro es un nutriente esencial para las plantas. Sin embargo, según se evidencia en los resultados, su acumulación en exceso puede resultar tóxica. Los resultados demostraron que la aplicación foliar de $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ resultó en la acumulación de esta nanopartícula a través de las estomas, que fue luego translocada desde las hojas hasta el tallo y las raíces. La presencia de $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ en las hojas desencadenó una reacción tipo Fenton y una generación de OH en exceso. Esto perturbó la homeostasis redox, y por lo tanto causó estrés oxidativo. Adicionalmente, el exceso de OH causó una aceleración en la degradación de la clorofila, lo que resultó en un menor contenido de este pigmento y menor fotosíntesis, y que tiene como consecuencia la inhibición de producción de biomasa.

4.4.2.9 Groundwater quality assessment in an industrial hotspot through interdisciplinary techniques

El objetivo principal del estudio elaborado por Saha & Paul (2019), en Durgapur, India, es elaborar una metodología para evaluar integralmente la calidad del agua subterránea en un área altamente industrializada, que incluye industrias químicas, de fertilizantes, de hierro y acero, cemento, maquinaria pesada, minería de carbón y una termoeléctrica.

El estudio presenta una metodología holística para la evaluación de agua subterránea a lo largo del tiempo y se divide en tres objetivos específicos: (1) determinar la calidad del agua en el sitio de estudio; (2) evaluar la idoneidad del agua para distintos usos (agua para consumo, irrigación y uso industrial); y (3) identificar las fuentes de contaminación de agua.

⁶² Inclinación o doblamiento de una planta.

Para esto se tomaron muestras de agua de 40 sitios localizados dentro del área de estudio en dos períodos distintos, antes y después de la temporada de monzones. Los siguientes parámetros fueron considerados para medir la calidad del agua subterránea: pH, sólidos disueltos totales, Ca, Mg, SO₄, Cl, dureza total, NO₃, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. Se tomó como punto de comparación los estándares de calidad para estos parámetros propuestos por la Oficina de Normas Indias (Bureau of Indian Standards). Esto permitió calcular el Water quality index (WQI).

En cuanto al análisis químico de las muestras, la concentración de Cd, Cr, Ni y As resultó ser menor que el límite de detección. Para los metales restantes, la concentración en agua seguía la siguiente relación: Fe>Mn>Zn>Pn>Cu>Co. Saha & Paul (2019) discuten que la concentración de estos metales depende de la disolución de minerales producto de la meteorización de rocas, precipitación, lixiviación y otras actividades antropogénicas

En cuanto al Fe, por una parte, su presencia en aguas subterráneas se atribuye a la meteorización de rocas compuestas de pirita. El Fe es el principal componente del esquisto rojo, arenisca y rocas de laterita, que son parte de la geología del sitio de estudio. Por otra parte, las plantas de hierro y acero son también responsables de la presencia de Fe en el agua subterránea. Estas industrias generan polvo cargado de hierro, lo que luego precipita y se deposita. Evidencia de esto son los elevados niveles de Fe en agua en la temporada posterior monzón en comparación con la temporada previa. Además, las descargas directas e indirectas de residuos industriales, junto a la lixiviación de vertederos industriales, contribuyen a la contaminación del agua subterránea con Fe. En resumen, la meteorización de rocas y la presencia de complejos industriales de hierro de acero resultan en concentraciones elevadas de Fe en el agua subterránea de la zona de estudio.

Saha & Paul (2019) concluyen que las fuentes de contaminación resultaron ser geogénicas y antropogénicas, tanto para el Fe como para el resto de los metales analizados. Además, el WQI reveló que el agua subterránea era de baja calidad. Por último, en cuanto al consumo del agua, se determinó que su ingestión no era segura, al causar riesgos no carcinogénicos en niños y adultos, mientras que el contacto dérmico, es decir, su uso para fines recreativos y de higiene personal si era segura. Por último, en cuanto a su uso industrial se determinó que podría corroer cañerías y equipos industriales.

4.4.2.10 Health risk assessment of potentially toxic elements in the dry deposition fraction of settleable particulate matter in urban and suburban locations in the city of Gijón, Spain

En el estudio elaborado por Lara et al. (2021) se analizó el riesgo en salud humana de Al, As, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb y Sr, contenidos en la fracción seca del material particulado sedimentable. Para ello se tomaron muestras en Gijón, España. Esta ciudad comprende una zona industrial, que incluye una planta de cemento, siderúrgica y planta termoeléctrica. Las vías de exposición

consideradas en el estudio son tres: ingesta directa de partículas, inhalación y absorción dérmica de los elementos contenidos en las partículas que se adhieren a la piel.

En cuanto a los riesgos en salud humana, este se midió en base al cociente de peligro, índice de peligro y riesgo de cáncer. El riesgo de no cáncer se evaluó utilizando el cociente de peligro (HQ, por el inglés *Hazard Quotient*) y el índice de peligro (HI, *Hazard Index*), que se calcula sumando, para cada elemento, los HQ resultantes para las tres vías de exposición. El riesgo de cáncer (CR), que se define como la probabilidad incremental de que un individuo desarrolle cáncer a lo largo de su vida producto de la exposición a un potencial carcinógeno, también fue calculado.

Los resultados del monitoreo indicaron que, en todas las estaciones, el Fe era el elemento que se encontraba en mayor concentración, seguido del Al. En cuanto a los riesgos en salud, los resultados indican que, independiente de la ubicación, la ingestión implicaba los mayores riesgos potenciales de cáncer y no cáncer, seguido del contacto dérmico y la inhalación.

Más específicamente, los resultados del análisis de riesgo de no cáncer indican que la ingestión es la ruta de exposición que presenta mayor riesgo para Al, As, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb y Sr, tanto para adultos como para niños, seguida por el contacto dérmico e inhalación. Los resultados encontrados por Lara et al. (2021) coinciden con estudios anteriores en que la ingestión y el contacto dérmico son vías de exposición más importantes que la inhalación en términos de salud humana. Adicionalmente, los valores de HQ fueron mayores en niños que en adultos, por al menos un orden de magnitud en todos los elementos tanto para ingestión como para contacto dérmico.

En cuanto a los resultados del análisis de riesgo de cáncer, los resultados mostraron nuevamente que la ingestión es la principal vía de exposición. Los valores de CR para niños eran de un orden de magnitud mayor que para los adultos en el caso del As. Sin embargo, los valores de CR para inhalación y contacto dérmico eran similares para ambos grupos. Adicionalmente, se determinó que para el As el riesgo de cáncer no es despreciable.

4.4.2.11 Conclusiones de revisión de literatura

A partir de la revisión de la literatura sobre el impacto del MPS en los recursos naturales, cuyo resumen se presenta en la Tabla 4-45, se puede concluir que este contaminante puede tener efectos adversos en distintos seres vivos, incluidos los humanos, a través de diferentes vías de exposición. El MPS atmosférico es capaz de interactuar con otros medios, como el agua y el suelo, y generar impactos negativos en estos. Cabe notar que la literatura consultada consta de un 67% de estudios elaborados en zonas altamente industrializadas.

En el caso de las plantas, existen especies que toleran de mejor forma la presencia de MPS en la atmósfera, como la *B. pendula* o abedul común (Nadgórska–Socha et al., 2017). Sin embargo, para otras especies, la literatura reporta que el depósito de MPS en el follaje impacta negativamente en el metabolismo de las plantas, afecta negativamente su productividad e

incrementa su temperatura, lo que lleva a una menor eficiencia en el uso del agua. Cabe mencionar que los impactos negativos en plantas están asociados a la presencia de metales pesados en el MPS (Chaurasia et al., 2022; Meravi et al., 2021).

En relación con lo anterior, los metales pesados contenidos en el MPS podrían translocarse hasta la raíz y el tallo, llevando a que la planta desarrolle mecanismos de defensa en respuesta al estrés abiótico (Ghosh et al., 2023; Lu et al., 2020). En cuanto a la capacidad de retención de MPS, aquellas plantas que mayor capacidad poseen son aquellas que tienen hojas con pelos vegetales (Xu et al., 2022). Además, al comparar especies según capacidad de captación de MPS, aquellas que exhiben mayor capacidad también muestran una mayor reducción en su tasa fotosintética, y viceversa, las especies que menos captan MPS, presentan reducciones mínimas (Chaurasia et al., 2022).

En el caso de la biota acuática, esta podría llegar a verse afectada por la interacción aire-agua. El MPS, al estar compuesto de aglomeraciones de nanopartículas de metales pesados y otros contaminantes, podría disolverse en contacto con agua y liberar estos contaminantes al medio acuático. Lo anterior constituye una vía de exposición para los organismos acuáticos y genera impactos negativos y bioacumulación. Así mismo, estos organismos al ser consumidos por el ser humano representarían una vía de exposición. Se determinó que, en el eventual caso de consumo de tilapia en el largo plazo, la ingesta diaria estimada era superior a la ingesta diaria aceptable para ciertos metales (As, Zr, La y Hg) en niños, lo que implica potenciales riesgos a la salud y bioacumulación de metales en esta población (Fortes et al., 2023; Souza et al., 2021).

En cuanto al agua subterránea, Saha & Paul (2019) reportan que, en una zona industrializada con presencia de complejos industriales de hierro y acero, las fuentes de contaminación por hierro son tanto geogénicas como antropogénicas. Por un lado, la meteorización de rocas con contenido de pirita y suelos cuyo mayor componente es el Fe, y por otro lado los residuos directos e indirectos de las industrias asociadas, llevan a que el contenido de Fe en el agua sea alto, sobre todo después de periodos de lluvia.

Adicionalmente, Lara et al. (2021) determinaron que la vía de exposición más importante para el MPS en cuanto a riesgo en salud humana es la ingesta, tanto para efectos cancerígenos como no cancerígenos, y que en general el riesgo para niños (medido en HQ, HI y CR) es mayor que para adultos. En el caso del As, se determinó que su efecto no es despreciable para cáncer.

Por último, Fortes et al. (2023) y Souza et al. (2021) reflexionan sobre la importancia de tener en cuenta otras vías de contaminación, además de la atmosférica, al regular emisiones de MPS. Esta sugerencia surge a partir de la evidencia recogida por ambos estudios sobre que los ecosistemas acuáticos son receptores directos e indirectos de MPS, y que los contaminantes podrían ser incorporados a los organismos de la fauna acuática y luego ser transferidos a los seres humanos, a través de la ingesta. Lo anterior es especialmente preocupante al considerar que, al dispersarse las aglomeraciones de nanopartículas en el MPS, se podrían liberar metales emergentes para los que no existen regulaciones.

Tabla 4-45 Resumen estudios sobre efectos del MPS sobre Recursos Naturales

Título Estudio	Referencia	Sitio de estudio	Contenidos	Efecto en Recursos Naturales
A review on seasonal changes in particulate matter accumulation by plant bioindicators: effects on leaf traits	Ghosh et al. (2023)	N.A.	Revisión bibliográfica que busca abordar todos los posibles impactos en las características de las hojas de distintas especies. Se analiza el impacto de distintos tamaños de partículas, incluyendo aquellas con diámetro superior a 10 µm.	Especies vegetales variadas. En el caso de las partículas de diámetro superior a 10 µm, el impacto principal es el aumento del área foliar específica. El follaje de las plantas se modifica para crear mecanismos de defensa frente al estrés abiótico que significa la contaminación atmosférica.
Combined effects of different leaf traits on foliage dust-retention capacity and stability	Xu et al. (2022)	Jinzhong, China	Se busca determinar qué características de una hoja determinan la capacidad de retención de MP de distintos tamaños. Del MP depositado, más del 99% correspondía a MP100.	Seis especies de plantas: <i>Forsythia suspensa</i> (Thunb.) Vahl, <i>Hibiscus syriacus</i> L., <i>Cerasus serrulata</i> var. <i>Lannesiana</i> (Carri.) Makino, <i>Ligustrum quihoui</i> Carr., <i>Rhus typhina</i> y <i>Euonymus japonicus</i> Thunb. Algunos rasgos foliares determinantes son la presencia de pelos vegetales en la hoja y su área.
Seasonal variation of dust deposition on plant leaves and its impact on various photochemical yields on plants	Meravi et al. (2021)	Chhattisgarh, India	Se estudia el impacto del depósito de polvo en especies vegetales, ubicadas en las cercanías de una planta termoeléctrica.	23 especies de plantas. Ver Tabla 4-43. El principal resultado es que causa efectos adversos en los parámetros fotosintéticos.
Impact of dust accumulation on the physiological functioning of selected herbaceous plants of Delhi, India	Chaurasia et al. (2022)	Delhi, India	El objetivo del estudio es entender cómo impacta la acumulación de polvo en el metabolismo de las plantas. Se toma un sitio caso control y un sitio caso de estudio. Este último se ubica en una zona altamente industrializada.	Se estudia la acumulación de polvo en 5 especies herbáceas: <i>Amaranthus viridis</i> , <i>Achyranthes aspera</i> , <i>Acalypha indica</i> , <i>Parthenium hysterophorus</i> , <i>Trianthema portulacastrum</i> . Las especies ubicadas en el sitio de estudio mostraron menor eficiencia fotosintética, reducción en la tasa de intercambio de gases y menor eficiencia en el uso del agua.
Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes	Nadgórska-Socha et al. (2017)	Sur de Polonia (zona industrializada, incluye una planta de fundición de hierro)	Se estudian 10 sitios, de los cuales 3 se ubican en las cercanías de una planta de fundición de hierro.	Se estudia la tolerancia de 4 especies: <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Betula pendula</i> y <i>Robinia pseudoacacia</i> . Los resultados arrojan que <i>B. pendula</i> > <i>P. lanceolata</i> > <i>T. officinale</i> > <i>R. pseudoacacia</i>
Atmospheric particulate matter from an industrial area as a source of	Souza et al. (2021)	Vitória, Brasil (ciudad cercana a una	Se estudia la interacción entre las emisiones de MPS atmosféricas y los sistemas acuáticos. Se determina que las	Se determina que el MPS libera nanopartículas potencialmente contaminantes en los ecosistemas marinos, lo que representa una vía de exposición tanto

Título Estudio	Referencia	Sitio de estudio	Contenidos	Efecto en Recursos Naturales
metal nanoparticle contamination in aquatic ecosystems		planta de procesamiento de hierro y acero)	nanopartículas aglomeradas en las fracciones de MPS son luego disueltas y liberadas en el medio acuoso.	para la biota acuática como para los seres humanos. En el caso de estos últimos, a través de la ingesta de alimentos.
Metal/metalloid bioconcentration dynamics in fish and the risk to human health due to water contamination with atmospheric particulate matter from a metallurgical industrial area	Fortes et al. (2023)	Vitória, Brasil (ciudad cercana a una planta de procesamiento de hierro y acero)	Se estudia el impacto de los metales contenidos en las emisiones MPS provenientes de un complejo industrial de hierro y acceso en la tilapia del Nilo y su consecuente impacto en la salud humana a través de la ingesta de esta especie.	Impactos en la tilapia del Nilo y salud humana. La presencia de MPS disuelto en agua induce la bioacumulación de metales en el tejido de la tilapia y en su capacidad respiratoria. La ingesta de largo plazo de tilapia no es segura para niños.
Uptake of iron oxide nanoparticles inhibits the photosynthesis of the wheat after foliar exposure	Lu et al. (2020)	N.A. (experiencia en laboratorio)	Se estudia el impacto que tienen las nanopartículas de óxido de hierro en plantas de trigo a distintas concentraciones y por distintos periodos de tiempo en condiciones de laboratorio.	Plantas de trigo. Los resultados muestran que la aplicación foliar de nFe ₂ O ₃ resultó en la translocación de las partículas al resto de la planta (raíces y tallo). Esto generó menor contenido de clorofila y menor fotosíntesis, y por ende, inhibición de la producción de biomasa.
Groundwater quality assessment in an industrial hotspot through interdisciplinary techniques	Saha & Paul (2019)	Durgapur, India	Se estudia el agua subterránea de un área altamente industrializada, cuyo complejo industria incluía plantas de hierro y acero.	Agua subterránea. Las fuentes de contaminación de Fe eran tanto antropogénicas como geogénicas. Se determinó que el agua era de baja calidad, no segura para su ingestión (consumo humano), pero si para contacto dérmico (higiene y recreación). Su uso industrial no se recomienda, porque por su contenido, podría corroer la infraestructura industrial.
Health risk assessment of potentially toxic elements in the dry deposition fraction of settleable particulate matter in urban and suburban locations in the city of Gijón, Spain	Lara et al., (2021)	Gijón, España	Se estudia el riesgo en salud humana de metales contenidos en el MPS para efectos no cancerígenos y cancerígenos.	Se determina que la vía de ingestión directa de partículas de MPS es la más importante tanto para efectos cancerígenos y no cancerígenos. Los efectos cancerígenos del As no son despreciables.

Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Estudios sobre metodologías de medición de concentración atmosférica de MPS

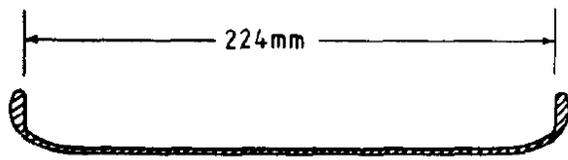
A continuación, se resumen estudios seleccionados luego de una revisión bibliográfica sobre las metodologías de medición de concentración atmosférica de MPS. La búsqueda se centró sobre todo en el impacto en especies vegetales. Las palabras claves utilizadas en la búsqueda se listan a continuación:

Atmosferic sedimentable dust – Settleable Particulate Matter – settled particulate matter – dustfall – deposited dust - deposited PM – monitoring – measurement – techniques

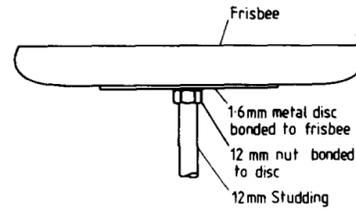
4.4.3.1 Technical Guidance Note M17: Monitoring Particulate Matter in Ambient Air around Waste Facilities

La guía metodológica de Environment Agency UK (2013) es una orientación sobre el monitoreo de partículas de polvo en el aire alrededor de instalaciones de desechos, en el documento se muestran métodos de monitoreo con fin de monitoreo regulatorio. El documento presenta una sección específica para monitoreo de MPS en el cual se presentan las técnicas: disco Frisbee (Frisbee Technique), almohadilla adhesiva (Sticky Pad Technique), deslizamiento de polvo (Dust Slide Technique). Se clasifican según la medición de la tasa de deposición de polvo y tasa de suciedad, parámetros que son utilizados para medir la molestia del MPS en las personas.

Según la guía, Frisbee Thechnique es la técnica preferida para medir la caída de polvo por medio gravimétrico utilizando un medidor de deposición en forma de Frisbee, la técnica utilizada es usada para obtener la tasa de deposición masiva. Consiste en medidores omnidireccionales, no diferencias entre polvos que provienen de diferentes direcciones. El dispositivo de Frisbee invertido de plástico o aluminio de diámetro 235 mm está montado horizontalmente en un poste a 1,75 m del suelo con un orificio de drenaje en el centro que conduce a una botella de recogida de agua de lluvia. La materia depositada en la superficie de recolección y la materia insoluble en la botella de recolección de agua de lluvia se eliminan cuantitativamente y se separan mediante una suave filtración al vacío. La materia insoluble se seca y se determina gravimétricamente y la tasa de deposición se expresa en $\text{mg}/(\text{m}^2\text{-día})$. La forma del Frisbee tiene una eficiencia de recolección superior y características aerodinámicas que lo hacen adecuado para períodos de muestreo a corto plazo de aproximadamente una semana, pero los medidores generalmente están expuestos por más tiempo ya que los límites predeterminados de molestias, habituales y prácticos, se basan en exposiciones mensuales. En cuanto al rendimiento del método, para la determinación gravimétrica en una balanza de resolución de 0,1 mg y con un período de muestreo de un mes, se obtiene un límite de detección inferior teórico de $0,07 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{-día})$. En la Figura 4-42 se muestra el método como referencia.



(a) Inverted Frisbee



(b) Frisbee mounting system used in wind tunnel

Figura 4-42 Frisbee Thechnique

Fuente: Hall & Upton (1988)

La medición con una almohadilla adhesiva (Sticky Pad Technique) se realiza para medir la tasa de suciedad. El método consiste en colocar una película adhesiva transparente envuelta alrededor de un cilindro como referencia se muestra el equipo de monitoreo en la Figura 4-43. En el caso de la figura, el cilindro tiene 300 mm de largo y 70 mm de diámetro. Este método calcula la tasa de suciedad de la almohadilla expuesta usando un medidor de reflectancia, se expresa como porcentaje de área efectiva (Effective Area Coverage [%EAC]) por día. La técnica se desarrolló para evaluar molestias causada por la suciedad de las superficies, por lo que esta técnica es más adecuada para rastrear los efectos molestos de los polvos oscuros. El periodo de exposición de muestreo estándar debe ser de siete días.



(a) DustScan directional monitoring equipment developed



(b) DustScan "loading test" array

Figura 4-43 Sticky Pad Technique

Fuente: Farnfield & Birch (1997)

Por último, la técnica de deslizamiento de polvo también mide la tasa de suciedad, se realizó para evaluar la molestia causada por los efectos de la suciedad. Consiste en una recolección pasiva de polvo en un portaobjetos de microscopio colocado horizontalmente, se coloca horizontalmente sobre una superficie entre uno y dos metros del suelo. El polvo se cuantifica midiendo la reducción de la reflectancia especular en relación con una diapositiva no expuesta utilizando un

reflectómetro. Las unidades de suciedad son SU (Soiling Units) y se obtiene restando el valor de reflectancia a 100. El nivel de suciedad está relacionado con la molestia percibida.

4.4.3.2 Standard Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter) D1739-98

El método descrito por la American Society for Testing and Materials (ASTM, 2017) permite recolectar y medir MPS. Fue elaborado por esta organización por primera vez en 1960 y actualizado por última vez en 2017. De acuerdo con esta guía, el método es útil para obtener muestras de este contaminante para su posterior análisis químico. Además, permite medir material particulado soluble e insoluble. Sin embargo, no es apto para la medición de la tasa de sedimentación en áreas pequeñas afectadas por fuentes específicas, así como tampoco para ser usado en higiene industrial.

La principal ventaja de este método es su simplicidad y su utilidad en el estudio de tendencias de largo plazo. Otra de sus beneficios es que requiere de poca inversión y puede ser llevado a cabo sin un equipo de trabajo especializado. Adicionalmente, en la medida en que los estándares de medición explicados en esta guía han mejorado, también ha incrementado la precisión del método.

Los materiales utilizados son los siguientes: contenedor, soporte para el contenedor, tamiz, horno para secado, embudo Buchner, papel filtro, platos de evaporación, desecadores, espátula, balanza, caja para transportar el contenedor y cilindro graduado. El único reactivo necesario es agua purificada.

En cuanto a la materialidad del contenedor, este debe ser de acero inoxidable o de algún plástico que resista estar a la intemperie. Cada contenedor debe contar con una tapa hermética, que servirán para el transporte desde el laboratorio hasta el sitio de estudio y para sellarlo una vez que finalice el período de muestreo. Las medidas del contenedor deben ser un diámetro no menor a 15 cm y una altura no menor al doble de su diámetro. Además, debe contar con un parabrisas (ver Figura 4-44). El soporte debe sostener al contenedor de forma tal que quede a 2 m con respecto al suelo.

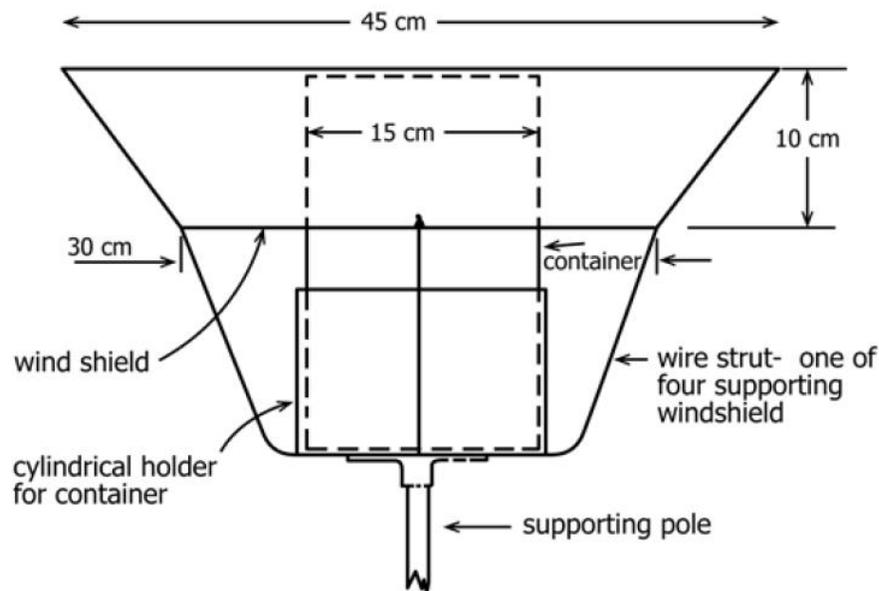


Figura 4-44 Corte transversal de estructura de contenedor y parabrisas

Fuente: (ASTM, 2017)

La guía además hace sugerencias sobre el lugar donde localizar el punto de muestreo. En primer lugar, el sitio debe estar en una zona abierta, donde en un radio de 20 m no existan estructuras superiores a 1 m de altura. En segundo lugar, se debe considerar la accesibilidad y seguridad del lugar donde se disponga la estructura, para evitar vandalismo. Adicionalmente, la elevación con respecto a objetos más altos dentro de un radio de 20 m no debe exceder los 30° desde la horizontal. Por último, el contenedor no debe situarse cerca de chimeneas.

En cuanto al número de sitios de muestreo, la guía menciona que, por cada región a analizar, deben existir al menos 4 puntos de muestreo, para realizar controles de calidad y en caso de que se deba rechazar una muestra. Los distintos puntos deben estar distanciados entre ellos por entre 5 y 8 km.

En cuanto al tiempo de muestreo, este deber tener una duración de un mes calendario ± 2 días. Se deberá anotar la fecha de inicio y término del muestreo, así como también las coordenadas y especificaciones sobre el sitio de muestreo. Los resultados se normalizan a un periodo de 30 días.

El procedimiento de medición de MPS se realiza una vez finalizada la etapa de recolección y es descrito en el documento de manera detallada. Son dos procedimientos distintos para material insoluble y soluble. En ambos casos, el procedimiento consiste, a grandes rasgos, en pesar el material que queda en los platos de evaporación una vez extraída toda el agua. Finalmente, una vez finalizado el procedimiento de medición, la tasa de sedimentación se calcula como indica la Ecuación 4-1.

Ecuación 4-1 Tasa de sedimentación

$$D = \frac{W}{A} \left[\frac{g}{m^2 \cdot 30d} \right]$$

Donde A es el área de recolección, dada por el área transversal del diámetro interno superior del contenedor y W es la masa determinada una vez finalizado el procedimiento descrito en la guía, normalizada a un período de 30 días.

4.4.3.3 La incorporación del Material Particulado Sedimentable como parámetro en el ECA Aire para la evaluación ambiental

Carrianza et al. (2021) realiza una revisión de investigaciones científicas y normativas internacionales sobre la regulación del polvo sedimentable, su impacto y la situación actual en las áreas urbanas de Perú.

Con respecto a las metodologías para medición de MPS, se presentan diferentes tipos de los cuales se menciona que poseen una ventaja por el bajo costo de implementación. El primer método descrito es Metodología Gravimétrica y pasiva, una técnica internacional más utilizada sobre MPS en normas de calidad atmosférica, la cual consiste en pesar el material recolectado en el mes y dividirlo en el área de exposición, calculando el parámetro en mg/cm^2 -mes. La forma de medición estándar más extendido para este método es la norma de *American Society of Testing Materials* ASTM-D1739-98M, el cual consiste en colocar tubos pasivos de PVC de 15 cm de diámetro y 40 cm de altura, colocados sobre soportes metálicos de 1,5 m, existen variaciones donde los recipientes de colectores pueden variar de tamaño y forma (ver Figura 4-45 A).

Una variación del método aplicado a zonas donde es más común precipitaciones es mediante recipientes de mayor volumen capaces de recolectar el polvo más precipitaciones (ver Figura 4-45 B). Para la determinación de MPS, primero se extrae el agua, luego se homogeniza y se extrae el volumen determinado para su posterior secado y medición de sólidos sedimentables.

Finalmente, otro método extendido es el de placas receptoras con adherentes (ver Figura 4-45 C), en el cual se disponen placas Petri o similares las cuales son lavadas a fondo y untadas con algún adherente que permite retener las partículas de polvo sedimentable sobre estas. Igual que el método de tubos pasivos, se colocan a una altura de 1 metro o más y se deja en el lugar de estudio por un mes.

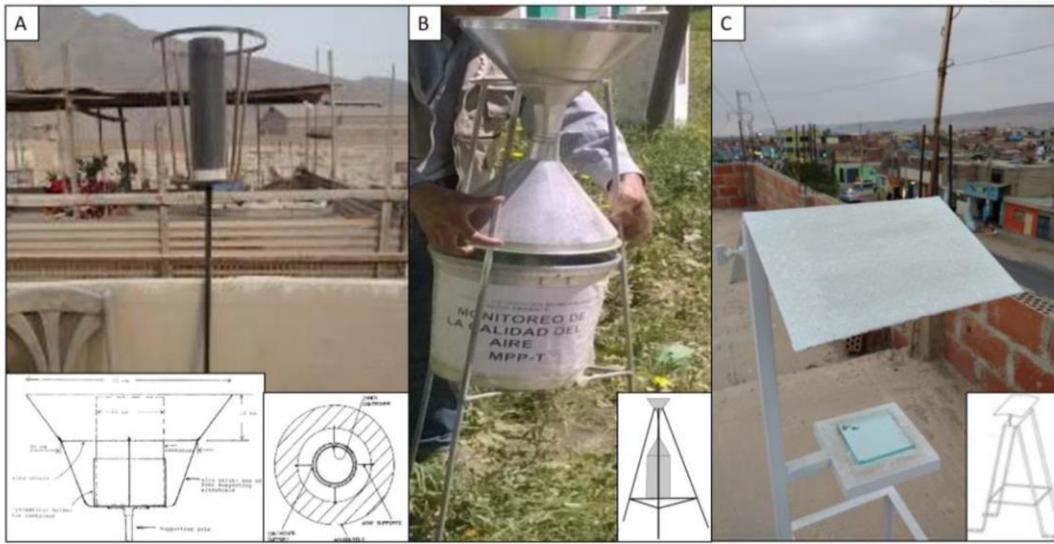


Figura 4-45 Metodologías de medición de polvo sedimentable

A) Tubos pasivos de deposición seca. B) Colectores pasivos adaptados a precipitación. C) Placas receptoras con adherente.

Fuente: (Santillán-Lima et al., 2016)

Carrianza et al. (2021) realiza la revisión de investigaciones dónde se comparaban las metodologías de tubos pasivos con las placas receptoras. Un hallazgo importante de esta revisión es que las placas receptoras tienen una menor capacidad para retener el polvo sedimentable debido a que una vez capturada la primera capa de polvo sedimentable, la segunda no tiene adherencia y al exponerse a viento se pierde parte de la muestra. Se concluye que el método gravimétrico basado en tubos recomendado por ASTM sigue siendo el más eficiente.

4.4.3.4 The Evolution of Air Quality Monitoring: Measurement Techniques and Instruments

Velez-Guerrero et al. (2023) realiza una investigación que recopila información sobre la vigilancia de calidad del aire incluyendo su historia y contexto global junto con tecnologías y métodos de medición existentes para los diferentes contaminantes atmosféricos. Como metodología realiza una revisión sistemática de la literatura para encontrar las principales tipologías de contaminantes y atmosféricos, métodos de medición, tecnologías utilizadas y variables meteorológicas. Además, se realiza una distinción entre mediciones realizadas en el siglo XX y XXI.

En cuanto a medición de material particulado y polvo atmosférico, el primer método mencionado en el estudio se utiliza desde el siglo XX el método gravimétrico el cual consiste en realizar la medición con una pequeña lámina en el aire libre durante un promedio de 30 días, con la parte superior recubierta de aceite, se obtiene el polvo sedimentable tras pesar la lámina post el tiempo de exposición (30 días) comparándola con el peso antes de la exposición, el resultado se expresa en unidades de peso de polvo sedimentable (ej: $\text{mg}/\text{m}^2\text{-día}$). Se menciona que equipos más automatizados y especializados pueden diferenciar el tamaño de partículas en nanómetros y han sustituido este método.

En los métodos utilizados en el siglo XXI se presenta la Técnica de Atenuación Beta (Beta Attenuation), un método para medir masa para medir partículas que se utiliza habitualmente en detectores que se recogen del aire con una cinta, se usa para medir partículas en suspensión, partículas totales suspendidas, MP10 y MP2,5. El principio de determinación de masa se basa según la cual los rayos beta atenúan su velocidad al atravesar una capa fina de material. Por otro lado, se presenta la técnica Microbalanza oscilante de elemento canónico (Tapered element oscillating microbalance) el cual consiste en un sistema de medición con un filtro en el extremo de un tubo cónico de vidrio hueco el que vibra a frecuencia natural cuando la muestra de aire atraviesa el filtro y la materia se deposita en él, la frecuencia de vibración disminuye a medida que aumenta la masa de partículas.

4.4.3.5 Estimación del grado de contaminación de material particulado atmosférico y sedimentable en el laboratorio de servicios ambientales de la UNACH

En Santillán-Lima et al. (2016) se evalúa el grado de contaminación por material particulado atmosférico y sedimentable mediante el método de muestreo pasivo para polvo sedimentable. El área estudiada fue la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo, la instalación de monitoreo del MP se efectuó a un costado de donde se realizan los análisis de agua. El método empleado en esta investigación consistió en colocar dos cajas de Petri con papel filtro previamente pesado y en un área determinada. Los recolectores se ubicaron en lugares con mayor probabilidad de receptor MPS y fue dejado durante el mes de monitoreo. Al finalizar el muestreo se pesa el papel filtro nuevamente en una balanza analítica, luego es llevado a una estufa para la eliminación de humedad adquirida por efectos del ambiente a 50°C durante al menos 24 hrs. Para determinar el MPS se calculó la diferencia entre los pesos final e inicial y dividiendo por el área de recolectada obteniendo unidades de miligramos por centímetro cuadrado.

Ecuación 4-2 Cálculo de Polvo Atmosférico Sedimentable

$$PAS = \left(\frac{P_f - P_i}{\text{Área}} \right)$$

Donde PAS es el Polvo Atmosférico Sedimentable, P_i este después de salir del laboratorio, P_f este después de estar expuesta el filtro durante el periodo de muestreo y Área del papel filtro $A = \pi r^2$.

Se concluye que las actividades económicas en zonas acondicionadas y de mejor dominio no superan dicho nivel, a diferencia de zonas inadecuadas, indicando con ello que las calles sin pavimentos son los focos más importantes en contribuir con las partículas al ambiente causado por el transporte y otras actividades. La investigación aporta un caso realizado en Perú con método pasivo en donde se sobrepasan los límites establecidos debido a las actividades económicas del lugar, dañando a la población que no cuenta con zonas acondicionadas para el proceso productivo.

4.4.3.6 Conclusiones de revisión de literatura y resumen de metodologías de medición de MPS

A partir de la revisión de la literatura se concluye que la metodología gravimétrica y pasiva es la metodología que más se utiliza para la medición de MPS. Si bien existen variaciones de los tipos de metodología todas incluyen la misma base, recolección de polvo y luego obtener la tasa mediante la diferencia de masa de las muestras dividido en el área de estudio.

Environment Agency UK (2013) presenta tres métodos para medir MPS, de los cuales uno presenta la medición específica para calcular la tasa de sedimentación mediante metodología gravimétrica, los otros dos modelos fueron para medir tasa de suciedad lo cual medía la “molestia” generada para las personas por el impacto visual del MPS.

La actualización de D1739-98 del ASTM (2017) presenta el método gravimétrico como la metodología estándar para coleccionar MPS el cual consiste en la recolección mediante tubos pasivos, el cual se coloca por 1 mes calendario y luego se realiza el análisis químico respectivo. La principal ventaja del método es la simplicidad, poca inversión y que no necesita un grupo especializado para ser llevado a cabo. A lo largo de los años se agrega precisión en el método, pero sigue teniendo la misma base metodológica.

Carrianza et al. (2021) presenta tres métodos: enfatiza el uso de la metodología estándar D1739-98, presenta una variación del tamaño del colector para recolectar MPS en zonas con más precipitaciones y el método de placas receptoras con adherentes. Al comparar los tubos pasivos con las placas receptoras se observó que las placas tienen una menor capacidad para retener el polvo sedimentable debido a que una vez capturada la primera capa de polvo sedimentable, la segunda no tiene adherencia y al exponerse a viento se pierde parte de la muestra.

Por otro lado, en los estudios efectos en recursos naturales de la Sección 4.4.2 también se utiliza el mismo método metodológico para medir MPS, al igual que lo observado en Santillán-Lima et al. (2016). Para concluir se observa la medición ocupada en la normativa de Huasco presenta coherencia con lo que aún se utiliza a nivel internacional, incluso las recientes actualizaciones de guías internacionales presentan el mismo método pasivo para recolectar MPS.

4.5 Elaboración de escenarios de actualización de la norma existente

Sobre la base de los antecedentes recopilados y análisis respectivos, se elaboran recomendaciones sobre los aspectos en que podría ser actualizada la norma de MPS y hierro contenido en el MPS, señalada en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI y lo solicitado por el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión (Ministerio del Medio Ambiente, 2012). Las propuestas consideran las implicancias tecnológicas en el ámbito de mitigación, monitoreo, y fiscalización, de forma de plantear escenarios técnicamente factibles y que

permitan de un modo eficaz cumplir con los objetivos de la normativa. Para esto desarrollaron las subactividades descritas en las siguientes secciones.

4.5.1 Artículos relevantes para dictación de normas de calidad ambiental y emisión, contenidos en el D.S. N°38/2012 del MMA

Para la dictación de normas de calidad ambiental y emisión, se analizan artículos importantes para su actualización y el ítem que da cumplimiento a la información solicitada. En la Tabla 4-46 se presenta el artículo con cada ítem en el que se entregan antecedentes conforme a lo señalado en el reglamento.

Tabla 4-46: Artículos relevantes para actualización de normativa

Artículo	Descripción de artículo	Ítem
Art. 26	Toda norma primaria de calidad señalará los valores de las concentraciones y periodos máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos.	N.A.
Art. 28 inciso 1°	Toda norma primaria deberá señalar, cuando corresponda, los valores críticos que determinen las situaciones de emergencia ambiental; el plazo para su entrada en vigencia; el programa y los plazos de cumplimiento y la forma para determinar cuándo se entiende sobrepasada.	N.A.
Art. 32 inciso 1°	Toda norma secundaria de calidad ambiental señalará los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos, permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, el ámbito de aplicación territorial, el plazo para su entrada en vigencia, el programa y los plazos de cumplimiento y la forma para determinar cuándo se entiende sobrepasada.	Sección 4.1.2
Art. 37 letra a)	Toda norma de emisión contendrá, cuando corresponda, además de lo estipulado por el inciso 1° del artículo 28, las siguientes materias: a) La cantidad máxima permitida para un contaminante, medida en el efluente de la fuente emisora, o bien, la carga máxima permitida de efluente descargada al medio ambiente.	Sección 4.2
Art. 39	La revisión de las normas deberá sujetarse a criterios de eficacia de la norma en cuestión y de eficiencia en su aplicación. Los criterios anteriores se ponderarán según: a) Los antecedentes considerados para la determinación de la norma de conformidad con lo dispuesto en el artículo 26, 28 inciso 1°, 32 inciso 1° y 37 letra a) de este Reglamento;	-
	b) El nivel de cumplimiento informado por la Superintendencia del Medio Ambiente y vigencia actual de los objetivos tenidos en cuenta al momento de su dictación;	N.A.
	c) Los cambios en las condiciones ambientales consideradas al momento de dictarse la norma, y	Sección 4.1.2
	d) Los resultados de las investigaciones científicas que aporten antecedentes nuevos sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales o sobre nuevas metodologías de medición.	Sección 4.4.2

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Definición de la fuente a regular

En función de las secciones precedentes, se propone la fuente a regular por la norma de MPS. En términos generales, se decide mantener las fuentes abordadas por la normativa existente en Huasco, generalizando el territorio de aplicación en caso de ampliarse a nacional. De esta forma, se propone que la normativa sea aplicable a todas las fuentes emisoras de material particulado actualmente en operación o que se instalen en fecha posterior a la publicación del decreto en la cuenca del Río Huasco, III Región.

4.5.3 Método de medición para constatar el cumplimiento de la norma

El método establecido en la norma existente coincide con gran parte de los estudios evaluados, por lo que se concluye que es un método apto para la zona de medición. De esta forma, para constatar el cumplimiento de la norma, el método de medición propuesto es el método pasivo, manteniendo el mismo procedimiento dictado en la norma:

- La medición de partículas es en caída gravitacional en una superficie de intercepción por unidad de tiempo.
- El material particular sedimentado por el colector será expresado en unidades de masa depositada por unidad de área por unidad de tiempo efectivamente medido, así la unidad utilizada para expresar los valores límite es $\text{mg}/\text{m}^2\text{-día}$.
- El tiempo de acumulación en los receptores será de un mes calendario, transcurrido el tiempo se procede a la cosecha del material exceptuando el mes de diciembre que se requiere una cosecha que se hará cada 15 días.

Además, el Servicio Agrícola y Ganadero, mediante una resolución fundada, podrá requerir mediciones en periodos inferiores a los indicados. Con respecto a la medición de hierro se realiza a partir de métodos químicos.

Sin embargo, se constató que las condiciones de medición son aquellas descritas en el estudio elaborado por el Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM) (1992) y que existen protocolos y estándares más actualizados, como los propuestos por la ASTM (2017). En la Tabla 4-47 a continuación se comparan los aspectos incluidos en ambos estándares. Se puede notar que, si bien son similares hay diferencias importantes. Por ejemplo, en cuanto al método para evitar los efectos negativos del viento, el estándar del CIMM 1992 utiliza una botella con agua, mientras que el estándar ASTM 2017 hace uso de un parabrisas. Cabe mencionar que de adoptar el estándar ASTM 2017, se ahorrarían cerca de 1350 litros al año de agua.

Otra diferencia importante es la altura del equipo con respecto al suelo. Mientras que el estándar ASTM 2017 no permite, el CIMM 1992 lo permite siempre y cuando esté a más de 2 m de cualquier otro objeto de altura. De acuerdo a ASTM (2017), se ha evidenciado que monitores localizados en el mismo sitio, pero a distinta altura han mostrado resultados significativamente distintos, por lo que se recomienda mantener los equipos a la altura del suelo.

La tercera diferencia importante es el número de puntos de muestreo sugeridos. Mientras que CIMM 1992 no hace referencia a esto, el ASTM 2017 indica que deben ser al menos 4 puntos de muestreo para una misma región. Por último, el estándar ASTM 2017 no se refiere explícitamente a la distancia con respecto a caminos, mientras que el CIMM 1992 indica distancias de entre 5 y 25 metros dependiendo del tráfico de la vía.

Finalmente, la recomendación con respecto a esto sería actualizar las condiciones de muestreo, pero no así el método. Así, sugiere utilizar los lineamientos indicados en el estándar ASTM 2017, con excepción de lo referido a los caminos, lo que llevaría a que se modificara ligeramente el equipo y cambiaran los criterios de selección de sitios donde posicionar el equipo.

Tabla 4-47 Comparación entre estándares de monitoreo CIMM 1992 y ASTM 2017

Aspecto	CIMM 1992	ASTM 2017
Distancia con respecto a otros objetos/obstrucciones	La distancia entre los obstáculos y el equipo debe ser el doble de la altura que el obstáculo sobresale del muestreador; o bien el ángulo formado entre una línea horizontal a la altura de la boca del depósito colector y una línea trazada desde el muestreador hasta el borde más cercano del punto más alto debe ser menor o igual a 30°	No debe haber estructuras da más de 1 m de altura en un radio de 20 m. La elevación de objetos que estén a menos de 20 m no debe ser superior a los 30°.
Dimensiones del equipo	Contenedor: 31 cm (diámetro superior) Trípode: 1,5 m desde el suelo a la base del embudo	Contenedor: Al menos 15 cm (diámetro) Al menos 30 cm (alto) Relación de 1:2 (diámetro:alto) Parabrisas: 45 cm (diámetro superior) Trípode: 2 m desde el suelo al borde superior del contenedor
Medida para evitar efecto negativo del viento	Agua destilada (0,75 litros por monitor)	Parabrisas
Distancia con respecto a caminos	Para caminos pavimentados y/o afectados con un tráfico menor a 3.000 vehículos por día, debe estar a más de 5 m del borde del camino. Para caminos con un tráfico superior a 3.000 vehículos por día, se recomienda instalar el muestreador a más de 25 m del borde del camino. Debido a que los caminos de acceso no son pavimentados, los criterios para distancia entre un camino y una estación de muestreo deberán ser castigados, o bien los caminos serán protegidos con una carpeta apropiada para evitar la generación de polvo fugitivo.	No se mencionan explícitamente, pero se indica que debería estar lejos de fuentes locales de contaminación y objetos que puedan afectar la sedimentación del material particulado, como árboles, escapes y tomas de aire.
Restricciones con respecto a chimeneas	Se debe evitar. La distancia de separación de las chimeneas depende de la altura de estas, del tipo de desecho o combustible quemado y la calidad de los gases (contenido de cenizas). Por ejemplo, si las emisiones de las chimeneas son el resultado de combustión de gas natural, no se necesitan precauciones especiales, excepto evitar obstrucciones a menos de 2 m de distancia.	Se debe evitar estar cerca de una chimenea. Si es que hay una cerca, entonces el equipo deberá estar a al menos 10 veces la altura de esta y viento arriba, considerando la dirección del viento más frecuente en la zona.
Periodo de cosecha de muestras	30 días	30 días
Altura de muestreo	No pone restricciones, pero se indica que si el muestreador está instalado sobre un techo u otra estructura, entonces debe estar a una distancia mínima de 2 metros desde paredes, parapetos, etc.	A la altura del suelo, no se permiten techos.
Número de puntos de muestreo	No indica	Un mínimo de 4 puntos de muestreo por región a analizar

Fuente: Elaboración propia

4.5.4 Condiciones de superación de la norma

La norma vigente no cuenta con un artículo o párrafo en donde se expliciten las condiciones de superación de esta. Tal como se presenta en la Tabla 4-23, la mayoría de las normas internacionales de MPS evalúan la superación de los límites establecidos mediante promedio anual o mensual; sin embargo, se debe tener en consideración que, como ya se ha mencionado, estos límites se encuentran dentro de normativas ambientales generales.

Considerando lo anterior y manteniendo lo que actualmente se encuentra vigente, se propone establecer que la norma anual de MPS y hierro en MPS se considere sobrepasada cuando el promedio aritmético de las concentraciones de un año calendario, en cualquier estación monitora, sea mayor o igual al límite establecido en el artículo 4 (100 mg/m²-día y 30 mg/m²-día, respectivamente)⁶³. En la Sección 4.1.2.1 se presenta la evaluación de las concentraciones registradas entre 2016 y 2020 bajo la norma anual de MPS y hierro en MPS. Otra posible alternativa de verificador corresponde al promedio aritmético de tres años consecutivos, tomando como referencia la norma primaria de calidad para MP10. Si bien esta alternativa se considera factible, la normativa de referencia no es comparable con la de MPS, dado que la primera es una norma primaria, enfocada en la salud de la población. De todas formas, en el Anexo1.1 se presenta una evaluación de las concentraciones históricas bajo la norma anual, considerando como verificador el promedio trianual.

En cuanto a la norma mensual, para MPS se propone utilizar como referencia la norma vigente en Nueva York (ver Sección 4.2.1), cuyo límite también es mensual. De esta forma, se propone establecer que la norma mensual de MPS se considere sobrepasada cuando el percentil 85 de las concentraciones promedio de 30 días durante 12 meses, en cualquier estación monitora, sea mayor o igual al límite establecido en el artículo 4 (30 mg/m²-día). En la Figura 4-46 se presenta el percentil 85 de las concentraciones mensuales medidas durante un año, para el periodo comprendido entre 2016 y 2020. Se puede notar que en 2019 y 2020 no se sobrepasa el límite de latencia.

⁶³ En la Sección 4.1.2.1 se presenta la evaluación de la norma anual de MPS y hierro en MPS en base a las concentraciones registradas entre 2016 y 2020.

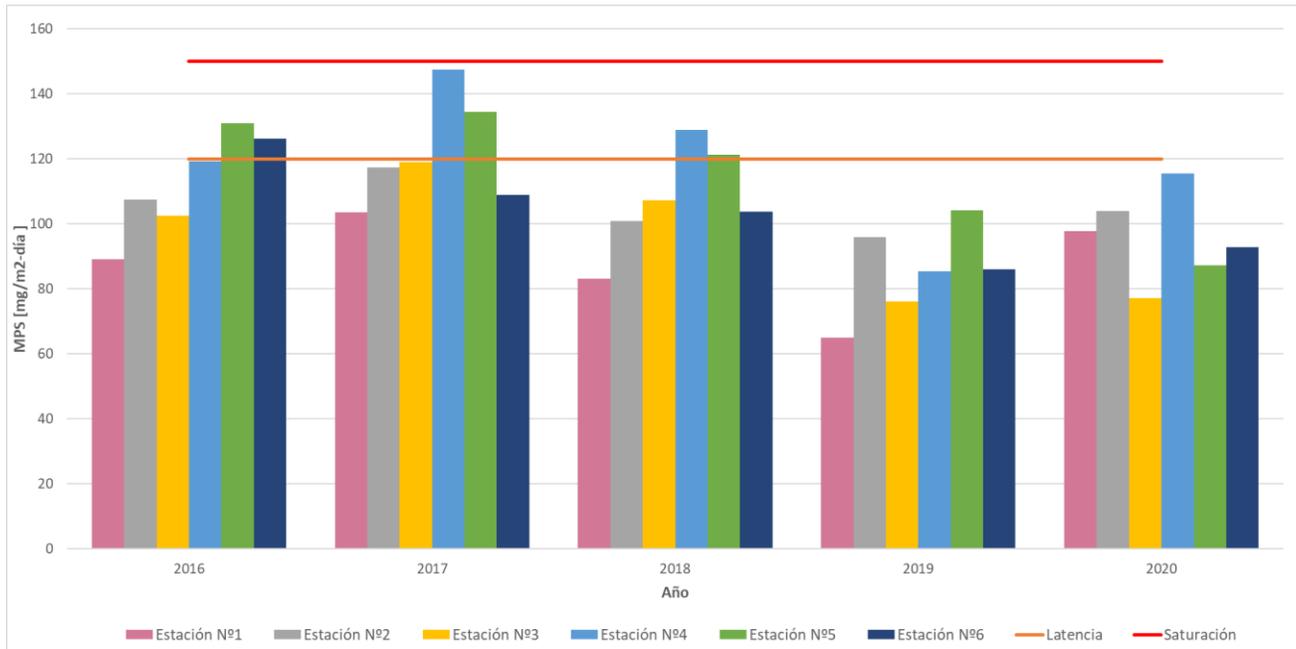


Figura 4-46 Evaluación norma mensual de MPS mediante el percentil 85 de las concentraciones de un año, periodo 2016-2020

Fuente: Elaboración propia

Para la norma mensual de hierro en MPS no es factible aplicar la misma condición de superación anterior, dado que existen dos límites distintos dependiendo del mes. El verificador correspondiente al percentil 85 de las concentraciones de un año calendario implica que el límite no se pueda sobrepasar más de -aproximadamente- 2 veces al año⁶⁴, por lo que se propone hacer una equivalencia de dicha condición de superación, pero aplicable al límite mensual de hierro en MPS. Así, se sugiere establecer que la norma mensual de hierro en MPS pueda ser sobrepasada dos veces en un año calendario, pero solo una de estas superaciones podrá ocurrir en el periodo entre el 1 septiembre al 15 diciembre⁶⁵. En la Sección 4.1.2.1 se presenta una evaluación de las concentraciones mensuales de hierro en MPS bajo los límites establecidos en el artículo 4, para los comprendidos entre 2016 y 2020.

Otra alternativa que podría evaluarse como condición de superación consiste en que la norma mensual de hierro en MPS se considere sobrepasada cuando el promedio aritmético de las concentraciones entre el 15 de diciembre y el 31 de agosto de un año calendario sea mayor o igual a 60 mg/m²-día, o cuando el promedio aritmético de las concentraciones entre el 1 de septiembre y el 15 de diciembre del mismo año sea mayor o igual a 30 mg/m²-día, en cualquier estación monitorea. En el Anexo 7.7 se presenta una evaluación basada en esta alternativa.

⁶⁴ Debido a que en diciembre se realiza una medición en cada quincena, son, en teoría, 13 mediciones al año por estación.

⁶⁵ Esto con el objetivo de mantener la mayor exigencia aplicada por la norma vigente en dicho periodo.

Cabe destacar que esta propuesta debe ser vista únicamente como un punto de partida flexible para el proceso de actualización de la norma.

4.5.5 Revisión y propuestas de mejora del articulado existente

Se revisa y se realizan propuestas de mejora del articulado existente, considerando y fundamentando mejoras por comparación con normativa internacional. En la Tabla 4-48 se resumen los cambios sugeridos, en la que se observa que solo para los artículos 7° y 9° se proponen modificaciones. Para el resto se sugiere no hacer modificaciones. Los artículos transitorios 1° y 2° no se incluyen, dado que son artículos referidos a aspectos administrativos de la norma.

En primer lugar, si bien no se proponen modificaciones a los valores máximos permisibles establecidos en el artículo 4 de la norma vigente, se propone explicitar el periodo de cumplimiento de estos límites, es decir, cuándo se entiende sobrepasada la norma. Para esto, se sugiere agregar un artículo que contenga las condiciones de superación, tal como se establece a continuación:

- Se considerará sobrepasada la norma de calidad ambiental para MPS como concentración anual, cuando el promedio aritmético de un año calendario, en cualquier estación monitora, sea mayor o igual a 100 mg/m²-día.
- Se considerará sobrepasada la norma de calidad ambiental para hierro en MPS como concentración anual, cuando el promedio aritmético de un año calendario, en cualquier estación monitora, sea mayor o igual a 30 mg/m²-día.
- Se considerará sobrepasada la norma de calidad ambiental para MPS como concentración mensual, cuando el percentil 84 de las concentraciones promedio de 30 días durante un año calendario, en cualquier estación monitora, sea mayor o igual a 30 mg/m²-día.
- Se considerará sobrepasada la norma de calidad ambiental para hierro en MPS como concentración mensual, cuando los límites establecidos en el artículo 4 sean superados más de dos veces en un año calendario, o más de una vez entre el 1 de septiembre al 15 de diciembre de dicho año.

En segundo lugar, en cuanto a la propuesta para el artículo 7°, lo que se sugiere es que este mencione explícitamente las condiciones de medición de MPS explicadas en el documento Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter) – D1739-98 (ASTM, 2017). Este documento entrega lineamientos tanto para el equipamiento a utilizar en la medición, como en la selección de sitios de muestreo, disponibles en la Sección precedente y la Sección 4.4.3.

Por último, se propone eliminar el artículo 9° de forma que la Planta de Pellets no quede eximida del cumplimiento de los literales a) y c) del artículo 4° de la norma. Esta sugerencia se sustenta en lo exhibido en la Sección 4.1.3 del informe, en donde se muestra que la Planta de Pellets es la

fuelle emisoru m1s importante de la cuenca. Adicionalmente, como se evidenci6 en la Secci6n 4.4.2, el MPS est1 compuesto de nanop1rticulas de Fe y otros metales pesados potencialmente nocivos para la biota y las personas, de forma que, al normar la concentraci6n de MPS proveniente de la fuente emisoru m1s relevante, se estar1a al mismo tiempo limitando la emisi6n de dichos contaminantes. En esta misma l1nea, en caso de no ser posible eliminar el art1culo 9°, se recomienda no extenderlo a otras fuentes de emisi6n u otras regiones.

Tabla 4-48 Propuesta de modificaciones al articulado de la Norma

Artículo	Contenido del artículo	Modificaciones propuestas
1°	Sobre las fuentes que deberán dar cumplimiento a las disposiciones de la norma y bajo qué circunstancias.	N.A.
2°	Sobre la clasificación de zona saturada, latente o no saturada, en función de las concentraciones de MPS.	N.A.
3°	Definición de red de monitoreo como el conjunto de equipos de medición de concentraciones de MPS.	N.A.
4°	Se establecen los valores máximos permisibles para la concentración media aritmética mensual y media aritmética anual para MPS y hierro.	N.A.
5°	Sobre la obligación de las fuentes emisoras de instalar sistemas de vigilancia de calidad del aire, que estén constituidos por redes de monitoreo, lo que no será necesario en caso de que exista una red oficial.	N.A.
6°	La Dirección Regional del SAG de la III Región, deberá aprobar la red de monitoreo de MPS y la inspección periódica del sistema, como, asimismo, controlar el cumplimiento del presente decreto en lo relativo a la protección de la calidad ambiental del medio agrícola.	N.A.
7°	Sobre las condiciones que permiten considerar válida las mediciones de concentración de MPS.	Se sugiere incorporar, explícitamente, las condiciones de equipamiento y selección de sitios de medición mencionadas en la Guía de ASTM (2017), con excepción de lo referido a la distancia a caminos.
8°	Sobre el incumplimiento de obligaciones y las sanciones a aplicar.	N.A.
9°	Sobre la Planta de Pellets y las consideraciones especiales para esta.	Se recomienda eliminar este artículo, de forma que la Planta de Pellets no esté eximida de cumplir con la norma de MPS.
10°	Sobre la exigencia a las fuentes emisoras de reducir sus emisiones cuando se sobrepase la concentración máxima permisible de MPS y otras especificaciones.	N.A.
Nuevo	Sobre las condiciones de superación de la norma	Se sugiere incorporar un nuevo artículo que indique que la norma como concentración anual de MPS y hierro en MPS se consideran sobrepasadas si el promedio aritmético de un año es mayor o igual a los límites respectivos, establecidos en el artículo 4. La norma como concentración mensual de MPS se considera sobrepasada si el percentil 84 de las concentraciones promedio de 30 días durante un es mayor o igual al límite establecido en el artículo 4. La norma como concentración mensual de hierro en MPS se considera sobrepasada si el límite se supera más de dos veces en un año o más de una vez entre el 1 de septiembre y el 15 de diciembre.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, es relevante destacar que, mediante criterio experto, **se recomienda aplicar la norma de MPS en el mismo polígono que se utiliza para la norma de MP10**, presentado en la Figura 1-1. La razón detrás de esta sugerencia radica en que todas las fuentes que emiten cantidades significativas de MP10 también lo hacen para MPS. De esta forma, se garantiza la regulación de todas las fuentes emisoras actuales y potencialmente futuras de manera integral. Además, el polígono de la Figura 1-1 abarca la totalidad del sector olivícola sensible al MPS en la zona de Huasco.

4.5.6 Evaluación del costo de aplicación de las propuestas regulatorias

Los costos de implementar las modificaciones al articulado sugeridas se estimaron en base dos ítem: (i) el costo de una tecnología de abatimiento nueva para la Planta de Pellets y (ii) en base al recambio de los monitores actuales por unos que cumplan con el estándar ASTM 2017.

En cuanto al costo de implementar una nueva medida de abatimiento, se seleccionó el filtro de mangas como nueva tecnología, ya que la Planta de Pellets ya cuenta con precipitadores electrostáticos. El supuesto más importante en ese ítem es que la Planta no cumple con la norma y que esta tecnología permitiría cumplirla. Este supuesto se toma dado que no fue posible verificar el cumplimiento por parte de la Planta. De esta forma, considerando el caudal máximo reportado en 2022 para las chimeneas A y B, y los costos reportados en la Sección 4.3.3, se determinó que el VAN de adquirir y operar dos filtros de manga sería de 8.749.465 UF (\$317.517.648.779 CLP), calculado en un horizonte de 10 años, con una tasa de descuento de 6%.

Para el segundo ítem, se calculó el costo de recambiar los colectores de las 6 estaciones de monitoreo más agregar una séptima estación cercana a las líneas del tren, lo que equivale a la adquisición de 14 nuevos colectores, considerando que por cada estación hay dos colectores. De acuerdo con personal de la empresa SERVIAMB, el costo aproximado de un colector de estándar británico es de \$850.000 sin IVA y la fabricación de un colector con un diseño distinto tendría un costo mayor. Se estimó que este costo podría estar entre 1,5 a 2 veces el costo del colector británico, por lo que se determinó que la adquisición de los nuevos colectores podría estar entre \$17.850.000 CLP y \$23.800.000 CLP. Además, el costo de mano de obra que instale dichos monitores se estimó en \$854.743, que es el salario promedio de un técnico instrumentista en Chile de acuerdo con la plataforma <https://cl.computrabajo.com/>. Así, considerando necesarios dos técnicos instrumentistas, se llega a que el costo total del recambio de colectores podría estar entre \$19.559.486 y \$25.509.486 CLP.

Finalmente, asumiendo que el recambio de los colectores se hacen en el mismo año en que se instala la nueva tecnología, el VAN total de implementar las modificaciones al articulado sería de entre \$317.537.208.265 y \$317.543.158.265.

5. Conclusiones

El presente estudio se desarrolló para dar cumplimiento al objetivo de recomendar líneas de acción futuras mediante la evaluación del impacto en la calidad del aire generado por la aplicación del Plan de Prevención en la localidad de Huasco, junto con la entrega de antecedentes para revisar la norma de calidad del aire por MPS. A continuación, se presentan las conclusiones del desarrollo asociado al cumplimiento del objetivo específico 1) y 2).

Para el primer objetivo se llevó a cabo una identificación, caracterización y sistematización de las fuentes emisoras de MP10, MP2,5 y sus precursores, a partir de los DIA y EIA de proyectos de las principales fuentes identificadas, correspondientes a la Central Termoeléctrica Guacolda, la Planta de Pellets de CAP Minería, Puerto Las Losas, Central Térmica Huasco y el ferrocarril. Una vez identificadas las fuentes, se solicitó información sobre los niveles de actividad y otros parámetros a las empresas emisoras para la estimación del inventario de emisiones para los años comprendidos entre 2017 y 2021. De los resultados es posible concluir que el principal responsable de las emisiones de material particulado es la Planta de Pellets, abarcando, en promedio, más de un 57% de las emisiones anuales. Las principales fuentes de emisión de material particulado son, en el caso de la Planta de Pellets, las chimeneas que evacúan los gases de las líneas de peletización 2A y 2B, la erosión eólica en canchas de acopio y la carga y descarga de material. En Guacolda las emisiones son generadas principalmente por las chimeneas que evacúan los gases de las distintas unidades generadoras y el transporte por caminos no pavimentados.

Además de las principales fuentes emisoras puntuales identificadas, se utilizó información adicional proveniente del RETC, RFP e INFOR, para identificar otras fuentes puntuales adicionales, además de fuentes difusas de material particulado y sus precursores (transporte, quemas agrícolas, incendios urbanos y consumo de leña). A partir de esta revisión, se concluye que las principales fuentes puntuales adicionales corresponden a grupos electrógenos, representando aproximadamente un 66% de las fuentes.

A partir de las emisiones totales estimadas por fuente para el año 2021, se realizó una proyección del inventario a 2036, considerando potenciales fuentes nuevas como la chimenea 3 de CMP, el proyecto Cerro Blanco, la planta desalinizadora de Guacolda y el depósito de relaves filtrados de CMP. Las emisiones de MP10 proyectadas para la Planta de Pellets aumentan, en promedio, un 7% anual, mientras que en el caso de Guacolda disminuyen un 14% anual, principalmente debido al retiro de centrales a carbón. Se destaca la mejora en el sistema de abatimiento de MP de la chimenea 2B de CMP a partir de 2022, y el significativo aumento de emisiones generadas por las chimeneas en la planta debido a la inclusión de la chimenea 3, a pesar de que su construcción no se considera probable. Las emisiones totales generadas en Huasco aumentan un 32% en 2024 y un 23% en 2025, principalmente por la inclusión de nuevas fuentes (inicio del proyecto Cerro Blanco y chimenea 3 de CMP), pero luego disminuyen en promedio un 4% anual hasta 2037, donde las emisiones totales se estiman en 352 t de MP10, levemente menor a las del año base.

Por otro lado, si bien no se logró obtener resultados significativos mediante la campaña de monitoreo de background, se utilizó el enfoque de modelos de Markov ocultos (HMM) para estimar el background de MP, a partir de las concentraciones de MP registradas en estaciones de monitoreo para el periodo 2019-2022. De esta forma, se estima un MP10 background correspondiente a $13,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un MP2,5 background promedio de $4,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Adicionalmente, se elabora un modelo de dispersión de emisiones para evaluar el impacto de estas en la calidad del aire por material particulado. Esto, junto con la evaluación de las medidas incluidas en el PPA Huasco, permite observar la mejora en la calidad del aire por material particulado desde la implementación del plan.

Se proponen posibles mejoras a incorporar en la actualización del PPA Huasco, como la disminución de los límites máximos de emisión para fuentes con combustión, y la modificación o eliminación de medidas que ya han sido implementadas en su totalidad. En línea con lo anterior, se proponen medidas adicionales para el control de emisiones de MP10, correspondientes a barreras de viento, filtros de manga, pavimentación, y precipitador electrostático seco. Por criterio de costo-eficiencia, se seleccionan las medidas de pavimentación de los caminos de Huasco e internos de las instalaciones, y la implementación de barreras de viento en canchas de acopio y zonas de carga y descarga de la Planta de Pellets.

Respecto al MPS, se analizó su comportamiento a partir de sus concentraciones históricas y las del hierro en MPS registradas por la Red de Monitoreo CAP MPS entre los años 2000 y 2020, exceptuando el año 2015. Se observó que, en gran parte de las estaciones, las concentraciones medianas y valores máximos o mínimos no presentaron una tendencia clara al alza o a la baja. La estación N°6 es la que presenta menores concentraciones anuales tanto de MPS como de hierro, y es también la que se encuentra más lejana a la ciudad de Huasco. Las concentraciones anuales de MPS, por lo general, cumplieron con el límite establecido en el D.S. N°4/1992 del MINAGRI, sin embargo, el año 2016 y 2017 se superó la normativa en las estaciones 5 y 4, respectivamente. Posterior a estos años se cumple con el máximo establecido en todas las estaciones, sin embargo, en las estaciones 2, 4 y 5 se supera la latencia en algunos años, a excepción del 2019, en donde se registraron los promedios más bajos. En cuanto al hierro contenido en MPS, en ningún año se supera el máximo legal, y se observa una clara tendencia a la baja. Respecto a las concentraciones mensuales, se observa que los meses de invierno presentan concentraciones menores en todas las estaciones, mientras que entre noviembre y febrero se presentan las máximas.

Continuando con MPS, se recopiló normativa internacional existente. Si bien la regulación ambiental de este contaminante a nivel global es escasa, se compilaron los valores límites establecidos en algunas zonas de países como Brasil, Argentina, Alemania, EEUU, y en Suiza. A nivel internacional, los límites para MPS están incluidos en normativas generales sobre la calidad del aire, a diferencia de Huasco cuya regulación es específica para el MPS, lo que permite que sea más exhaustiva en sus condiciones y aplicación. En esta línea, los valores máximos internacionales son, en promedio, 2,3 veces mayores al establecido en Huasco, a excepción del establecido para zonas rurales y de baja densidad poblacional en Nueva York. Por consiguiente,

posee una concentración máxima permisible exigente en comparación con otros países. Tanto la norma de Suiza como la de Nueva York tienen un enfoque en la naturaleza o en la disminución del impacto en agricultura, por lo que son candidatas a ser utilizadas como referencia, teniendo en consideración sus diferencias a nivel territorial. De todas formas, es relevante destacar que la normativa de Huasco, al ser específica para la cuenca, está adaptada a las condiciones del territorio. Además, es la única que establece un límite para hierro en MPS, a pesar de su antigüedad.

En línea con lo anterior, se llevó a cabo una revisión de estudios sobre MPS realizados en la zona de Huasco, así como también investigaciones científicas que abordan los efectos de este contaminante sobre los recursos naturales. Estos fueron sistematizados junto con sus principales conclusiones, identificando también los métodos de medición de la concentración de MPS.

La revisión de estudios en Huasco muestra una caracterización de concentraciones de MPS y hierro contenido en MPS desde 2008 al 2021. Se observa que las fuentes principales de este contaminante son La Central Termoeléctrica Guacolda y el Complejo perteneciente a CAP. Al comparar las concentraciones mensuales y anuales se evidencia que no se ha superado de manera global la Norma de Calidad del Aire de la zona, sin embargo, en casos puntuales de monitoreo se presentaba un nivel de latencia o superación en estaciones específicas que se encontraban más cercanos a las instituciones mencionadas. A priori, se recomienda mantener los límites actuales de la normativa de MPS debido a que comparando con la normativa internacional es una de las normativas más exigentes encontradas.

La revisión de literatura científica sobre el impacto del MPS en recursos naturales permitió identificar efectos negativos en plantas, biota acuática y agua subterránea. De forma resumida, los artículos consultados evidencian que, en plantas, el MPS genera una disminución de la tasa fotosintética de las especies y una disminución de su productividad. Además, se produce la traslocación de metales pesados desde la hoja hasta el tallo y raíces. En cuanto a la biota acuática, existe evidencia de que el MPS, al estar conformado por aglomeraciones de nanopartículas, una vez en contacto con el agua, es capaz de dispersarse y liberar contaminantes en forma de nanopartículas al medio, lo que genera impactos negativos en algunas especies animales acuáticas y consecuentemente, en los seres humanos que ingieran dichas especies. Por último, en el caso del agua subterránea, se encontró evidencia de contaminación por Fe en las muestras tomadas, lo que se atribuyó tanto a fuentes naturales como antropogénicas. La fuente natural es la meteorización de rocas con contenido alto de hierro y a la cercanía de industrias que procesan este metal. Algunos de los autores consultados concluyen que en la regulación del MPS es importante no solo considerar la vía de exposición atmosférica, sino que también la interacción de este contaminante con otros medios.

La revisión de metodologías de medición demostró la factibilidad de seguir con el método de muestreo pasivo y gravimetría debido a las reiteradas aplicaciones que han ocupado la metodología de medición. De los estudios de efectos en recursos naturales y metodología en

MPS fue el método más concurrido, presentándose como un método simple implementación y baja inversión que se encuentra en constante mejoramiento y actualización.

Finalmente, como resultado del estudio, se hacen tres sugerencias de modificación al articulado de la norma. La primera es en relación al método de medición, en donde lo que se sugiere es actualizar las condiciones de muestreo utilizando los lineamientos contenidos en el documento Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter) – D1739-98 (ASTM, 2017) e incluirlos de forma explícita en el artículo de forma de asegurar que las mediciones sean precisas. La segunda modificación es con respecto a las excepciones de la norma que aplican a la Planta de Pellets, que es la fuente de emisión de MPS más importante, en donde la propuesta es eliminar el artículo asociado, de forma que estas excepciones dejen de aplicar. En tercer lugar, se propone agregar un artículo que especifique las condiciones de superación de la norma a nivel anual y mensual para MPS y hierro en MPS. Por último, se recomienda aplicar la norma de MPS en el mismo polígono que se utiliza para la norma de MP10, presentado en la Figura 1-1.

6. Bibliografía

- Algoritmos. (2022). *Memoria de Cálculo de Emisiones 2018*. 723–781.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter) - D1739-98 (Reapproved 2017)*. <https://doi.org/10.1520/D1739-98R17>
- Banco Central de Chile. (n.d.). *Set de Gráficos*. <https://si3.bcentral.cl/setgraficos/>
- Bengalla Mining Company. (2012). *Coal Mine Particulate Matter Control Best Practice Management Determination*.
- Carrianza, J., Choque, K., Mallea, M., Rojas, A., & Valverde, S. (2021). *La incorporación del Material Particulado como parámetro en el ECA Aire para la evaluación ambiental*.
- CDT. (2015). *Medición del Consumo Nacional de Leña y Otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera. Para El Ministerio de Energía*.
- Centro de Investigación Minera y Metalúrgica. (1992). *Especificaciones técnicas para implementación de red de monitoreo material particulado sedimentable en cuenca Río Huasco*.
- Chaurasia, M., Patel, K., Tripathi, I., & Rao, K. S. (2022). Impact of dust accumulation on the physiological functioning of selected herbaceous plants of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(53), 80739–80754. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21484-4>
- Chi-Jen Chen, & Leonard F.S. Wang. (2001). *Cost-benefit analysis of electrocyclone and cyclone*. [https://pdf.sciencedirectassets.com/271808/1-s2.0-S0921344900X00559/1-s2.0-S0921344900000860/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEKf%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQCOxcDiw2M30%2FyzxUCkCTfimhw43uYYQ4zR7mJzwStVvQlgTlgJcGC4C](https://pdf.sciencedirectassets.com/271808/1-s2.0-S0921344900X00559/1-s2.0-S0921344900000860/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEKf%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQCOxcDiw2M30%2FyzxUCkCTfimhw43uYYQ4zR7mJzwStVvQlgTlgJcGC4C)
- Comunidad Autónoma de Aragón. (1990). *Ley 2/1990, de 21 de marzo, de declaración de Monumentos Naturales de los glaciares pirenaicos*.
- CONAMA. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. Gobierno de Chile, Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- Congreso de la Nación Argentina. (2010). *Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial*. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26639-174117/texto>
- Congreso de la República del Perú. (1997). *Ley N° 26.834 sobre Areas Naturales Protegidas*. <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/26834.pdf>
- Congreso de la República del Perú. (2005). *Ley N° 28.611. Ley General del Ambiente*. <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28611.pdf>
- Congreso de la República del Perú. (2009). *Ley N° 29.338. Ley de Recursos Hídricos*. In *Handbook of Agri-Food Law in China, Germany, European Union: Food Security, Food Safety, Sustainable Use of Resources in Agriculture*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67666-1_6
- COREMA III Región. (2010). *RCA Proyecto "Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets"*.

- De Rus, G. (2011). The BCA of HSR: Should the Government Invest in High Speed Rail Infrastructure? *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 2(1, Article 2). <https://doi.org/10.2202/2152-2812.1058>
- Department of Conservation New Zealand. (1980). *National Parks Act 1980* (Issue October). <http://faolex.fao.org/docs/pdf/ant6353.pdf>
- Diario Oficial Colombia. (1968). *DECRETO 2420 de 1968* (pp. 1–23).
- DICTUC. (2023). *Definición de criterios para la justificación en el uso de normas y valores de referencia para la evaluación ambiental - INFORME FINAL*. 1–108.
- DICTUC, & Facultad de Agronomía PUC. (2012). *Proyecto FIC : 33-01-773 : Estudio Para Evaluar el Impacto de la Contaminación Atmosférica Sobre el Rubro Olivícola , Sector Costero Valle del Huasco - INFORME FINAL*. 1–196. https://goreatacama.gob.cl/wp-content/uploads/2019_03_12_Inf_FIC_2010_Evaluar_Impacto_Contaminación_Atmosférica_valle_Huasco.pdf
- Dirección de Planeamiento. (2001). *Análisis de Beneficio Social del Mantenimiento Vial de Obras Públicas*. 1–14.
- EMEP/EEA. (2016). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook - 2016*, 21, 71–76. <https://doi.org/10.2800/247535>
- Environment Agency UK. (2013). *Monitoring Particulate Matter in Ambient Air around Waste Facilities*.
- EPA. (1998a). Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter. In *Organization* (Vol. 1, Issue 68, p. 2).
- EPA. (1998b). US EPA AP-42 Section 1.1 Bituminous and Subbituminous Coal Combustion (Final Section - Supplement E, September 1998). In *Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (p. 52).
- EPA. (1998c). US EPA AP-42 Section 1.4 Natural Gas Combustion (Final Section - Supplement D , July 1998). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*.
- EPA. (1999). US EPA AP-42 Section 1.3 Fuel Oil Combustion (Final Section - Supplement E September 1999, corrected May 2010). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, 1(4), 1.3-24.
- EPA. (2008). US EPA AP-42 Section 1.5 Liquefied Petroleum Gas Combustion (Final Section - Updated, July 2008). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, 8–11.
- EPA. (2010). Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition. *EPA-420-R-10-018. NR-009d. U.S. Environmental Protection Agency*, 1–141.
- Eriksson, A., Andersson, C., Ahmed, H., Dahlin, A., Kumar, T. K. S., & Semberg, P. (2021). Effect of varied oxygen levels on the oxidation of a magnetite pellet bed during pot furnace induration. *ISIJ International*, 61(5), 1439–1449. <https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.ISIJINT-2020-469>
- Farnfield, R. A., & Birch, W. J. (1997). Environmental dust monitoring using computer scanned images obtained from Sticky pad poly-directional dust gauges. *Clean Air*, 27, 73–76.
- Ferreira, a. D., Viegas, D. X., & Sousa, a. C. M. (2003). Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers. *Journal of Wind*

- Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(10), 1271–1283.
[https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(03\)00077-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(03)00077-1)
- Fortes, W. M. P. A., Souza, I. da C., Azevedo, V. C., Griboff, J., Monferrán, M. V., Wunderlin, D. A., Matsumoto, S. T., & Fernandes, M. N. (2023). Metal/metalloid bioconcentration dynamics in fish and the risk to human health due to water contamination with atmospheric particulate matter from a metallurgical industrial area. *Science of the Total Environment*, 902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166119>
- GAC consultores. (2014). *Emisiones y calidad del aire en Huasco*.
- García Pachón, M. d. (2018). *La conservación de glaciares y humedales como ecosistemas proveedores de agua dulce a través del SINAP*.
- Ghosh, S., Dutta, R., & Mukhopadhyay, S. (2023). A Review on Seasonal Changes in Particulate Matter Accumulation by Plant Bioindicators: Effects on Leaf Traits. In *Water, Air, and Soil Pollution* (Vol. 234, Issue 8). Institute for Ionics. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06549-5>
- Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos. (2022). Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. *Diario Oficial de La Federación*, 142. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26639-174117/texto>
- GORE Atacama. (2019a). *Diagnóstico Conectividad Vial Región de Atacama*.
- GORE Atacama. (2019b). *Diagnóstico Conectividad Vial Región de Atacama*.
- Government of Canada. (2000). Canada National Parks Act. Loi sur les parcs nationaux du Canada. *Interpretation A Journal Of Bible And Theology*.
- GreenLabUC. (2014). ANTECEDENTES PARA ELABORAR EL PLAN DE PREVENCIÓN DE LA LOCALIDAD DE HUASCO. 21, 117–129. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2015/proyectos/633_VTA_INFORME_FINAL_Antecedentes__Elaborac__PPHUASCO_2015.pdf
- H. W. Vallack, & D. E. Shillito. (1998). Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment*, 32.
- Hall, D. J., & Upton, S. L. (1988). A WIND TUNNEL STUDY OF THE PARTICLE COLLECTION EFFICIENCY OF AN INVERTED FRISBEE USED AS A DUST DEPOSITION GAUGE*. In *Atmospheric Environment* (Vol. 22, Issue 7).
- INE. (2018). *Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050. Total país. Metodología y principales resultados*.
- Ingea, & In-Data. (2022). *Banco de alternativas de compensación de emisiones para la ciudad de Calama y su área circundante*.
- Instituto Nacional de Estadística. (2021). *Permisos de circulación*. <https://www.ine.gob.cl/Estadisticas/Economia/Transporte-y-Comunicaciones/Permiso-de-Circulacion>.
- Jefatura del Estado. (2007). *Ley 42/2007, de 13 de diciembre, de Patrimonio Natural y de la Biodiversidad*. <http://www.citeulike.org/user/LNCScatalogo/article/10236401?updated=1334769541&rejected=>
- Lara, R., Suárez-Peña, B., Megido, L., Negral, L., Rodríguez-Iglesias, J., Fernández-Nava, Y., & Castrillón, L. (2021). Health risk assessment of potentially toxic elements in the dry

- deposition fraction of settleable particulate matter in urban and suburban locations in the city of Gijón, Spain. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106794>
- Lu, K., Shen, D., Liu, X., Dong, S., Jing, X., Wu, W., Tong, Y., Gao, S., & Mao, L. (2020). Uptake of iron oxide nanoparticles inhibits the photosynthesis of the wheat after foliar exposure. *Chemosphere*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127445>
- Meravi, N., Singh, P. K., & Prajapati, S. K. (2021). Seasonal variation of dust deposition on plant leaves and its impact on various photochemical yields of plants. *Environmental Challenges*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100166>
- Milena Machado, Jane Meri Santos, Valdério Anselmo Reisen, Neyval Costa Reis Jr., Ilias Mavroidis, & Ana T. Lima. (2018). A new methodology to derive settleable particulate matter guidelines to assist policy-makers on reducing public nuisance. *Atmospheric Environment*, 182.
- MINAGRI. (1992). *Decreto 4 EXENTO - ESTABLECE NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE PARA MATERIAL PARTICULADO SEDIMENTABLE EN LA CUENCA DEL RIO HUASCO III REGION.*
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI). (2022). *Decreto N°88/2022 Establece tabla de costos para el año 2022, que fija los valores de las actividades que se bonificarán en el marco del Sistema de Incentivo para Sustentabilidad Agroambiental de los suelos agropecuarios.* <https://doi.org/10.2307/j.ctv17hm82d.6>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2012). *Decreto 38. 38.*
- Ministerio del Medio Ambiente y el Congreso de Colombia. (1959). *Ley 2 De 1959* (p. 1).
- MINVU. (2007a). *Investigación de Bases y Subbases de pavimentación.*
- MINVU. (2007b). *Investigación de Bases y Subbases de pavimentación.*
- MMA. (2012a). *Decreto 40 - DECLARA ZONA LATENTE POR MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE MP10, COMO CONCENTRACIÓN ANUAL, A LA LOCALIDAD DE HUASCO Y SU ZONA CIRCUNDANTE. 2012.*
- MMA. (2012b). *Decreto 40 - DECLARA ZONA LATENTE POR MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE MP10, COMO CONCENTRACIÓN ANUAL, A LA LOCALIDAD DE HUASCO Y SU ZONA CIRCUNDANTE. 2012.* <https://bcn.cl/2f4yz>
- MMA. (2017a). *Decreto 38 - ESTABLECE PLAN DE PREVENCIÓN DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA LOCALIDAD DE HUASCO Y SU ZONA CIRCUNDANTE. 2017.*
- MMA. (2017b). *Manual para el Desarrollo de Inventarios de Emisiones Atmosféricas.*
- MMA. (2017c). *Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Huasco.* <https://pras.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/11/PRAS-Huasco.pdf>
- MMA. (2017d). *Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Huasco.*
- MMA. (2019a). *Guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales.*
- MMA. (2019b). *Guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales, RETC.*
- MMA. (2021). *Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes 2005-2019.*
- Morales-Casa, V., Barraza, F., Collante, E., Ginocchio, R., Jorquera, H., Lambert, F., Ospina, E., Sáez-Navarrete, C., & Varas, J. (2020). Sedimentation rate of settleable particulate matter in

- Santiago city, Chile. *Environmental Quality Management*, 29(3), 17–25. <https://doi.org/10.1002/tqem.21672>
- Nadgórska–Socha, A., Kandziora-Ciupa, M., Trzęsicki, M., & Barczyk, G. (2017). Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*, 183, 471–482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>
- Ortiz Poblete, T. I. (2018). *Caracterización de polvo negro en la comuna de Huasco, III Región*. [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/150647/Tamara Ivana Ortiz Poblete.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/150647/Tamara_Ivana_Ortiz_Poblete.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Parlamento Italiano. (1999). *Decreto Legislativo 29 ottobre 1999, n. 490* (Vol. 1999).
- Saha, P., & Paul, B. (2019). Groundwater quality assessment in an industrial hotspot through interdisciplinary techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7418-z>
- Sandeep Kumar, T. K., Viswanathan, N. N., Ahmed, H., Dahlin, A., Andersson, C., & Bjorkman, B. (2019). Investigation of Magnetite Oxidation Kinetics at the Particle Scale. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 50(1), 150–161. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1459-5>
- Santillán-Lima, G., Damián-Carrión, D., Rodríguez-Llerena, M., Torres-Rodríguez, S., Cargua-Catagña, F., & Torres-Barahona, S. (2016). *Estimación del grado de contaminación de material particulado atmosférico y sedimentable en el laboratorio de servicios ambientales de la UNACH*. 2, 32–39.
- SEMARNAT. (2015). *Programa de Manejo Parque Nacional El Pico de Orizaba*.
- SEREMI Medio ambiente Región Metropolitana. (2012). *Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Proyectos Inmobiliarios para la Región Metropolitana*.
- SERNAGEOMIN. (2022). *Datos Públicos Depósitos de Relave*. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- SMA. (2022). *Informe Técnico: Cumplimiento de Normas de Calidad del Aire por MP10, plomo, MPS, NO2 y SO2. Redes de Calidad del Aire de Atacama*. www.sma.gob.cl
- SMA. (2023). *Resolución Exenta N°14 Fija Programa y subprograma de fiscalización ambiental de planes de prevención y/o descontaminación para el año 2023*.
- Souza, I. da C., Morozesk, M., Mansano, A. S., Mendes, V. A. S., Azevedo, V. C., Matsumoto, S. T., Elliott, M., Monferrán, M. V., Wunderlin, D. A., & Fernandes, M. N. (2021). Atmospheric particulate matter from an industrial area as a source of metal nanoparticle contamination in aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 753. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141976>
- Superintendencia del Medio Ambiente. (2014). *Evaluación del Instrumento Compensación de Emisiones Región Metropolitana*.
- The Federal Assembly of the Swiss Confederation. (1907). *Swiss Civil Code* (Issue I). https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/24/233_245_233/en
- U.S. Energy Information Administration. (2021). *Gasoline explained*. <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/gasoline-and-the-environment.php>
- U.S. National Congress. (1916). *National Park Service Organic Act*. https://www.nps.gov/parkhistory/online_books/fhpl/nps_organic_act.pdf

- US-EPA. (1986). *AP-42 Ch.12.5 "Iron and Steel Production."*
- US-EPA. (1996a). *AP-42 Ch 3.4 "Large Stationary Diesel and All Stationary Dual-fuel Engines."*
- US-EPA. (1996b). *AP-42, chapter 3.3 Gasoline and Diesel Industrial Engines. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, AP-42, 1c, 1–9.*
- US-EPA. (2006a). *AP-42 Ch 13.2 "Aggregate Handling and Storage Piles". 4–9.*
- US-EPA. (2006b). *AP-42 Ch 13.2.1 "Paved Roads." In AP-42 Miscellaneous Sources (pp. 1–11).*
- US-EPA. (2006c). *AP-42 Ch 13.2.2 "Unpaved Roads."*
- US-EPA. (2006d). *AP-42, Ch.13.2.5 "Industrial Wind Erosion."*
- US-EPA. (2016a). *Control Strategy Tool (CoST) - "At a Glance" Control Measure Document. 1(1), 1–12.*
- US-EPA. (2016b). *Control Strategy Tool (CoST) - "At a Glance" Control Measure Document. 1(1), 1–12.*
- Velez-Guerrero, A., Callejas-Cuervo, M., & Alarcón-Aldana, A. (2023). The Evolution of Air Quality Monitoring: Measurement Techniques and Instruments. *Journal of Hunan University Natural Sciences, 50(5)*. <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.50.5.14>
- Xiao-hui, F., Zhi-yuan, Y., Min, G., Wen-qi, L., & Zhi-yun, J. I. (2013). *Influence of O2 Content in Circulating Flue Gas on Iron Ore Sintering.*
- Xu, L., Yan, Q., He, P., Zhen, Z., Jing, Y., Duan, Y., & Chen, X. X. (2022). Combined effects of different leaf traits on foliage dust-retention capacity and stability. *Air Quality, Atmosphere and Health, 15(7)*, 1263–1274. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01141-4>
- Zhang, H., Rao, M., Fan, Z., Zhang, Y., Li, G., & Jiang, T. (2012). Effects of circulated flue gas components on iron ore sintering. *ISIJ International, 52(12)*, 2139–2144. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.2139>

7. Anexos

7.1 Diagrama de procesos de la Central Termoeléctrica Guacolda

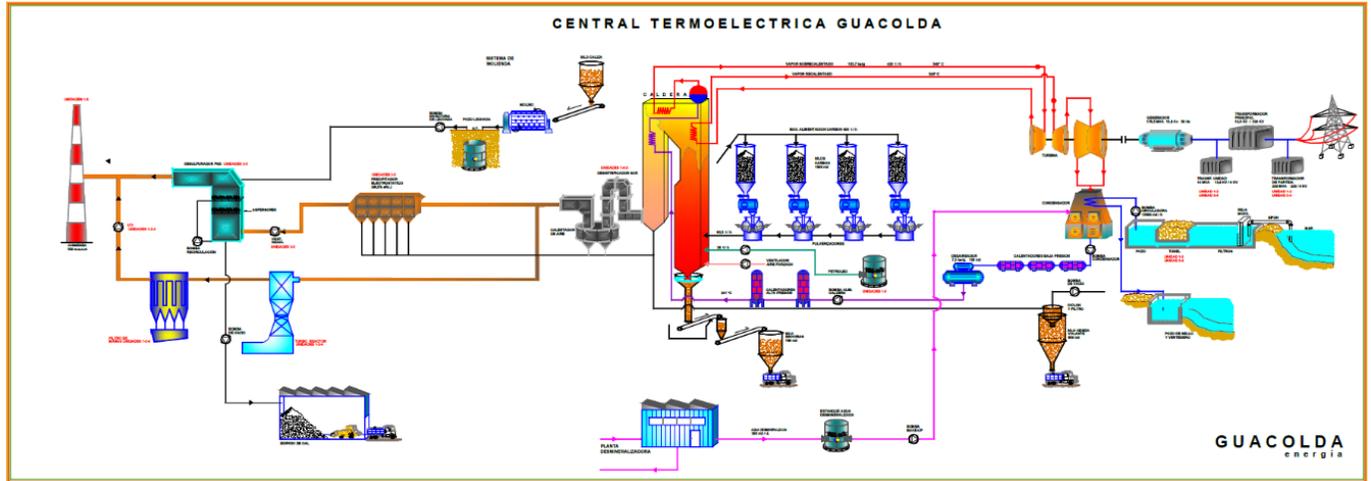


Figura 7-1 Diagrama de Procesos de Guacolda

Fuente: Guacolda Energía S.A.

7.2 Diagrama de procesos de la Planta de Pellets

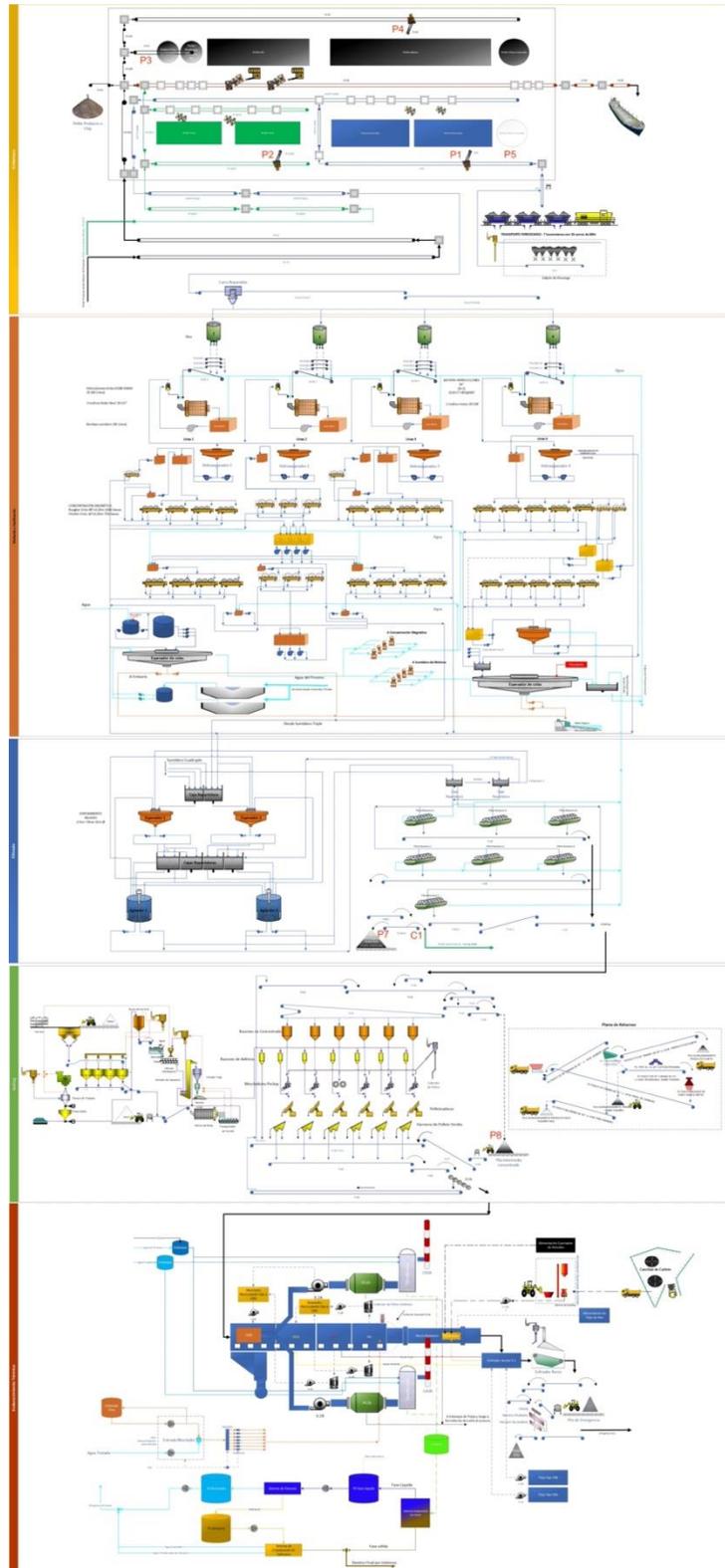


Figura 7-2 Diagrama proceso Planta de Pellets

Fuente: Compañía Minera del Pacífico

7.3 Niveles de actividad para la estimación de emisiones de grandes fuentes

Tabla 7-1 Niveles de actividad para Grandes Fuentes

Instalación	Proceso	2017	2018	2019	2020	2021	Unidad
Planta de Pellets	Caldera	790.857,3	719.620,1	200.112,3	483.580,2	553.350,0	kg/año
	Carga y descarga de material	57.426.275,2	52.253.552,0	14.530.688,9	35.114.055,4	40.180.230,2	ton/año
	Chimenea	11.698,0	11.698,0	11.698,0	10.156,0	5.849,0	h/año
	Correa transportadora	125.537.042,5	111.052.411,5	29.411.920,3	81.772.955,8	93.436.477,4	ton/año
	Erosión eólica	8.986,4	8.176,9	2.273,8	5.494,8	6.287,6	ha-día/año
	Grupo electrógeno	230.692,3	209.912,5	58.372,6	141.059,9	161.411,7	kg/año
	Harneado	2.763,8	2.514,9	699,3	1.690,0	1.933,8	ton/año
	Maquinaria	355,5	39.545,5	25.458,3	53.635,8	47.827,7	h/año
	Motor vehículo	1.041.157,2	947.374,0	263.446,1	636.629,3	728.480,7	km/año
	Tránsito - no pavimentado	26.547,3	24.156,0	6.717,3	16.232,7	18.574,7	km/año
	Tránsito - pavimentado	1.006.202,6	915.568,0	254.601,5	615.255,9	704.023,6	km/año
Termoeléctrica Guacolda	Carga y descarga de material	2.202.896,2	2.884.385,3	3.081.842,4	2.842.202,6	2.607.747,6	ton/año
	Chimenea	30.270,0	32.847,0	32.553,0	33.091,0	31.382,0	h/año
	Correa transportadora	3.082.640,0	3.972.432,0	4.364.270,0	3.944.240,0	3.895.710,0	ton/año
	Erosión eólica	2.222,9	2.222,9	2.222,9	2.222,9	2.222,9	ha-día/año
	Grupo electrógeno	2.080,0	2.080,0	2.080,0	2.080,0	2.080,0	kWh/año
	Maquinaria	9.029,3	9.936,5	10.451,2	12.301,1	10.897,2	h/año
	Motor vehículo	269.305,8	314.161,4	365.077,8	322.648,8	320.699,2	km/año
	Tránsito - no pavimentado	176.059,8	216.077,4	245.107,8	211.654,8	211.201,2	km/año
	Tránsito - pavimentado	93.246,0	98.084,0	119.970,0	110.994,0	109.498,0	km/año
Puerto Las Losas	Carga y descarga de material	174.517,0	174.517,0	991.594,0	361.758,0	553.700,0	ton/año
	Correa transportadora	174.517,0	174.517,0	0,0	361.758,0	553.700,0	ton/año
	Erosión eólica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	ha-día/año
	Grupo electrógeno	10.496,0	11.200,0	18.976,0	19.328,0	19.328,0	kWh/año
	Maquinaria	0,0	0,0	0,0	1.160,0	976,0	h/año
	Motor vehículo	0,0	0,0	127.897,8	127.897,8	191.645,4	km/año
	Tránsito - no pavimentado	0,0	0,0	20.655,5	20.655,5	4.125,4	km/año

Instalación	Proceso	2017	2018	2019	2020	2021	Unidad
	Tránsito - pavimentado	0,0	0,0	107.242,3	107.242,3	187.520,0	km/año
Central Térmica Huasco	Chimenea	62,1	33,2	14,8	26,4	23,1	h/año
	Motor vehículo	3.379,1	4.167,8	4.605,5	6.111,9	8.274,8	km/año
	Tránsito - no pavimentado	3.379,1	4.167,8	4.605,5	6.111,9	8.274,8	km/año
Línea Férrea	Tránsito - línea férrea	1.193.550,0	1.193.550,0	1.193.550,0	1.193.550,0	1.193.550,0	km/año

Fuente: Elaboración propia

7.4 Factores de emisión para la estimación de emisiones de fuentes puntuales de otras industrias

Tabla 7-2 Factores de emisión por CCF8 para la estimación de emisiones de fuentes puntuales

CCF8	Contaminante	FE	Unidad FE	Combustible	FE [ton/ton]	Fuente
10100801	SO2	97.30	kg/ton	Coke de Petróleo (Petcoke)	0.09730	AP42
10100201	SO2	34.47	kg/ton	Carbón Bituminoso Pulverizado	0.03447	AP42
10200501	SOx	0.01	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
10300501	SOx	0.01	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
10200401	SOx	0.01	kg/m3	Petróleo N 6	0.00001	AP42
20100101	SOx	0.00	kg/MJ	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00010	AP42
10301001	SOx	0.00	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00000	AP42
10201002	SOx	0.00	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00000	AP42
10301002	SOx	0.00	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00000	AP42
10100201	MP10 filtrable	30.66	kg/ton	Carbón Bituminoso Pulverizado	0.03066	AP42
10100201	MP2,5 filtrable	17.45	kg/ton	Carbón Bituminoso Pulverizado	0.01745	AP42
10200502	SOx	0.01	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
10200401	MP10 filtrable	0.32	kg/m3	Petróleo N 6	0.00034	AP42
10200401	MP2,5 filtrable	0.21	kg/m3	Petróleo N 6	0.00022	AP42
10100801	MP10 filtrable	0.72	kg/ton	Coke de Petróleo (Petcoke)	0.00072	AP42
10100801	MP2,5 filtrable	0.41	kg/ton	Coke de Petróleo (Petcoke)	0.00041	AP42
10200401	MP10 primario	0.50	kg/m3	Petróleo N 6	0.00053	AP42
10200401	MP2,5 primario	0.39	kg/m3	Petróleo N 6	0.00041	AP42
10100201	NH3	0.26	kg/ton	Carbón Bituminoso Pulverizado	0.00026	AP42
10200401	NH3	0.10	kg/m3	Petróleo N 6	0.00010	AP42
10200401	NOx	5.63	kg/m3	Petróleo N 6	0.00596	AP42
20100102	SO2	4.76	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00566	AP42
20300101	SO2	4.76	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00566	AP42
10300603	COV	88.10	kg/m3	Gas Natural	115.92308	AP42
20100102	NOx	72.38	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.08616	AP42

CCF8	Contaminante	FE	Unidad FE	Combustible	FE [ton/ton]	Fuente
20300101	NOx	72.38	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.08616	AP42
10300603	MP2,5 primario	121.74	kg/m3	Gas Natural	160.18463	AP42
10201002	NOx	2.28	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00419	AP42
10201002	MP10 primario	0.13	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00024	AP42
10300603	MP10 primario	121.74	kg/m3	Gas Natural	160.18463	AP42
10300603	MP2,5 filtrable	30.44	kg/m3	Gas Natural	40.04616	AP42
10300603	MP10 filtrable	30.44	kg/m3	Gas Natural	40.04616	AP42
20300101	MP10 filtrable	5.09	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00606	AP42
20300101	MP2,5 filtrable	5.09	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00606	AP42
10300603	SOx	9.61	kg/m3	Gas Natural	12.64615	AP42
20300301	NOx	24.56	kg/m3	Bencina	0.03365	AP42
20300301	MP10 filtrable	1.51	kg/m3	Bencina	0.00207	AP42
20300301	MP2,5 filtrable	1.51	kg/m3	Bencina	0.00207	AP42
20300301	SO2	1.27	kg/m3	Bencina	0.00174	AP42
10200502	NOx	2.40	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00285	AP42
10200502	NH3	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00011	AP42
10201002	MP10 filtrable	0.07	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00013	AP42
20100102	MP2,5 filtrable	1.68	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00200	AP42
10100801	NOx	9.53	kg/ton	Coke de Petróleo (Petcoke)	0.00953	AP42
10300501	MP10 primario	0.29	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00034	AP42
10301001	MP10 primario	0.12	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00023	AP42
10301002	MP10 filtrable	0.05	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00009	AP42
20100101	NOx	0.00	kg/MJ	Petróleo N 2 (Diesel)	0.01725	AP42
10301002	NOx	1.68	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00309	AP42
10301002	MP2,5 filtrable	0.05	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00009	AP42
10301002	MP10 primario	0.11	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00020	AP42
10301002	MP2,5 primario	0.11	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00020	AP42
10201002	MP2,5 primario	0.13	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00024	AP42
10300501	MP2,5 primario	0.26	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00030	AP42
10301001	MP2,5 primario	0.12	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00023	AP42
10201002	MP2,5 filtrable	0.07	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00013	AP42
10300501	MP10 filtrable	0.13	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00015	AP42
10300501	MP2,5 filtrable	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00012	AP42
10300603	NH3	7.85	kg/m3	Gas Natural	10.32769	AP42
10301001	NOx	1.80	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00331	AP42
10301001	MP10 filtrable	0.06	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00011	AP42
10301001	MP2,5 filtrable	0.06	kg/m3	Gas Licuado de Petróleo	0.00011	AP42
10200501	MP10 filtrable	0.12	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00014	AP42
10200502	MP10 filtrable	0.12	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00014	AP42
10200501	MP10 primario	0.28	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00033	AP42

CCF8	Contaminante	FE	Unidad FE	Combustible	FE [ton/ton]	Fuente
10200502	MP10 primario	0.28	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00033	AP42
10200501	MP2,5 filtrable	0.03	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00004	AP42
10200502	MP2,5 filtrable	0.03	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00004	AP42
20100101	COV	0.00	kg/MJ	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
10200501	MP2,5 primario	0.19	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00022	AP42
10200502	MP2,5 primario	0.19	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00022	AP42
20100102	MP10 filtrable	1.68	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00200	AP42
10100801	COV	0.03	kg/ton	Coke de Petróleo (Petcoke)	0.00003	AP42
10200501	NH3	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00011	AP42
10300501	NH3	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00011	AP42
10100201	NOx	14.06	kg/ton	Carbón Bituminoso Pulverizado	0.01406	AP42
10200501	NOx	2.88	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00342	AP42
10300501	NOx	2.88	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00342	AP42
10200501	SOx	0.00	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00000	AP42
10300501	SOx	0.00	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00000	AP42
10200401	SOx	0.00	kg/m3	Petróleo N 6	0.00000	AP42
10200502	SOx	0.00	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00000	AP42
10200401	MP10 filtrable	0.32	kg/m3	Petróleo N 6	0.00034	AP42
10200401	MP2,5 filtrable	0.21	kg/m3	Petróleo N 6	0.00022	AP42
10200401	MP10 primario	0.50	kg/m3	Petróleo N 6	0.00053	AP42
10200401	MP2,5 primario	0.39	kg/m3	Petróleo N 6	0.00041	AP42
20100101	MP10 filtrable	0.17	gramos/kg	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00017	EPA - Stationary Internal Combustion Sources, Sección Stationary Gas Turbines
20100101	MP2,5 filtrable	0.03	gramos/kg	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00003	EPA - Stationary Internal Combustion Sources, Sección Stationary Gas Turbines
10100201	COV	0.00	mg/GJ	Carbón Bituminoso Pulverizado	0.00000	E MEP/EEA
10300603	NOx	4,485.17	mg/m3	Gas Natural	0.00590	EPA, 1997. Section 9.9.6, Bread Baking.
30203201	COV	2.15	kg/ton	Gas Licuado de Petróleo	0.00215	AP42
10100501	SOx	0.01	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
20200201	SOx	0.00	kg/MJ	Propano	0.00010	AP42
10300502	SOx	0.01	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
10300503	SOx	0.01	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
20200501	SO2	0.01	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
10100501	SO2	0.01	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00001	AP42
20200102	SO2	4.76	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00566	AP42
20200102	NOx	72.38	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.08616	AP42

CCF8	Contaminante	FE	Unidad FE	Combustible	FE [ton/ton]	Fuente
20200102	MP10 filtrable	5.09	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00606	AP42
20200102	MP2,5 filtrable	5.09	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00606	AP42
10300502	NOx	2.40	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00285	AP42
10300503	NOx	2.40	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00285	AP42
10300502	NH3	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00011	AP42
10300503	NH3	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00011	AP42
10100501	MP10 filtrable	0.12	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00014	AP42
10100501	MP10 primario	0.28	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00033	AP42
10100501	MP2,5 filtrable	0.03	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00004	AP42
10100501	MP2,5 primario	0.19	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00022	AP42
10100501	COV	0.02	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00003	AP42
20200501	NOx	72.38	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.08616	AP42
20200501	MP10 filtrable	5.09	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00606	AP42
10300502	MP10 primario	0.29	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00034	AP42
10300503	MP10 primario	0.29	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00034	AP42
10300502	MP2,5 primario	0.26	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00030	AP42
10300503	MP2,5 primario	0.26	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00030	AP42
10300502	MP10 filtrable	0.13	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00015	AP42
10300503	MP10 filtrable	0.13	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00015	AP42
10300502	MP2,5 filtrable	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00012	AP42
10300503	MP2,5 filtrable	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00012	AP42
20200201	NOx	0.00	kg/MJ	Propano	0.00696	AP42
20200201	COV	0.00	kg/MJ	Propano	0.00005	AP42
10100501	NH3	0.10	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00011	AP42
10100501	NOx	2.88	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00342	AP42
10100501	SOx	0.00	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00000	AP42
10300502	SOx	0.00	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00000	AP42
10300503	SOx	0.00	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00000	AP42
20200501	SO2	0.00	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00000	AP42
10100501	SO2	0.00	kg/m3	Petróleo N 2 (Diesel)	0.00000	AP42

Fuente: Elaboración propia en base a los factores presentados en el estudio para la elaboración de la Guía Metodológica para la Estimación de emisiones provenientes de Fuentes Puntuales (MMA, 2019b)

7.5 Revisión de instrumentos de protección de glaciares

Tabla 7-3 Revisión de instrumentos de protección de glaciares

Vía	País	Descripción	Referencia
Directa	Argentina	<p>La Ley 26.649 de 2010 crea un marco normativo para la protección de glaciares. Se crea el inventario de glaciares y se definen actividades prohibidas que impliquen la destrucción, traslado o interfieran en el avance de glaciares, en otras palabras, que afecten su condición natural o funciones. Las actividades prohibidas en los glaciares se listan a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La liberación, dispersión o disposición de sustancias o elementos contaminantes, productos químicos o residuos de cualquier naturaleza o volumen ⁽¹⁾. • La construcción de obras de arquitectura o infraestructura con excepción de aquellas necesarias para la investigación científica y las prevenciones de riesgos; • La exploración y explotación minera e hidrocarburífera ⁽¹⁾. • La instalación de industrias o desarrollo de obras o actividades industriales. <p>Aquellas actividades que no se encuentran prohibidas deben someterse a un EIA, en el que deberá garantizarse una instancia de participación ciudadana.</p> <p>⁽¹⁾ Se incluyen en dicha restricción aquellas que se desarrollen en el ambiente periglacial.</p>	(Congreso de la Nación Argentina, 2010)
Indirecta	México	<p>La Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente dispone subzonas de preservación con ecosistemas relevantes o frágiles, o fenómenos naturales relevantes en las que se requiere el manejo de las actividades desarrolladas. Las únicas actividades permitidas son la investigación científica, monitoreo del ambiente, actividades de educación ambiental y actividades productivas de bajo impacto que no impliquen modificaciones sustanciales y promovidas por comunidades locales con supervisión constante de posibles impactos negativos.</p> <p>La definición de estas subzonas se realiza a través de la declaración parques nacionales, los que a su vez se dividen en subzonas según sus características y funciones. Los glaciares en general se consideran subzonas de preservación.</p>	(Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos, 2022) y (SEMARNAT, 2015)
	Canadá	<p>Los glaciares se protegen de manera indirecta a través del <i>Canada National Parks Act</i>, no obstante, no se consideran directamente los glaciares como objeto de protección.</p>	(Government of Canada, 2000)
	España	<p>La protección de glaciares se realiza a través del sistema de áreas protegidas o mediante la figura de monumento natural declarados por ley autonómica. En las que se prohíbe toda actividad que de forma continua o esporádica produzca o tienda a producir cambios geológicos o que pueda alterar la dinámica del ecosistema de forma irreversible</p>	(Jefatura del Estado, 2007) y (Comunidad Autónoma de Aragón, 1990)
	Suiza	<p>La protección de los glaciares se realiza a través del Código Civil de Suiza, no obstante, cabe destacar que no se trata de proteger glaciares, sino que balancear el desarrollo turístico y la protección del paisaje que permite el turismo.</p>	(The Federal Assembly of the Swiss Confederation, 1907)

Vía	País	Descripción	Referencia
	Nueva Zelanda	La protección de glaciares se realiza a través de la figura de parques nacionales.	(Department of Conservation New Zealand, 1980)
	Estados Unidos	Los glaciares se protegen a través de la Ley de Parques Nacionales, áreas en las que se limita el desarrollo de actividades. Todos los glaciares se encuentran dentro de parques nacionales por lo que se encuentran protegidos.	(U.S. National Congress, 1916)
	Italia	Se protegen los glaciares por su valor paisajístico a través del Decreto L.490/99 de la Protección del Medioambiente.	(Parlamento Italiano, 1999)
	Colombia	Las masas glaciares se protegen a través de la Ley 2.ª de 1959 que en su artículo 13 declaró los nevados y áreas que los circundan como Parques Nacionales Naturales. Además, a través del Decreto 2420 de 1968 se atribuyó a INDERENA la responsabilidad de delimitar las áreas consideradas necesarias para la protección de aguas, bosques, suelos y fauna; las que corresponden a la máxima categoría de Parques Nacionales Naturales, lo que los hace bienes de uso público inalienables, imprescriptibles e inembargables conforme la Constitución Política de Colombia. En los Parques Nacionales Naturales solo se permiten actividades de conservación, investigación, educación, recreación, cultura, recuperación y control. Además, se prohíben conductas que alteren el ambiente natural.	(García Pachón, 2018), (Diario Oficial Colombia, 1968) y (Ministerio del Medio Ambiente y el Congreso de Colombia., 1959)
	Perú	Por medio de la Ley N° 26.834 los glaciares son protegidos a través de la figura de Áreas Naturales Protegidas. Adicionalmente, la Ley General del Ambiente consideraría su protección al considerarlos ecosistemas frágiles (Artículo 99) y ecosistemas de montaña (Artículo 100), protegiéndolos y promoviendo el aprovechamiento sostenible. Finalmente, la Ley de Recursos Hídricos regula el uso y gestión de los recursos hídricos, consignándolos como bien de uso público (no existe propiedad privada sobre el agua) patrimonio de la Nación, por lo que su dominio es inalienable e imprescriptible. Además, se explicita que los nevados y glaciares se encuentran comprendidos en las aguas reguladas por la Ley (Artículo 5, Numeral 7), por lo que también son aplicables las sanciones correspondientes, entre muchas otras, al daño u obstrucción de cauces o cuerpos de agua, a la contaminación del agua transgrediendo los parámetros de calidad vigente.	(Congreso de la República del Perú, 1997, 2005, 2009)

Fuente: DICTUC (2023)

7.6 Evaluación norma anual de MPS y hierro en MPS bajo propuesta de verificador de promedio trianual

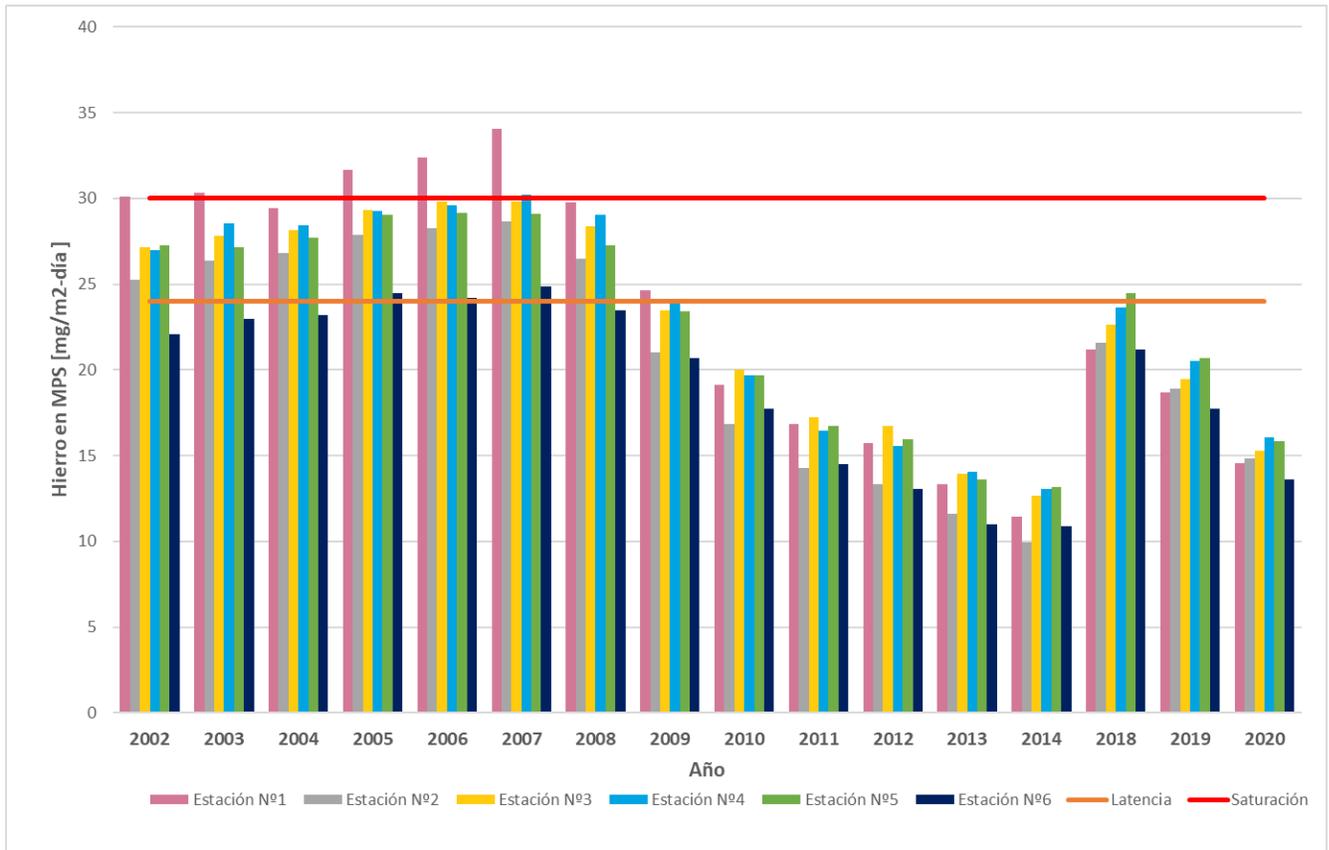
A continuación, en la Figura 7-3 y Figura 7-4 se ilustra el promedio aritmético de tres años consecutivos de las concentraciones de MPS y hierro en MPS, respectivamente, entre los años 2000 y 2020, evaluando los respectivos límites de la norma anual vigente. Respecto al MPS, se puede notar que a partir de 2010 no se estaría sobrepasando el límite en ninguna estación de monitoreo, sin embargo, todos los años se obtienen promedios trianuales que superan el límite de latencia en alguna estación. Por otro lado, en el caso de hierro en MPS, a partir de 2008 no se estaría sobrepasando la norma, y se encontraría bajo la latencia a partir de 2009, a excepción de la estación 5 en 2018.



Nota: No se presenta el promedio trianual para los años 2015, 2016 y 2017 por falta de datos en el año 2015.

Figura 7-3 Evaluación norma anual de MPS, promedio trianual periodo 2000-2020

Fuente: Elaboración propia



Nota: No se presenta el promedio trianual para los años 2015, 2016 y 2017 por falta de datos en el año 2015.

Figura 7-4 Evaluación norma anual de hierro en MPS, promedio trianual periodo 2000-2020

Fuente: Elaboración propia

7.7 Evaluación norma mensual de hierro en MPS bajo propuesta de verificador alternativa

En la Tabla 7-4 y la Figura 7-5 se presentan las concentraciones promedio para los periodos entre 15 de diciembre y el 31 de agosto, y entre el 1 de septiembre y el 15 de diciembre, para los años 2016 a 2020. Para cada periodo, en la Tabla 7-4 se presenta el límite de saturación y latencia aplicable según el artículo 4 de la norma vigente.

Tabla 7-4 Concentraciones promedio por periodo y norma mensual de hierro en MPS [mg/m²-día]

Estación de monitoreo	2016		2017		2018		2019		2020	
	Dic. 2°-Ago.	Sept.-Dic. 1°								
Estación N°1	21,86	22,56	22,96	26,02	17,26	18,03	15,16	11,76	10,73	13,885
Estación N°2	17,67	27,37	19,33	30,81	20,26	23,25	13,36	10,88	9,28	14,18
Estación N°3	20,57	25,69	22,00	31,57	17,73	27,59	11,96	14,515	10,78	16,0575
Estación N°4	19,17	28,60	24,19	31,46	20,28	27,35	13,21	11,365	12,28	15,0575
Estación N°5	21,35	30,63	25,39	29,67	19,59	29,12	12,50	13,4375	11,76	13,2575
Estación N°6	16,18	30,41	19,05	29,16	18,13	27,20	9,63	11,325	9,22	11,2525
Límite Latencia	48	24	48	24	48	24	48	24	48	24
Límite Saturación	60	30	60	30	60	30	60	30	60	30

Fuente: Elaboración propia

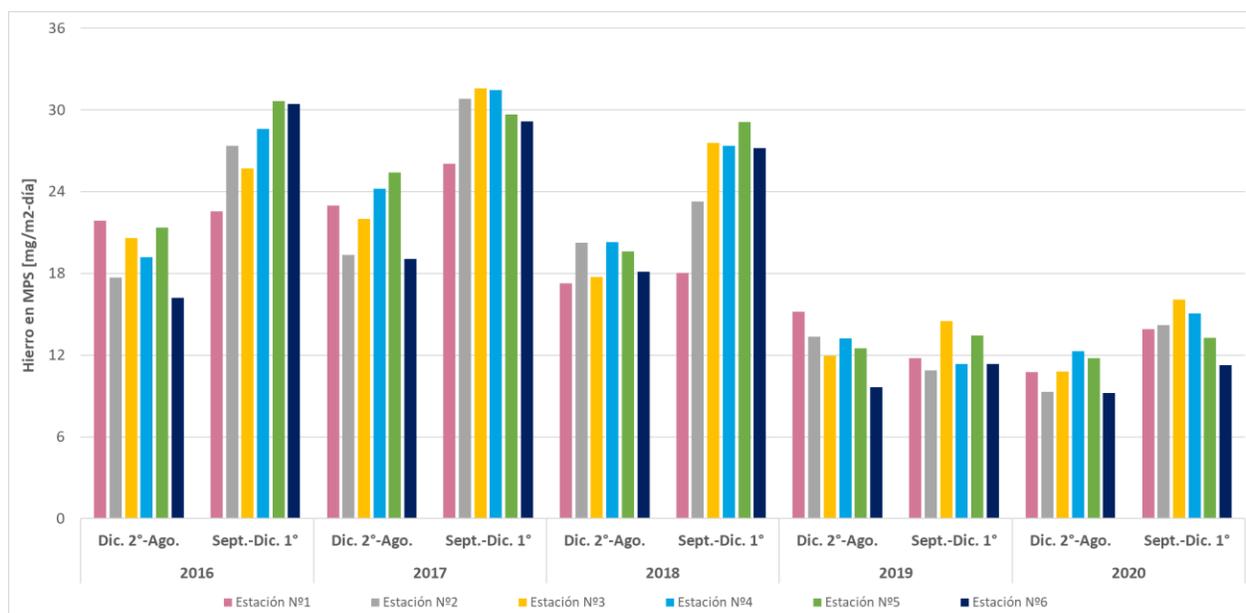


Figura 7-5 Concentraciones promedio por periodo de hierro en MPS, para los años 2016-2020 [mg/m²-día]

Fuente: Elaboración propia