



INFORME FINAL

ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA LA REVISIÓN DE NORMA DE NO₂, D.S. N° 114 DEL 2002, DEL MINSEGPRES

ELABORADO PARA



**Ministerio del
Medio
Ambiente**

Diciembre 2020

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	12
1.1	Objetivo general	12
1.2	Objetivos específicos	12
2	ANÁLISIS DE CALIDAD DE AIRE A NIVEL NACIONAL	17
2.1	Antecedentes sobre disponibilidad de datos ambientales de NO ₂ , O ₃ y otros contaminantes.....	17
2.2	Resúmenes de concentraciones de NO ₂ , O ₃ y MP _{2,5}	21
2.3	Análisis de tendencias de concentraciones de NO ₂ por zonas de interés	30
2.3.1	Zona 1: Calama.....	30
2.3.2	Zona 2: Valparaíso interior	33
2.3.3	Zona 3: Concón - Quintero - Puchuncaví.....	36
2.3.4	Zona 4: Concepción Metropolitano	42
2.3.5	Zona 5: Región Metropolitana	48
2.4	Síntesis análisis general de calidad de aire	55
2.5	Tecnologías de medición de NO ₂	57
2.5.1	Quimiluminiscencia:.....	57
2.5.2	Método modificado de Griess-Saltzman:.....	57
2.5.3	Método DOAS (Espectroscopía de absorción óptica diferencial):	58
2.5.4	Instrumentación de tecnologías de medición de NO ₂	58
2.5.5	Criterios de instalación.....	61
3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE NORMAS DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA O₃ y NO₂	63
3.1	Comparación de normas a nivel internacional	63
3.2	Gestión de episodios de críticos	66
3.3	Índices de Calidad del Aire en países seleccionados.....	69
3.4	Análisis de la ocurrencia de peaks de NO ₂ respecto a niveles de emergencia ambiental internacional y de Chile 73	
4	EVIDENCIA Y ANTECEDENTES EN SALUD	77
4.1	Aspectos Metodológicos.....	77
4.2	Estado del arte de los efectos del NO ₂ en la salud humana	79
4.3	Efectos de la exposición a Ozono.....	84
4.4	Efectos de la exposición a NO ₂ en Chile: evidencia	85
4.5	Evaluación teórica de la sinergia entre contaminantes	86
4.5.1	Análisis teórico.....	86
4.6	Actualización de funciones dosis-respuesta (fdr) para NO ₂	87
4.6.1	Análisis del Impacto regulatorio: Australia, Canadá y Reino Unido	87
4.6.2	Funciones dosis-respuesta para NO ₂ identificadas en Canadá y Australia	89
4.6.3	Beneficios calculados en las evaluaciones internacionales recopiladas	91
4.6.4	Función dosis respuesta con datos chilenos	94
4.7	Riesgo atribuible a la exposición a corto plazo a NO ₂ en sitios seleccionados	95
4.8	Riesgo atribuible a la exposición a corto plazo a dióxido de nitrógeno observado en comunas de la región Metropolitana seleccionadas y con función dosis-respuesta chilena	101
4.9	Actualización de los valores de la Guía metodológica del Ministerio del Medio Ambiente	102
4.10	Análisis de compatibilidad entre tasas de incidencia base mortalidad y morbilidad.	106

5	EMISIONES DE NO_x PARA ZONAS DEL ESTUDIO	108
5.1	Aspectos generales de las emisiones de NO _x	108
5.2	Emisiones de NO _x a nivel país	109
5.3	Consideraciones generales para la elaboración de inventarios de emisiones.....	110
5.4	Recopilación y uso de antecedentes disponibles en inventarios.....	112
5.4.1	Antecedentes generales.....	112
5.4.2	Zona 1: Calama.....	113
5.4.3	Zona 2: Valparaíso interior.....	113
5.4.4	Zona 3: Concón – Quintero - Puchuncaví.....	114
5.4.5	Zona 4: Gran Concepción	114
5.4.6	Zona 5: Región Metropolitana	115
5.5	Estructura de los inventarios de emisiones	116
5.5.1	Fuentes estacionarias puntuales.....	117
5.5.2	Fuentes de Área	117
5.5.3	Fuentes móviles en ruta.....	119
5.5.4	Fuentes móviles fuera de ruta	119
5.6	Resultados de la elaboración de inventarios	120
5.6.1	Zona 1: Calama.....	121
5.6.2	Zona 2: Valparaíso interior.....	122
5.6.3	Zona 3: Concón – Quintero - Puchuncaví.....	124
5.6.4	Gran Concepción.....	125
5.6.5	Región Metropolitana	127
5.6.6	Análisis de establecimientos y fuentes relevantes.....	133
6	PROYECCION DE INVENTARIOS A 15 AÑOS (2017 – 2032)	135
6.1	Aspectos metodológicos. Proyectos SEIA.	135
6.2	Aspectos metodológicos. Generación Eléctrica.	138
6.3	Aspectos Metodológicos. Planes de Descontaminación y Prevención o Anteproyectos.....	139
6.3.1	Zona 1. Calama.....	139
6.3.2	Zona 2. Valparaíso Interior.....	140
6.3.3	Zona 3. Concón – Quintero – Puchuncaví	140
6.3.4	Zona 4. Concepción Metropolitan	143
6.3.5	Zona 5. Región Metropolitana	145
6.4	Aspectos Metodológicos. Normas de emisión en elaboración o vigentes.	149
6.4.1	Análisis de normas vigentes.	149
6.4.2	Análisis de normas en elaboración.	153
6.5	Resultados de Proyecciones de Línea de Base.....	156
6.5.1	Zona 1. Calama.....	156
6.5.2	Zona 2. Concón – Quintero - Puchuncaví.....	160
6.5.3	Zona 3. Valparaíso Interior.....	164
6.5.4	Zona 4. Concepción Metropolitan	167
6.5.5	Zona 5. Región Metropolitana	171
7	ANALISIS DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN ADICIONALES A LINEA DE BASE 2017 – 2032	176
7.1	Opciones de reducción adicionales de emisiones de NO _x	176

7.1.1	Reducción de emisiones en grupos electrógenos existentes.....	176
7.1.2	Reducción de emisiones en hornos existentes	179
7.1.3	Aplicación de revisión de norma de emisión camiones	180
7.1.4	Aplicación de políticas de transporte similares a la RM en el resto de las zonas	180
7.2	Resultados de la aplicación de nuevas medidas.	181
8	MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA DEL NO₂	183
8.1	Antecedentes generales del dióxido de nitrógeno en la atmósfera	183
8.2	Aspectos metodológicos para estimar la relación emisión-concentración	184
8.3	Región Metropolitana: Modelación fotoquímica	185
8.3.1	Descripción general del modelo meteorológico WRF.....	186
8.3.2	Descripción general del modelo fotoquímico CAMx.....	186
8.3.3	Información ambiental de la Región Metropolitana.....	187
8.3.3.1	Descripción climatológica de la Región Metropolitana.....	188
8.3.3.2	Descripción topográfica de la Región Metropolitana y dominio de modelación.....	188
8.3.3.3	Información meteorológica de la Región Metropolitana año 2017	190
8.3.3.4	Información de Calidad de Aire de la Región Metropolitana durante el año 2017	203
8.3.4	Implementación y aplicación del modelo meteorológico WRF en la RM	208
8.3.4.1	Resultados del modelo WRF en la Región Metropolitana	211
8.3.5	Implementación y aplicación del modelo fotoquímico CAMx en la Región Metropolitana	229
8.3.5.3	Resultados del modelo CAMx en la Región Metropolitana y comparación con concentraciones de NO ₂ , MP _{2,5} y O ₃ observadas	239
9	MODELACIÓN EMPÍRICA	250
9.1	Aspectos metodológicos	250
9.2	Zona 1. Calama.....	251
9.3	Zona 2. Concón – Quintero – Puchuncaví.....	253
9.4	Zona 3. Valparaíso Interior	256
	Figura 9-7: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 3. Valparaíso Interior	258
9.5	Zona 4. Concepción Metropolitan	259
	Figura 9-9: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 5. Concepción Metropolitan	261
9.6	Zona 5. Región Metropolitana	262
	Figura 9-23: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 5. Región Metropolitana	266
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	268
10.1	Propuesta de escenarios normativos.....	268
10.2	Niveles de emergencia.....	270
10.3	Recomendaciones gestión de episodios en Chile	270
10.3.1	Para un ICA.....	270
10.3.2	Para un ISCA.....	271
10.4	Recomendación en materia de mediciones y monitoreo.....	271
11	ANTECEDENTES PARA LA DEFINICIÓN DE LA QUINTA ZONA DE ESTUDIO	273
12	ANEXO 2: SINTESIS REVISION BIBLIOGRAFICA EVIDENCIA EN SALUD	279
13	ANEXO 3. RECOPIACIÓN DE NORMATIVA A NIVEL INTERNACIONAL POR REGIONES OMS.	307
14	ANEXO 4. FUNCIONES DOSIS RESPUESTA OMS PROYECTO HRAPIE 2013	313
15	ANEXO 5. RESULTADOS PROYECCION DE EMISIONES	318

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Estaciones y variables monitoreadas en las Regiones de Chile	17
Tabla 2.2: Medición de NO ₂ en estaciones de monitoreo de calidad de aire	18
Tabla 2.3: Zonas saturadas, latentes y Planes de descontaminación o prevención vigentes	19
Tabla 2.4: Resumen de indicadores de calidad de aire para NO ₂ , O ₃ y MP _{2,5}	22
Tabla 2-5 Referencia para medición de NO ₂ por Quimiluminiscencia	59
Tabla 2-6 Límites de desempeño para equipos de monitoreo de gases.....	59
Tabla 2-7 Comparación de metodologías de medición de NO ₂	60
Tabla 2-8 Distancia Mínima de Separación entre la entrada del tomamuestras y Calles para Escalas Vecindario y Urbana para Óxidos de Nitrógeno (NO, NO ₂ , NO _x , NO _y)	62
Tabla 3-1: Guías de Calidad del Aire, para Óxido de Nitrógeno, países y organizaciones seleccionadas	64
Tabla 3-2 Guías de Calidad del Aire, para Ozono, países y organizaciones seleccionadas	65
Tabla 3-3: Tipos de Indicadores e Índices de Calidad del Aire	68
Tabla 3-4: Niveles emergencia para NO ₂	68
Tabla 3-5: Índice de Calidad de Aire. Estados Unidos para NO ₂	69
Tabla 3-6: Índice de Calidad de Aire. China para NO ₂	69
Tabla 3-7: Índice de Calidad de Aire. México para NO ₂	70
Tabla 3-8: Índice de Calidad de Aire. Colombia para NO ₂	70
Tabla 3-9: Comparación de Índices de Calidad de Aire para NO ₂	72
Tabla 3-10 Cuadro comparativo de umbrales:.....	73
Tabla 3.11: Días de episodios (Nivel 2, Nivel 3 y Alertas) y concentraciones máximas registradas en las zonas de estudio para el período 2017-2019:	74
Tabla 4-1: Resumen de principales resultados respecto de efectos del NO ₂	81
Tabla 4-2: Clasificación de efectos observados frente a la exposición a NO ₂ . También se presenta el descriptor de ellos, establecido por la Décima Clasificación Internacional de Enfermedades CIE-10.	83
Tabla 4-3: Funciones dosis – respuesta utilizadas para la revisión de los estándares de NO ₂ , en Canadá y Australia.....	90
Tabla 4-4: Evaluación económica de los impactos sanitarios de la contaminación del aire en Canadá	92
Tabla 4-5: Supuestos económicos para la valoración de los efectos en salud en Australia.....	94
Tabla 4-6: Estadística descriptiva de concentraciones promedios anuales de contaminantes y temperatura, Gran Santiago, Temuco y Valparaíso 2005-2013.....	95
Tabla 4.7: Funciones concentración respuesta, por tipo de efecto y de exposición a NO ₂	96
Tabla 4.8: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Calama, y casos atribuibles a exposición de 10 µg/m ³ de NO ₂ , años 2016 a 2018	97
Tabla 4.9: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Concón, y casos atribuibles, exposición de 10 µg/m ³ de NO ₂ , años 2016 a 2018	98
Tabla 4.10: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Puchuncaví, y casos atribuibles exposición de 10 µg/m ³ de NO ₂ , años 2016 a 2018	98
Tabla 4.11: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Quintero, y casos atribuibles exposición de 10 µg/m ³ de NO ₂ , años 2016 a 2018	99
Tabla 4.12: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Concepción, y casos atribuibles exposición de 10 µg/m ³ de NO ₂ , años 2017 y 2018.....	99
Tabla 4.13: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la Región Metropolitana, y casos atribuibles exposición de 10 µg/m ³ de NO ₂ , años 2016 a 2018.....	100
Tabla 4.14: Síntesis comparativa de Riesgo Atribuido a exposición de NO ₂	100
Tabla 4.15: Comparación de casos atribuibles con funciones de riesgo de Europa y Chile.....	101
Tabla 4-16: Efectos en Salud	103

Tabla 4-17: Resumen de los costos valorados monetariamente en la literatura	104
Tabla 4-18: Funciones Concentración Respuesta para la exposición a O ₃ , SO ₂ y NO ₂ de la Guía Metodológica 2013 de MMA	105
Tabla 4-19 Síntesis de recopilación de Funciones Dosis Respuesta para exposición a NO ₂ y O ₃ recomendadas para actualizar Guia Metodológica 2015	106
Tabla 5.1: Fuentes estacionarias incorporadas en los inventarios de las zonas de estudio	118
Tabla 5.2: Fuentes Móviles inventario	120
Tabla 5.3: Síntesis Inventario de emisiones NO _x . Calama (t/año) - 2017.....	121
Tabla 5.4: Emisiones de NO _x y participación fuentes fijas. Calama - 2017.	122
Tabla 5.5: Síntesis Inventario de emisiones NO _x Valparaíso Interior (t/año) - 2017.....	122
Tabla 5.6: Emisiones de NO _x y participación fuentes fijas. Valparaíso Interior - 2017.	123
Tabla 5.7: Síntesis Inventario de emisiones NO _x Puchuncaví – Quintero – Concón (t/año) - 2017.....	124
Tabla 5.8: Emisiones de NO _x y participación fuentes fijas. Concón – Quintero - Puchuncavi - 2017.	124
Tabla 5.9: Síntesis Inventario de emisiones NO _x Gran Concepción (t/año) - 2017.....	125
Tabla 5.10: Síntesis Inventario de emisiones gases y precursores fotoquímicos en RM (t/año) año 2017.	127
Tabla 5.11: Relevancia de los establecimientos emisores superiores a 5 ton/año NO _x	134
Tabla 6.1: Proyectos SEIA. Zona 1 Calama	136
Tabla 6.2: Proyectos SEIA. Zona 2. Valparaíso Interior	136
Tabla 6.3: Proyectos SEIA. Zona 3. Concon – Quintero - Puchuncaví	137
Tabla 6.4: Proyectos SEIA. Zona 4. Concepción Metropolitano	137
Tabla 6.5: Proyectos SEIA. Zona 5. Región Metropolitana.....	137
Tabla 6.6: Estimación de generación eléctrica en las zonas seleccionadas	138
Tabla 6.7: Planes de Descontaminación y Prevención en las zonas analizadas.....	139
Tabla 6.8: Comparación límites emisiones NO _x en calderas. PPDA Calama v/s norma en elaboración.	140
Tabla 6.9: Límites de emisión calderas nuevas y existentes	141
Tabla 6.10: Emisiones máximas permitidas Complejo Ventanas.....	142
Tabla 6.11: Emisiones máximas permitidas Refinerías Aconcagua.....	142
Tabla 6.12: Compensación de emisiones.....	142
Tabla 6.13: Compensación de emisiones. Equivalencias	143
Tabla 6.14: Límites de emisiones fuentes estacionarias.....	143
Tabla 6.15: Compensación de emisiones.....	144
Tabla 6.16: Comparación limites de emisiones PPDA versus norma	147
Tabla 6.17: Compensación de emisiones.....	148
Tabla 6.18: Normas de emisión en elaboración o vigentes	149
Tabla 6.19: Estimación de reducción de contaminantes como resultado de aplicación de modificación de la norma de emisión motocicletas (D.S. 104/2000).....	150
Tabla 6.20: Desagregación de ventas vehículos livianos CAVEM. 2007 – 2017.....	151
Tabla 6.21: Reducción de emisiones NO _x vehículos medianos y livianos a nivel regional con la aplicación de la revisión de la norma.	152
Tabla 6.22: Reducción de emisiones NO _x maquinaria fuera de ruta a nivel regional con la aplicación de la revisión de la norma.....	154
Tabla 6.23: Reducción de emisiones NO _x grupos electrógenos con la aplicación de la norma.	155
Tabla 6.24: Reducción de emisiones NO _x calderas con la aplicación de la norma.	156
Tabla 6.25: Medidas de Línea de Base. Zona 1. Calama	156
Tabla 6.26: Espacios Regulatorios. Zona 1. Calama	159
Tabla 6.27: Medidas de Línea de Base. Zona 1. Calama	160
Tabla 6.28: Espacios Regulatorios. Zona 2. Concón – Quintero - Puchuncaví	163
Tabla 6.29: Medidas de Línea de Base. Zona 2. Valparaíso Interior	164

Tabla 6.30: Medidas de Línea de Base. Zona 1. Concepción Metropolitan.	167
Tabla 6.31: Espacios Regulatorios. Zona 4. Concepción Metropolitan	171
Tabla 6.32: Medidas de Línea de Base. Zona 5. Región Metropolitana	171
Tabla 6.33: Reducción emisiones Fuentes Móviles. Zona 5. Región Metropolitana	175
Tabla 7.1: Medidas de limitación de emisiones en línea de base	176
Tabla 7.2: Sistema de reducción catalítica selectiva (SCR)	177
Tabla 7.3: Filtro de partículas (DPF)	178
Tabla 7.4: Catalizador de oxidación (DOC)	178
Tabla 7.5: Emisiones totales hornos. Fuentes sobre 3 ton/año.	179
Tabla 7.6: Costos promedio tecnologías reducción emisiones NO _x . Hornos	180
Tabla 8.1: Características de las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana, obtenidas de red SINCA para el año 2017.	191
Tabla 8.2: Ubicación de estaciones monitoras de la Región Metropolitana y porcentaje de datos de NO ₂ , O ₃ y MP _{2,5} registrados por cada una para el periodo enero – diciembre del 2017.	204
Tabla 8.3: Concentraciones de NO ₂ registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana durante el año 2017.	205
Tabla 8.4: Concentraciones de O ₃ registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana durante el año 2017.	205
Tabla 8.5: Concentraciones de MP _{2,5} registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana durante el año 2017.	206
Tabla 8.6: Configuración de las grillas utilizadas en las corridas del modelo WRF, dominio de modelación para la Región Metropolitana	210
Tabla 8.7: Características del dominio de modelación de la segunda grilla utilizada por el modelo WRF en la zona de la Región Metropolitana.	210
Tabla 8.8: Configuración de las principales parametrizaciones utilizadas en la modelación con WRF para la Región Metropolitana	211
Tabla 8.9: Estadísticos Matemáticos de Literatura.	223
Tabla 8.10: Resultados estadísticos obtenidos de la comparación de datos observados y modelados con WRF en las estaciones Cerro Navia, Parque O’Higgins, El Bosque y Talagante.	229
Tabla 8.11: Características del dominio de modelación utilizando el sistema CAMx en la zona de la Región Metropolitana*	231
Tabla 8.12: Especies del mecanismo químico Carbón Bond 6 (CB6)	234
Tabla 8.13: Características de fuentes puntuales del Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana.	237
Tabla 8.14: Contaminantes emitidos por cada tipo de fuente del Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana	238
Tabla 8.15: Ubicación de las estaciones monitoras de la Región Metropolitana donde se obtienen los resultados de CAMx	240

Lista de Figuras

Figura 2-1: Percentil 99 de concentraciones de NO ₂ en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile. Año base de cálculo entre paréntesis	25
Figura 2-2: Promedio trianual de NO ₂ en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile. Año base de cálculo entre paréntesis	26
Figura 2-3: Percentil 99 de máximos diarios de concentraciones de 8 horas de O ₃ en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile. Año base de cálculo entre paréntesis	27
Figura 2-4: Percentil 98 de concentraciones diarias de MP _{2,5} en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile. Año base de cálculo entre paréntesis	28
Figura 2-5: Promedio trianual de MP _{2,5} en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile. Año base de cálculo entre paréntesis	29
Figura 2-6: Estación Centro ubicada en Calama	30
Figura 2-7: Evolución de percentil 99 de concentraciones horarias máximas diarias de NO ₂ en Calama	31
Figura 2-8: Evolución de promedios anuales de NO ₂ en Calama	31
Figura 2-9: Ciclos diarios de NO ₂ en estación Centro Calama, período 2017 a 2019	32
Figura 2-10: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Centro-Calama	32
Figura 2-11: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Centro-Calama	33
Figura 2-12: Ubicación estaciones con monitoreo de NO ₂ en Quillota-La Calera	33
Figura 2-13: Evolución percentil 99 concentraciones horarias máximas diarias NO ₂ Quillota-La Calera	34
Figura 2-14: Evolución de promedios anuales de NO ₂ en Quillota-La Calera	34
Figura 2-15: Ciclos diarios de NO ₂ en estación Bomberos, período 2007 a 2008	35
Figura 2-16: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Bomberos-Quillota	35
Figura 2-17: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación San Pedro-Quillota	36
Figura 2-18: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación La Palma-Quillota	36
Figura 2-19: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Rural 1-La Calera	36
Figura 2-20: Ubicación estaciones con monitoreo de NO ₂ en Concón, Quintero y Puchuncaví	37
Figura 2-21: Evolución de percentil 99 de concentraciones horarias máximas diarias de NO ₂ en Concón-Quintero-Puchuncaví	37
Figura 2-22: Evolución de promedios anuales de NO ₂ en Concón-Quintero-Puchuncaví	38
Figura 2-23: Ciclos diarios de NO ₂ en estación Concón, período 2017 a 2019	38
Figura 2-24: Ciclos diarios de NO ₂ en estaciones Quintero y Puchuncaví, período 2017 a 2019	39
Figura 2-25: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Concón	39
Figura 2-26: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Puchuncaví	40
Figura 2-27: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Quintero	40
Figura 2-28: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Concón	41
Figura 2-29: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Puchuncaví	41
Figura 2-30: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Quintero	41
Figura 2-31: Ubicación estaciones con monitoreo de NO ₂ en Gran Concepción	42
Figura 2-32: Evolución de percentil 99 de concentraciones horarias máximas diarias de NO ₂ en Gran Concepción	43
Figura 2-33: Evolución de promedios anuales de NO ₂ en Gran Concepción	43
Figura 2-34: Ciclos diarios de NO ₂ en estaciones Kingston College y ENAP, período 2017 a 2019	44
Figura 2-35: Ciclos diarios de NO ₂ en estaciones Hualqui y Liceo Polivalente, período 2017 a 2019	44
Figura 2-36: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ Kingston College-Concepción	45
Figura 2-37: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ , Est. Hualqui	45
Figura 2-38: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ , Est. ENAP Price-Hualpén	45
Figura 2-39: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ , Est. Liceo Polivalente-Talcahuano	46
Figura 2-40: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Kingston College- Concepción	46

Figura 2-41: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Hualqui	47
Figura 2-42: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación ENAP Price-Hualpén	47
Figura 2-43: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Liceo Polivalente-Talcahuano	48
Figura 2-44: Ubicación estaciones con monitoreo de NO ₂ en la Región Metropolitana	48
Figura 2-45: Evolución de percentil 99 de concentraciones horarias máximas diarias de NO ₂ en Región Metropolitana	49
Figura 2-46: Evolución de promedios anuales de NO ₂ en Región Metropolitana	49
Figura 2-47: Ciclos diarios de NO ₂ en estaciones Las Condes y Parque O'Higgins, período 2017 a 2019	50
Figura 2-48: Ciclos diarios de NO ₂ en estaciones Independencia y Pudahuel, período 2017 a 2019	51
Figura 2-49: Ciclos diarios de NO ₂ en estación El Bosque, período 2017 a 2019	51
Figura 2-50: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Pudahuel	52
Figura 2-51: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Parque O'Higgins	52
Figura 2-52: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Las Condes	52
Figura 2-53: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación Independencia	53
Figura 2-54: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y O ₃ estación El Bosque	53
Figura 2-55: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Pudahuel	54
Figura 2-56: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Parque O'Higgins	54
Figura 2-57: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Las Condes	54
Figura 2-58: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación Independencia	55
Figura 2-59: Comparación de promedios mensuales de NO ₂ y MP _{2,5} estación El Bosque	55
Figura 3-1 Cuadro comparativo de niveles de gestión para episodios en países seleccionados.	73
Figura 4-1: Coeficiente de Regresión e IC95% para el desarrollo psicomotor y emisiones promedio de NO _x (toneladas/año) por región	86
Figura 4-2: Enfoque de la vía de impacto para valorar beneficios en Australia	93
Figura 5-1: Emisiones de NO _x a nivel nacional por tipo de fuente, año 2017	109
Figura 5-2: Distribución regional de emisiones atmosféricas de NO _x (toneladas/año), año 2017.	110
Figura 5-3. Esquema General de clasificación de fuentes para elaboración de los Inventarios	116
Figura 5-4. Esquema Fuentes Estacionarias Puntuales Actualización de Inventarios	117
Figura 5-5. Esquema Fuentes Estacionarias de Área	117
Figura 5-6: Esquema Fuentes Móviles en Ruta	119
Figura 5-7: Esquema Fuentes Móviles fuera de Ruta Actualización de Inventarios	119
Figura 5-8: Emisiones de NO _x agregadas para las zonas en análisis. 2017	120
Figura 5-9: Participación por Grupo de Fuentes NO _x . Calama - 2017	121
Figura 5-10: Participación por tipo de fuente en el transporte en emisiones de NO _x Calama - 2017	121
Figura 5-11: Participación por Grupo de Fuentes NO _x . Valparaíso Interior - 2017	123
Figura 5-12: Participación por Grupo de Fuentes NO _x . Concón – Quintero - Puchuncavi - 2017	124
Figura 5-13: Participación por Grupo de Fuentes NO _x . Gran Concepción - 2017	125
Figura 5-14: Desglose participación emisiones NO _x Fuentes Areales. Gran Concepción – 2017	126
Figura 5-15: Desglose participación emisiones NO _x Fuentes Fijas. Gran Concepción – 2017	126
Figura 5-16: Participación de Grupo de Fuentes por contaminante	128
Figura 5-17: Participación por tipo de fuentes fijas en emisiones de NO _x	129
Figura 5-18: Participación por tipo de fuente en el transporte terrestre en emisiones de NO _x	129
Figura 5-19: Participación por tipo de fuentes areales en emisiones de NO _x	130
Figura 5-20: Distribución de emisiones de Fuentes Fijas de NO _x (t/año) estimadas en la RM, año 2017.	131
Figura 5-21: Distribución de emisiones Areales de NO _x (t/año) estimadas en la RM, año 2017.	132
Figura 5-22: Distribución de emisiones de Fuentes Móviles (t/año) estimadas en la RM , año 2017.	132
Figura 5-23: Distribución del total de emisiones de NO _x (t/año) estimadas en la RM año 2017. Incluye Fuentes Estacionarias (Fijas y areales) y Fuentes Móviles (En ruta y Fuera de ruta)	133

Figura 6-1: Distribución de ventas de motocicletas nuevas a nivel nacional.....	150
Figura 6-2: Venta de vehículos livianos nuevos período 2007 - 2017	151
Figura 6-3: Importación maquinaria fuera de ruta	153
Figura 6-4: Evolución regulación y línea de base. Zona 1. Calama.....	157
Figura 6-5: Proyección Emisiones NO _x . Zona 1. Calama	158
Figura 6-6: Proyección Emisiones NO _x . Zona 1. Calama. Fuentes Móviles	158
Figura 6-7: Evolución regulación y línea de base. Zona 2. Concón – Quintero – Puchuncaví.	161
Figura 6-8: Proyección de emisiones NO _x . Concón – Quintero - Puchuncaví	162
Figura 6-9: Proyección de emisiones Fuentes Móviles. Concón – Quintero - Puchuncaví.....	163
Figura 6-10: Evolución regulación y línea de base. Zona 3. Valparaíso Interior.....	165
Figura 6-11: Evolución emisiones totales. Zona 3. Valparaíso Interior.	166
Figura 6-12: Evolución emisiones por sectores. Zona 3. Valparaíso Interior.	166
Figura 6-13: Evolución regulación y línea de base. Zona 4. Concepción Metropolitano.	168
Figura 6-14: Evolución emisiones totales. Zona 4. Concepción Metropolitano.....	169
Figura 6-15: Evolución emisiones por sectores. Zona 4. Concepción Metropolitano.....	169
Figura 6-16: Proyección emisiones Fuentes Fijas. Zona 4. Concepción Metropolitano.....	170
Figura 6-17: Proyección emisiones Fuentes Móviles. Zona 4. Concepción Metropolitano.	170
Figura 6-18: Evolución regulación y línea de base. Zona 5. Región Metropolitana.	173
Figura 6-19: Proyección de emisiones totales y por sectores. Zona 5. Región Metropolitana.	174
Figura 6-20: Proyección de emisiones Fuentes Móviles. Zona 5. Región Metropolitana.	175
Figura 7-1: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 1. Calama.....	181
Figura 7-2: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 2. Valparaíso Interior.....	181
Figura 7-3: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 3. Concon – Quintero - Puchuncavi.....	181
Figura 7-4: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 4. Concepción Metropolitano	182
Figura 7-5: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 5. Región Metropolitana	182
Figura 8-1: Topografía Región Metropolitana.....	189
Figura 8-2: Área de la Región Metropolitana considerada en este estudio.....	190
Figura 8-3: Ubicación Estaciones Meteorológicas de la Región Metropolitana.	192
Figura 8-4: Series de tiempo de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura registras por las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.	193
Figura 8-5: Diagramas de Caja y Bigotes de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.	194
Figura 8-6: Ciclos diarios de velocidad de viento observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.....	196
Figura 8-7: Ciclos diarios de dirección de viento observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.....	197
Figura 8-8: Rosas de viento promedio anuales observadas en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.....	198
Figura 8-9: Ciclos diarios de humedad relativa observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.....	199
Figura 8-10: Ciclos diarios de temperatura observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.....	200
Figura 8-11: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.	201
Figura 8-12: Ciclos estacionales de humedad relativa observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.....	202
Figura 8-13: Ciclos estacionales de temperatura observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.....	203

Figura 8-14: Ubicación de las estaciones monitoras de la Región Metropolitana.....	204
Figura 8-15: Ciclo anual de las concentraciones de NO ₂ registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana.....	207
Figura 8-16: Ciclos anuales de las concentraciones de O ₃ registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana.....	207
Figura 8-17: Ciclo anual de las concentraciones de MP _{2,5} registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana.....	208
Figura 8-18: Diagrama de operación del modelo meteorológico WRF.....	209
Figura 8-19: Dominio de modelación de WRF en la Región Metropolitana.	210
Figura 8-20: Series de tiempo de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura registras por modelo WRF en la Región Metropolitana.	213
Figura 8-21: Diagramas de Caja y Bigotes de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura modelado con WRF en la Región Metropolitana.....	214
Figura 8-22: Ciclos diarios de velocidad de viento modelados con WRF en la Región Metropolitana.	215
Figura 8-23: Ciclos diarios de dirección de viento modelados con WRF en la Región Metropolitana.....	216
Figura 8-24: Rosas de viento promedio anuales modeladas con WRF en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.....	217
Figura 8-25: Ciclos diarios de humedad relativa modelados con WRF en la Región Metropolitana.	218
Figura 8-26: Ciclos diarios de temperatura modelados con WRF en la Región Metropolitana.	219
Figura 8-27: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento modelados con WRF en la Región Metropolitana.	220
Figura 8-28: Ciclos estacionales de humedad relativa modelados con WRF en la Región Metropolitana.	221
Figura 8-29: Ciclos estacionales de temperatura modelados con WRF en la Región Metropolitana.	222
Figura 8-30: Ciclos diarios de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura observados y modelados con WRF en la Región Metropolitana.....	224
Figura 8-31: Ciclos diarios de dirección de viento observados y modelados con WRF en estaciones de la Región Metropolitana.....	225
Figura 8-32: Ciclos estacionales de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura observados y modelados con WRF en la Región Metropolitana.	226
Figura 8-33: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados y modelados con WRF en Cerro Navia.	227
Figura 8-34: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados y modelados con WRF en Parque O'Higgins.....	227
Figura 8-35: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados y modelados con WRF en El Bosque.	228
Figura 8-36: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados y modelados con WRF en Talagante.	228
Figura 8-37: Diagrama de operación del modelo fotoquímico CAMx.....	230
Figura 8-38: Dominio de modelación de CAMx en la Región Metropolitana.	231
Figura 8-39: Esquema General de clasificación de fuentes para elaboración de los Inventarios.	236
Figura 8-40: Ciclo anual de promedios mensuales especie NO ₂ Observado y Modelado año2017.....	241
Figura 8-41: Ciclo diario especie NO ₂ Observado y Modelado año 2017.	242
Figura 8-42: Ciclo anual de promedios mensuales especie O ₃ Observado y Modelado año 2017.	243
Figura 8-43: Ciclo diario especie O ₃ Observado y Modelado.	244
Figura 8-44: Ciclo anual especie MP _{2,5} Observado y Modelado.....	245
Figura 8-45: Ciclo diario especie MP _{2,5} Observado y Modelado.	246
Figura 8-46: Distribución espacial de NO ₂ promedio anual simulado con CAMx en la Región Metropolitana, año 2017.....	247

Figura 8-47: Distribución espacial de NO ₂ percentil 99 de las concentraciones 1 hora simulado con CAMx en la Región Metropolitana, año 2017	248
Figura 8-48: Distribución espacial de O ₃ percentil 99 de las concentraciones 8 horas simulado con CAMx en la Región Metropolitana, año 2017.....	249
Figura 9-1: Dispersión entre promedio anual de NO ₂ y percentil 99 de NO ₂ , periodo 2013-2019, valores en µg/m ³	251
Figura 9-2: Dispersión entre promedio anual de NO ₂ , máximo horario anual de NO ₂ , máximo anual O ₃ 8hr, promedio anual MP _{2.5} y máximo diario anual MP _{2.5} , periodo 2016-2019, valores en µg/m ³ . Zona 1. Calama	251
Figura 9-3: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 1. Calama.....	252
Figura 9-4: Dispersión entre promedio anual de NO ₂ , máximo horario anual de NO ₂ , máximo anual O ₃ 8hr, promedio anual MP _{2.5} y máximo diario anual MP _{2.5} , periodo 2016-2019, valores en µg/m ³ . Zona 2. Concon – Quintero - Puchuncaví	253
Figura 9-5: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 2. Concón – Quintero – Puchuncaví	255
Figura 9-6: Dispersión entre promedio anual de NO ₂ , máximo horario anual de NO ₂ , máximo anual O ₃ 8hr, promedio anual MP _{2.5} y máximo diario anual MP _{2.5} , periodo 2016-2019, valores en µg/m ³ . Zona 3. Valparaíso Interior	256
Figura 9-7: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 3. Valparaíso Interior.....	258
Figura 9-8: Dispersión entre promedio anual de NO ₂ , máximo horario anual de NO ₂ , máximo anual O ₃ 8hr, promedio anual MP _{2.5} y máximo diario anual MP _{2.5} , periodo 2016-2019, valores en µg/m ³ . Zona 4. Concepción Metropolitano.....	259
Figura 9-9: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 5. Concepción Metropolitano	261
Figura 9-10: Dispersión entre promedio anual de NO ₂ y percentil 99 de NO ₂ , periodo 2010-2019, valores en µg/m ³	262
Figura 9-18: Dispersión entre promedio anual de NO ₂ , máximo horario anual de NO ₂ , máximo anual O ₃ 8hr, promedio anual MP _{2.5} y máximo diario anual MP _{2.5} , periodo 2016-2019, valores en µg/m ³ . Zona 5. Región Metropolitana.....	263
Figura 9-23: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 5. Región Metropolitana	266

1 INTRODUCCION

El desarrollo de este estudio se enmarca en la generación de antecedentes requeridos para la revisión de la norma primaria de calidad de aire de dióxido de nitrógeno del año 2002. MINSEGPRES, D.S. N° 114. Conforme a las Bases Técnicas, el objetivo general y los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

1.1 Objetivo general

Generar los antecedentes técnicos necesarios para fundamentar, a lo menos, tres alternativas de propuestas regulatorias para la revisión de la norma primaria de calidad del aire para dióxido de nitrógeno (NO₂) y, de esta manera, avanzar en mejorar la regulación vigente. Además, contar con un análisis técnico y económico para la evaluación de los escenarios regulatorios en la revisión de la norma primaria de calidad del aire para dióxido de nitrógeno (NO₂).

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una actualización para el periodo 2014 en adelante del análisis de la información obtenida en el estudio 2016¹ y generar la fundamentación técnica para tener a lo menos tres escenarios de propuesta normativa.
2. Actualizar, recopilar y sistematizar estudios sobre efectos en salud por concentración de NO₂ y O₃ (funciones dosis respuesta).
3. Realizar un diagnóstico de la calidad del aire por NO₂ a nivel país e identificar fuentes emisoras de NO₂ para al menos 4 zonas (Gran Concepción, Concón y Puchuncaví, Calama y otra por definir), según disponibilidad de información base. Realizar una proyección, identificando potenciales nuevas fuentes y futuras ampliaciones de fuentes existentes, considerando un horizonte de evaluación de 15 años y de acuerdo con las actividades desarrolladas en cada zona.
4. Procesar el inventario de emisiones para la Región Metropolitana y una proyección, identificando potenciales nuevas fuentes y futuras ampliaciones de fuentes existentes, considerando un horizonte de evaluación de 15 años y de acuerdo con las actividades desarrolladas en la zona.
5. Determinar el aporte de las distintas fuentes emisoras en la calidad del aire por cada zona, para el contaminante NO₂ y la relación con O₃ y MP_{2,5}.
6. Valorizar los costos que tendría la aplicación de nuevos valores de norma primaria de calidad del aire para NO₂. Identificar los tipos de fuentes que deberán reducir emisiones y cuáles serían los costos de inversión y operación de esas reducciones. Considerando un horizonte de evaluación de 15 años y sus costos asociados.

El Informe Final que se presenta en esta oportunidad, contempla todos los contenidos para el cumplimiento de los objetivos señalados previamente de acuerdo a la siguiente tabla de contenidos

¹ Análisis de antecedentes y evaluación de impactos para revisar las normas NO₂, O₃ y CO₂, Instituto de Salud Poblacional de la Universidad de Chile, mayo 2016. LICITACIÓN N°608897-161-LE15

Actividades	Numeral / Anexo
Objetivo Específico 1: Realizar una actualización para el período 2014 en adelante del análisis de la información obtenida en el estudio 2016 y generar la fundamentación técnica para tener a lo menos tres escenarios de propuesta normativa	
1. Coordinar una reunión de inicio con la contraparte técnica, para abordar temas relevantes de la ejecución del estudio, durante los primeros 5 días después de tramitada la Resolución que aprueba el contrato.	Via Teams 15/06/2020
2. Revisión de la evidencia en salud de la exposición (efectos crónicos y agudos) del dióxido de nitrógeno (NO ₂) disponibles internacionalmente y en Chile (Revisión de Estudios toxicológicos y epidemiológicos y análisis de la correlación entre contaminantes y sus efectos en la salud)	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 12
3. Evaluación teórica de la sinergia entre contaminantes	4.5
4. Contar con una actualización de la recopilación, análisis y comparación de las normas de la calidad del aire, valores norma y criterios de excedencia. adoptadas y recomendados a nivel internacional para dióxido de nitrógeno (NO ₂). Identificar y analizar las brechas de las actuales normas primarias de calidad para mejorar la eficiencia y coherencia con otros instrumento de gestión ambientales.	3.1, 3.2, 3.3
5. Contar con una revisión de los modelos internacionales para la gestión de episodios de emergencia y comparación con lo vigente en Chile para nitrógeno (NO ₂)	3.2
6. Fundamentación para a lo menos 3 diferentes escenarios normativos.	10.1
7. Proponer y evaluar una modificación de los niveles de emergencia de estos contaminantes, analizando las condiciones que propician la probabilidad de ocurrencia de episodios de contaminación.	3.2, 10.2, 10.3
8. Contar con un análisis de las metodologías de medición y monitoreo para NO ₂ . comparando con metodologías aplicadas internacionalmente	0, 10.4
Objetivo Específico 2: Actualizar, recopilar y sistematizar estudios sobre efectos en salud por concentración de NO₂ y O₃ (funciones dosis respuesta).	
1. Revisar evaluaciones de impacto regulatorio de normas de calidad de NO ₂ y O ₃ a nivel internacional y nacional, identificando efectos en salud y su valoración.	4.6
2. Realizar una comparación cuantitativa en formato de tabla de los distintos tipos de beneficios calculados en las evaluaciones internacionales recopiladas.	4.6
3. Revisar guías metodológicas y a lo menos 5 papers recientes sobre estimación de efectos en salud por concentración de NO ₂ y O ₃ .	4.6
4. Actualizar los valores de la Guía metodológica del Ministerio del Medio Ambiente y del estudio 2016 y proponer coeficientes de riesgo unitario para NO ₂ y O ₃ .	4.9
5. Identificar compatibilidad entre las tasas de incidencia base de mortalidad y morbilidad que se tienen actualmente, obtenidas a partir de la información del DEIS (Departamento de estadísticas e información en salud), y los casos obtenidos a partir de la revisión realizada.	4.10
6. Proponer metodología en caso de tasas incompatibles	4.10

Actividades	Numeral / Anexo
Objetivo Específico 3: Realizar un diagnóstico de la calidad del aire a nivel país e identificar las fuentes emisoras de NO₂ para al menos 4 zonas (Gran Concepción, Concón, Quintero y Puchuncaví, Calama y otro por definir), según disponibilidad de información base. Realizar una proyección, identificando potenciales nuevas fuentes y futuras ampliaciones de fuentes existentes, considerando un horizonte de evaluación de 15 años y de acuerdo a las actividades desarrolladas en cada zona.	
1. Recopilar y sistematizar los resultados y principales conclusiones de los estudios disponibles realizados cada zona, que hayan sido ejecutados con financiamiento público y/o privado, desde el año 2000 en adelante y que tengan relación con la temática de calidad del aire para NO ₂ en cada zona. Los estudios y antecedentes mínimos a considerar corresponden a registros de calidad del aire, meteorología, estudios epidemiológicos, sobre salud de la población, inventarios de emisiones, compromisos ambientales adquiridos por las fuentes emisoras en el marco del SEIA, compromisos en Acuerdos de Producción Limpia (APL), atinentes a temas de calidad del aire, entre otros.	Anexo Digital: Carpeta: Documentos revisados
2. Realizar un análisis de la calidad del aire, específicamente para NO ₂ y O ₃ y otros contaminantes, de modo tal que permita comprender la situación de dichas zonas, con respecto a la variación estacional y otros. Se debe incorporar la creación de una base de datos que contenga todos los datos de concentración a nivel horario, diario, mensual y anual.	2.1, 2.2, 2.3, 2.4 Informe 2: 3.1 al 3.3 Anexo Digital: Documento. "Calidad de Aire.pdf" Anexo Digital: Carpeta. "Datos de Calidad de Aire"
3. Contar con un completo análisis de la ocurrencia de peaks de NO ₂ (horarios y/o de 5 minutos), en las estaciones y comparar con los niveles de emergencia ambiental internacional y de Chile estimando para cada zona el riesgo a la exposición de nitrógeno (NO ₂).	3.4
4. Identificar y describir las fuentes o los sectores emisores de NO ₂ e identificar potenciales nuevas fuentes y/o futuras ampliaciones de complejos industriales existentes, para los próximos 15 años.	5, 6 Anexo Digital: Carpeta: Memorias Emisiones Proyectos SEIA
5. La identificación y descripción de las fuentes emisoras debe incorporar al menos: proceso emisor y tecnologías, localización (coordenada U.T.M, Datum wgs-84) tipo de combustible y/o materia prima, ciclos de operación, si cuenta con equipo de control, indicar cuál y su eficiencia, tipos de emisiones al aire (material particulado, precursores, sustancias tóxicas), entre otra información relevante, para posteriormente elaborar el inventario de emisiones. La identificación de fuentes emisoras y la información recopilada deberá ser corroborada y complementada de acuerdo a lo indicado en la siguiente etapa inventario.	Anexo: Carpeta. "Fuentes fijas inventario y proyecciones"
6. El inventario de emisiones por sector y su proyección se debe resumir en tablas en el informe y entregar la información completa en archivos Excel, de modo tal que permita identificar de modo claro las variables relevantes.	5, 6 Anexo Carpeta. "Resumen de inventario por zonas"
7. Con los antecedentes anteriores, identificar las actividades y/o tamaños de establecimientos que podrían verse afectadas con una modificación de los nuevos niveles propuestos en los escenarios.	5.6.6
8. Identificar y proponer un conjunto de medidas de control de emisiones que se podrían implementar y proponer plazos de cumplimiento de las medidas.	7.1, 7.2

Actividades	Numeral
Objetivo Específico 4: <i>Procesar el inventario de emisiones para la Región Metropolitana y una proyección, identificando potenciales nuevas fuentes y futuras ampliaciones de fuentes existentes, considerando un horizonte de evaluación de 15 años y de acuerdo a las actividades desarrolladas en la zona.</i>	
1. Proponer una metodología para la estimación de emisiones, la que deberá ser consensuada con la contraparte técnica. El año del inventario de emisiones base deberá ser acordados con la contraparte técnica. Considerar como referencia el estudio “Manual para desarrollo de inventarios”, disponible en http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=5eafeed5-b296-4b6f-aaef-5606e6blefc6&fname=MANIN-Manual.pdf.&access=public ; y en caso de que no se encuentre el factor de emisión específico para determinada fuente emisora en dicho documento, se deberá fundamentar técnicamente la utilización de otros factores de emisión.	5.3, 5.4, 5.5 Anexo Digital: Documento: “Metodología general inventarios.pdf”
2. Hacer el inventario de emisiones para NO ₂ considerando las fuentes emisoras que se localicen al interior y exterior que puedan aportar con las emisiones, e identificar potenciales nuevas fuentes y/o futuras ampliaciones de complejos industriales existentes, para los próximos 15 años.	5.6.5, 6.1 Anexo Digital: Carpeta: Resumen de inventario por zonas. Planilla Excel. “Resumen emisiones RM2017.xlsx”
3. El consultor debe proponer la metodología y realizar la proyección de emisiones, la cual debe considerar supuestos, tales como: aumento de producción de cada actividad, reducciones que se generen producto de la entrada en vigencia de futuras normas de emisión, incorporación de medidas comprometidas por RCA, considerar las potenciales nuevas fuentes y/o futuras ampliaciones de complejos existentes, el efecto del crecimiento de población, indicadores económicos, etc. Esta deberá ser discutida y consensuada por la contraparte técnica del estudio. Se espera que estos supuestos puedan ser fácilmente modificados por la contraparte técnica en el modelo entregado por el consultor.	6.1, 6.2, 6.3, 6.4 Anexo Digital: Planilla Proyecciones.xlsx
4. Determinar el aporte de las distintas fuentes emisoras en la emisión total	5.6.5
5. Elaborar y entregar planilla Excel con los inventarios de emisiones (actual y proyectado), para cada fuente emisora y la emisión total, de modo ordenado, con todas las variables, parámetros que correspondan a supuestos. Todas las celdas, deben ser fácilmente modificables. Además, indicar las referencias correspondientes para los parámetros utilizados	Anexo Digital : Carpetas. Fuentes fijas inventario y proyecciones Resumen de inventario por zonas Anexo Digital: Planilla Proyecciones.xlsx
Objetivo Específico 5: <i>Determinar el aporte de las distintas fuentes emisoras en la calidad del aire por cada zona. para el contaminante NO₂ y la relación con O₃ y MP_{2,5}</i>	
1. Proponer y justificar técnicamente la metodología para desarrollar una modelación de dispersión recomendado por la EPA, deberá considerar y utilizar un modelo meteorológico y de dispersión, acorde a las condiciones de la zona para evaluar el impacto de las emisiones totales y por fuente emisora sobre la calidad del aire. tanto para NO ₂ como O ₃ . Lo anterior deberá ser justificado, consensuado y aprobado por la contraparte técnica.	8.1, 8.2

2. Generar y entregar mapas de distribución espacial de las concentraciones de NO ₂ y O ₃ , con una resolución adecuada que permita una excelente visualización de las isolíneas de concentración de los contaminantes y receptores evaluados, así como también tablas y/o gráficos explicativos con los resultados de la modelación que permitan visualizar claramente el aporte total y de cada fuente emisora a la calidad del aire	8.3, 9
3. Entregar todos los archivos de entrada y salida de todos los modelos utilizados.	Anexo Digital
4. Determinar la relación entre contaminantes, considerando al menos la relación con O ₃ y MP2,5.	8.3
Objetivo Específico 6: Valorizar los costos que tendría la aplicación de nuevos valores de norma primaria de calidad del aire para NO₂. Identificar los tipos de fuentes que deberán reducir emisiones y cuáles serían los costos de inversión y operación de esas reducciones. Considerando un horizonte de evaluación de 15 años y sus costos asociados.	
1. Identificar medidas de control de emisiones, para las fuentes emisoras, según su aporte en emisiones y a la calidad del aire y su potencial. de reducción (en emisiones y en concentración)	7.1
2. Identificar costos de inversión. operación y mantención. Así como también su vida útil y eficiencia de remoción.	7.1
3. Identificar medidas de línea base, que están vigentes o se activarán en el corto plazo producto de planes o normas existentes o pronto a publicarse	6.1, 6.2, 6.3, 6.4
4. Proponer y justificar por lo menos dos cronogramas de reducción de emisiones de NO ₂ , en el horizonte de evaluación de 15 años.	6.5
5. Determinar el efecto de las medidas seleccionadas en la reducción de concentración de NO ₂ y O ₃ .	6.5, 7.2
6. Determinar costo eficiencia para cada una de las medidas de acuerdo a su reducción en emisiones y en concentración.	7.1
7. Elaborar y entregar fichas descriptivas para cada una de las medidas identificadas.	7.1
8. Determinar costos medios por reducción de emisiones (\$/ton) para las medidas.	7.1
9. Elaborar y entregar planillas Excel con la proyección de emisiones y su reducción asociada por medida. Así como también la proyección de concentración y su reducción de modo de verificar el cumplimiento de la norma de calidad primaria de NO ₂ . Entregar de modo ordenado, con todas las variables, parámetros y fórmulas de cálculo utilizadas para estimar y proyectar cada emisión, indicando claramente los parámetros que correspondan a supuestos. Todas las celdas, deben ser fácilmente modificables. Además, indicar las referencias correspondientes para los parámetros utilizados. Las fechas de vigencia de las medidas y otros supuestos deben ser fácilmente modificables por la contraparte técnica.	Anexo Digital: Planilla Proyecciones.xlsx
10. Entregar todos los archivos de entrada y salida, y modelos utilizados para obtener los resultados.	Anexos Digitales

2 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AIRE A NIVEL NACIONAL

2.1 Antecedentes sobre disponibilidad de datos ambientales de NO₂, O₃ y otros contaminantes

Se realizó el diagnóstico de calidad de aire para NO₂ y O₃, y además se incluyó MP_{2,5} como trazador asociado a fuentes de combustión que también pueden ser emisores de NO₂. La información de calidad de aire se obtuvo de las siguientes fuentes:

- Sistema Nacional de Información de Calidad de Aire del MMA: <http://sinca.mma.gob.cl/>
- Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental de la Superintendencia del Medio Ambiente: <http://snifa.sma.gob.cl/v2/Fiscalizacion>
- Mediciones o resultados incluidos en Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental disponibles en <https://www.sea.gob.cl/>.
- Información enviada por contraparte técnica correspondiente a datos de la red del MMA en la Región Metropolitana, de redes públicas en Huasco y redes privadas de la Región de Antofagasta y de la Región del L.B. O'Higgins.

Cabe señalar que **los indicadores que se presentan en el estudio no corresponden a una evaluación estricta de normas**. Para los objetivos del estudio, relativos a visualizar los niveles de exposición de la población, se consideró incorporar la mayor cantidad de información posible para tener valores referenciales de los niveles registrados en las ciudades.

De acuerdo a la información disponible en el Sistema Nacional de Información de Calidad de Aire del MMA (SINCA), en Chile hay al menos 207 estaciones de monitoreo de calidad de aire, la mayor parte de ellas en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Biobío (ver Tabla 2.1). En 71 de ellas se realiza medición de NO₂, es decir, sólo un 34 % del total de las estaciones mide NO₂.

Tabla 2.1: Estaciones y variables monitoreadas en las Regiones de Chile

Región	N° Estaciones	MP _{2,5}	MP ₁₀	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
Arica y Parinacota	1	1	0	0	0	0	0
Tarapacá	1	1	0	0	0	0	0
Antofagasta	33	12	29	22	9	6	7
Atacama	28	5	15	19	3	1	2
Coquimbo	17	2	14	0	0	0	0
Valparaíso	37	20	29	27	20	16	23
Metropolitana	13	13	13	11	11	11	11
Lib. Gral Bdo. O'Higgins	14	4	11	10	3	6	7
Maule	8	6	7	3	3	3	2
Biobío	35	21	27	24	15	13	13
Araucanía	5	4	5	0	1	2	0
Los Ríos	7	4	6	5	5	5	4
Los Lagos	7	5	5	1	1	1	0
Aysén	3	3	2	1	1	1	1
Magallanes	1	1	0	0	0	0	0
Resumen país	210	102	163	123	72	65	70

Fuente: Elaboración propia con datos de <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/redes>

Respecto a la participación del Estado, es importante señalar que mayoritariamente el monitoreo de calidad de aire a nivel nacional está asociado a megafuentes y actividades de privados mediante resoluciones de calificación ambiental. De este modo, de las 207 estaciones, 57 son operadas por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA).

Respecto de la conexión, del total de 207 estaciones, 132 se encuentran en línea, y de éstas 50 miden NO₂, 18 de las cuales son operadas por el MMA. Es decir, del total nacional de estaciones un 24% mide NO₂ en línea, donde el MMA representa un 9%.

Tabla 2.2: Medición de NO₂ en estaciones de monitoreo de calidad de aire

Región	N° de Estaciones y medición de NO ₂ por región		N° Estaciones en línea y medición de NO ₂		N° Estaciones y medición de NO ₂ en línea MMA	
	N° Est.	NO ₂	N° Est.	NO ₂	N° Est.	NO ₂
Arica y Parinacota	1	0	1	0	1	0
Tarapacá	1	0	1	0	1	0
Antofagasta	33	9	12	4	1	0
Atacama	28	3	20	3	2	0
Coquimbo	17	0	9	0	4	0
Valparaíso	37	20	26	15	5	0
Metropolitana	13	11	11	9	11	9
Lib. Gral Bdo O'Higgins	14	3	7	0	4	0
Maule	8	3	5	1	5	1
Bíobío	35	15	28	15	11	5
Araucanía	5	1	3	1	3	1
Los Ríos	7	5	3	1	3	1
Los Lagos	7	1	3	0	3	0
Aysen	3	1	2	1	2	1
Magallanes	1	0	1	0	1	0
Resumen País	207	71	132	50	57	18

Fuente: Elaboración propia con datos de <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/redes>

Las mediciones de calidad de aire de las estaciones incluidas en la Tabla 2.1 y en la Tabla 2.2 han sido consideradas para evaluar los niveles de calidad de aire y para establecer posteriores acciones de gestión ambiental. En caso de superar el nivel de latencia (80% de la norma) se debe declarar Zona Latente y establecer planes de prevención atmosférica (PPA). Si las concentraciones superan la norma primaria de un contaminante criterio se debe declarar Zona Saturada y establecer un plan de descontaminación atmosférica (PDA). Sin embargo, como se aprecia en la Tabla 2.3 pueden pasar varios años desde la declaración de zona latente o saturada hasta la elaboración y aplicación de un PPA o PDA².

De la Tabla 2.3 se concluye que solamente la Región Metropolitana ha sido declarada Zona Latente por NO₂ (D.S. N°131/1996 del MINSEGPRES). Adicionalmente, cabe mencionar que en el D.S. N°66/2009 se indica en el considerando N°5 “Que, de acuerdo a la evolución de la calidad del aire y logros alcanzados a la fecha, los cuales indican que la Región Metropolitana ya no se encuentra en

² El proceso formal de elaboración de PPDA se encuentra regulado por el D.S.39 “Reglamento para la dictación de Planes de Prevención y Descontaminación”

condición de saturación para dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO)... “. Es decir, ninguna zona del país se encuentra con declaración de Zona Saturada o Latente por NO₂.

Tabla 2.3: Zonas saturadas, latentes y Planes de descontaminación o prevención vigentes

Zona o fuente emisora	Declaración de Zona Saturada (ZS) o Zona Latente (ZL)	Decreto Plan de prevención y/o descontaminación atmosférica
Fundación Chuquicamata	ZS por SO ₂ y MP ₁₀ , DS N° 185/1991 de MinMinería ZL por SO ₂ , D.S. N° 55/2005 de MINSEGPRES	DS N° 132/1993 de MINMinería aprueba plan de descontaminación de la división Chuquicamata de Codelco-Chile, actualizado Decreto N°206/2001 de MINSEGPRES
Fundación Chagres	ZL por SO ₂ , DS N° 185/1991 de MinMinería	
Fundación Hernán Videla Lira	ZS por SO ₂ , DS N° 255/1993 del MinAgricultura	DS N°180/1995 de MINSEGPRES
María Elena y Pedro de Valdivia	ZS por MP ₁₀ , DS N° 1162/1993 de MINSAL	DS N°164/1999 de MINSEGPRES actualizado por D.S. N°37/2004 de MINSEGPRES
Fundación de Caletones	ZS por SO ₂ y MP ₁₀ , DS N°179/1994 de MINSEGPRES	DS N°81/1998 de MINSEGPRES
Complejo Industrial Ventanas	ZS por SO ₂ y MP ₁₀ , DS N° 346/1994 del MinAgricultura	DS N° 252 de MINMinería (derogado oct 2018)
Región Metropolitana	ZS por MP ₁₀ , PTS, CO y O ₃ y ZL para NO ₂ , DS N°131/1996 del MINSEGPRES ZS por conc. diaria de MP _{2,5} , DS N°67/2014 del MMA	DS N°16/1998 de MINSEGPRES actualizado por DS N°58/2003 de MINSEGPRES actualizado por DS N°66/2009 de MINSEGPRES actualizado por DS N°31/2016 de MMA
Fundación de Potrerillos	ZS por SO ₂ y MP ₁₀ , DS N°18/1997 de MINSEGPRES	DS N°179/1999 de MINSEGPRES
Lota, Coronel, San Pedro De La Paz, Hualqui, Penco, Tomé, Chiguayante, Hualpén, Concepción, Y Talcahuano	ZL por conc. diaria de MP ₁₀ DS N°41/2006 del MINSEGPRES ZS por conc. diaria de MP _{2,5} DS N°15/2015 de MMA	DS N°6/2018 del MMA
Tocopilla	ZS por conc. anual de MP ₁₀ DS N°50/2007 de MINSEGPRES	DS N°70/2010 de MINSEGPRES
Rancagua y 17 comunas del valle central de la VI Región	ZS por conc. diaria y anual de MP ₁₀ DS N°7/2009 de MINSEGPRES	DS N°15/2013 de MMA
Valle Central de la región de O'Higgins	DS N°42/2017 de MMA	
Andacollo	ZS por conc. diaria y anual de MP ₁₀ DS N°8/2009 de MINSEGPRES	DS N°59/2014 de MMA
Calama	ZS por conc. anual de MP ₁₀ DS N° 57/2009 de MINSEGPRES	RE N°125/2020 de MMA amplia plazo para elaborar PDA
Talca y Maule	ZS por conc. diaria y anual de MP ₁₀ DS N°12/2010 de MINSEGPRES	DS N°49/2016 de MMA
Osorno	ZS por conc. diaria y anual de MP ₁₀ y MP _{2,5} DS N°27/2012 de MMA	DS N°47/2016 de MMA
Huasco	ZL por conc. anual de MP ₁₀ DS N°40/2012 de MMA	DS N°38/2017 de MMA (Plan de prevención)

Zona o fuente emisora	Declaración de Zona Saturada (ZS) o Zona Latente (ZL)	Decreto Plan de prevención y/o descontaminación atmosférica
Coyhaique	ZS por conc. diaria y anual de MP ₁₀ DS N°33/2013 de MMA	DS N°46/2016 de MMA
Temuco y Padre Las Casas	ZS por conc. diaria de MP ₁₀ DS N°35/2005 del MINSEGPRES ZS por conc. diaria de MP _{2,5} DS N°2/2013 del MMA	DS N°8/2015 de MMA Actualizado por D.S. N°31/2017 de MMA
Chillán y Chillán Viejo	ZS por conc diaria de MP ₁₀ y MP _{2,5} ZL por conc anual de MP ₁₀ DS N°36/2013 de MMA	DS N°18/2016 de MMA
Valdivia	ZS por conc. diaria y anual de MP ₁₀ y ZS por conc. diaria de MP _{2,5} DS N°17/2014 de MMA	DS N°25/2015 de MMA
Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví	ZS por conc. anual de MP _{2,5} ZL por conc. diaria de MP _{2,5} y conc. anual de MP ₁₀ DS N°10/2015 del MMA	DS N°105/2018 de MMA
Los Ángeles	ZS por conc. diaria de MP ₁₀ y MP _{2,5} DS N°11/2015 de MMA	DS N°4/2017 de MMA
Curicó	ZS por conc. diaria de MP ₁₀ y MP _{2,5} DS N°53/2015 de MMA	DS N°44/2017 de MMA
Provincia de Quillota y Comunas de Catemu, Panquehue y Llaylay	ZS por conc. anual de MP ₁₀ y ZL por conc. diaria de MP ₁₀ DS N°107/2018 de MMA	RE N°398/2020 de MMA constituye comité operativo para elaborar PDA

Fuente: <https://ppda.mma.gob.cl/> y <http://planesynormas.mma.gob.cl/>

Los datos disponibles en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental de la Superintendencia del Medio Ambiente (SNIFA) corresponden a datos validados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) para los contaminantes que cuentan con declaración de representatividad poblacional (EMRP)³. Por este motivo, si la estación no tiene EMRP por NO₂ los datos de NO₂ no están incluidos en el reporte de fiscalización de la SMA, a modo de ejemplo, esta situación aplica a las estaciones de la red de Quintero y Puchuncaví para las cuales sólo se reporta SO₂, MP₁₀ y MP_{2,5}.

La información de las estaciones privadas disponible en SINCA no está actualizada ni validada para la mayoría de las estaciones. Las estaciones públicas de la red del MMA disponibles en SINCA tienen datos horarios con revisión preliminar y datos no validados para la mayoría de las estaciones, excepto las ubicadas en la Región Metropolitana.

Por este motivo, los datos de calidad descargados desde SINCA en resolución horaria fueron revisados de acuerdo a la opinión experta para descartar y eliminar del análisis períodos con evidente anomalía asociado probablemente a mal funcionamiento de los equipos de medición, como también datos que podrían corresponder a calibraciones o controles de funcionamiento. No se aplicaron factores de corrección a los datos ya que no se cuenta con la información que permita

³ Estación de monitoreo que se encuentra localizada en un área urbana y que cumple con los requisitos técnicos para ser calificada como tal por la Autoridad Competente.

realizar los cálculos de dichos factores, entre ellos bitácoras de las estaciones, fichas de mantención y fichas de calibración.

Para generar promedios diarios se consideraron los criterios de completitud establecidos en las normas primarias de calidad de aire para NO₂, O₃ y MP_{2,5} (al menos 18 valores o 75% del período).

Para calcular promedios mensuales y anuales se flexibilizó el criterio de completitud establecido en las normas (contar al menos con 75% de los datos) para disponer de la mayor cantidad de datos ya que el objetivo de este estudio es identificar los niveles de los contaminantes a los cuales están expuestas las personas (asumiendo principio Preventivo) y no es el objetivo realizar una estricta evaluación de las normas de calidad de aire.

Para el análisis de calidad de aire se presentan 3 tipos de gráficos o niveles de agregación de información. En primer lugar, resúmenes de los indicadores usados para evaluar las normas horarias y anual de NO₂, para la norma de 8 horas de O₃ y para las normas diarias y anual de MP_{2,5}. En segundo lugar, un análisis para 4 zonas más la RM donde se incluyen gráficos de evolución de los indicadores de evaluación de normas durante los últimos años para NO₂ y en tercer lugar un análisis de comportamiento estacional mediante la comparación de los promedios de mensuales de NO₂ v/s O₃ y NO₂ v/s MP_{2,5} para las principales estaciones de cada zona definida para análisis.

En las Bases Técnicas se estableció realizar un análisis para la Región Metropolitana y 4 zonas. Las zonas corresponden a Calama, Concón-Quintero-Puchuncaví y Gran Concepción más una 4ta zona por definir durante el estudio. Se definió a la zona de Quillota-La Calera como 4ta zona en gran medida por el impacto en la Región Metropolitana y en la zona de Concón-Quintero-Puchuncaví (CQP) de las fuentes emisoras de NO₂ ubicadas en esa zona.

2.2 Resúmenes de concentraciones de NO₂, O₃ y MP_{2,5}

La Tabla 2.4 resume los indicadores para evaluar normas de calidad de aire de NO₂, O₃ y MP_{2,5}. El indicador Percentil99 (P99)⁴ de NO₂ corresponde promedio trianual de los percentiles 99 de las concentraciones horarias máximas diarias de NO₂, situación similar para P99 de O₃, pero considerando concentraciones de 8 horas de O₃. Para MP_{2,5} se considera el percentil 98 (P98) de las concentraciones diarias del año de evaluación. Se incluyen, además, el promedio trianual de NO₂ y MP_{2,5}, y la representatividad asociada.

⁴ Por ejemplo: para la estación EME-F se indica año 2018, el valor corresponde a $(P99_{(2016)}+P99_{(2017)}+P99_{(2018)})/3$

Tabla 2.4: Resumen de indicadores de calidad de aire para NO₂, O₃ y MP_{2,5}

Comuna	Estación	NO ₂ (µg/m ³ N)			O ₃ (µg/m ³ N)		MP _{2,5} (µg/m ³)		
		P99	trianual	año	P99	año	P98	trianual	año
Antofagasta	Coviefi	43,5	6,9	2019	Sin datos		17	9	2019
Calama	Estación Centro	103,2	16,7	2019	97,8	2019	10	6	2019
Mejillones	Cia de Bomberos	112,3	11,9	2019	69,0	2013	29	16	2018
Mejillones	Ferrocarril	39,4	2,5	2019	56,7	2019	17	7	2019
Taltal	Paposo	30,1	1,7	2019	84,5	2019	Sin datos		
Taltal	Máximo Impacto	111,2	5,6	2019	80,7	2019	Sin datos		
Tocopilla	Supersite	65,4	13,3	2019	47,8	2019	19	12	2019
Huasco	EME F	55,4	21,9	2018	50,7	2019	Sin datos		
Huasco	EME M	44,1	12,3	2018	Sin datos		Sin datos		
Huasco	Huasco II	38,2	6,5	2019	72,8	2019	19	10	2019
La Calera	La Cruz, Colbún	77,7	29,0	2015	81,0	2015	Sin datos		
La Calera	La Calera	61,7	11,3	2015	61,3	2015	Sin datos		
La Calera	Rural 1	65,7	11,0	2015	80,3	2015	Sin datos		
Quillota	Cuerpo de Bomberos	43,0	13,6	2018	87,5	2015	Sin datos		
Quillota	La Palma	41,0	9,0	2018	63,0	2015	Sin datos		
Quillota	San Pedro	37,0	10,0	2018	72,0	2015	Sin datos		
Quillota	Manzanar	48,7	19,7	2015	68,3	2015	Sin datos		
Concón	Colmo	56,6	14,7	2019	73,4	2019	Sin datos		
Concón	Concón	72,3	20,3	2019	70,8	2019	26	15	2019
Puchuncaví	Campiche	81,1	14,9	2016	66,0	2016	Sin datos		
Puchuncaví	Puchuncaví	42,4	11,9	2019	66,1	2019	27	14	2019
Puchuncaví	La Greda	53,2	16,7	2019	53,8	2019	30	15	2019
Puchuncaví	Los Maitenes	60,6	11,9	2019	59,7	2019	25	12	2019
Puchuncaví	Ventanas	54,6	14,6	2019	59,8	2019	28	15	2019
Quintero	Centro Quintero	67,8	15,0	2019	58,9	2019	Sin datos		
Quintero	Loncura	51,7	10,2	2019	58,8	2019	30	15	2019
Quintero	Quintero	35,4	8,6	2019	65,7	2019	31	15	2019
Quintero	Sur	57,7	14,7	2019	60,7	2019	Sin datos		
Quintero	Valle Alegre	51,8	9,0	2019	66,6	2019	24	12	2019
Viña del Mar	Viña del Mar	95,9	28,2	2008	50,9	2015	36	13	2019
Cerrillos	Cerrillos I	169,0	40,8	2019	122,2	2016	76	26	2019
Cerro Navia	Cerro Navia	170,7	46,6	2019	122,5	2019	94	31	2019
El Bosque	El Bosque	170,4	40,8	2019	109,8	2019	72	30	2019
Independencia	Independencia	200,4	52,5	2019	110,7	2019	67	27	2019
La Florida	La Florida	174,3	47,3	2019	125,8	2019	64	26	2019
Las Condes	Las Condes	288,6	49,0	2019	159,4	2019	45	21	2019
Pudahuel	Pudahuel	138,6	38,1	2019	99,4	2019	91	28	2019
Puente Alto	Puente Alto	150,4	38,0	2019	134,6	2019	53	22	2019
Stgo Centro	Parque O'Higgins	219,6	52,9	2019	114,5	2019	65	26	2019
Quilicura	Quilicura 1	159,4	41,6	2019	119,0	2015	67	25	2019
Talagante	Talagante	115,5	20,8	2019	111,0	2019	63	21	2019
Codegua	Codegua	64,0	6,7	2010	100,0	2010	Sin datos		
Mostazal	Casa Peuco	57,0	5,8	2012	97,0	2012	Sin datos		
Mostazal	San Fco de Mostazal	71,0	11,4	2010	97,0	2010	Sin datos		
Rancagua	Rancagua I	87,7	20,1	2010		2010	82	23	2019
Requinoa	MVC	102,5	19,0	2012	97,3	2012	Sin datos		
Requinoa	Totihue	97,6	21,2	2010	118,0	2010	Sin datos		
Talca	La Florida	82,2	17,5	2019	70,0	2019	92	26	2019

Comuna	Estación	NO ₂ (µg/m ³ N)			O ₃ (µg/m ³ N)		MP _{2,5} (µg/m ³)		
		P99	trianual	año	P99	año	P98	trianual	año
Chiguayante	Punteras	50,6	9,9		Sin datos		66	17	2019
Concepción	Kingston College	74,0	18,2	2019	51,3	2019	40	17	2019
Coronel	Coronel Norte	130,0	10,0	2009	33,7	2009	Sin datos		
Coronel	Coronel Sur	82,3	9,7	2009	41,0	2009	Sin datos		
Hualpén	ENAP Price	70,3	11,2	2019	49,5	2019	39	14	2019
Hualpén	JUNJI	78,5	15,0	2019	44,3	2019	106	25	2019
Hualqui	Hualqui	39,7	6,8	2019	54,2	2019	62	21	2019
Nacimiento	Club de Empleados	57,5	10,2	2019	87,5	2019	79	21	2019
Ranquil	Nueva Aldea	67,0	7,9	2016	85,4	2019	Sin datos		
Talcahuano	Consul - San Vicente	77,1	15,9	2019	Sin datos		82	22	2019
Talcahuano	Indura	76,1	19,8	2019	38,9	2019	57	16	2019
Talcahuano	Nueva Libertad	46,7	9,1	2019	62,6	2019	67	22	2019
Talcahuano	Liceo Polivalente	61,1	10,3	2019	54,8	2019	47	16	2019
Padre Las Casas	Padre Las Casas II	91,8	13,7	2019	Sin datos		158	42	2019
Temuco	Las Encinas	63,9	10,7	2008	Sin datos		106	28	2019
Valdivia	Valdivia	59,5	9,6	2016	54,3	2016	133	33	2019
Puerto Montt	Trapén Sur	45,8	3,9	2010	56,7	2010	Sin datos		
Coyhaique	Coyhaique II	100,3	11,8	2016	55,1	2016	175	47	2019

Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

La Figura 2-1 corresponde al resumen del promedio de 3 años del percentil 99 de las concentraciones horarias máximas diarias de NO₂. Se incluyen todas las estaciones con monitoreo de NO₂, junto al nombre de cada estación se identifica entre paréntesis el año base para el cálculo, de acuerdo a la información disponible. Además, se incluye referencialmente el nivel de la norma vigente en Chile para valores horarios (línea roja, 400 µg/m³N) y el estándar recomendado por la OMS para promedio horario (línea verde, 200 µg/m³N).

De acuerdo a la Figura 2-1 y a la Tabla 2.4, el P99 de las concentraciones horarias máximas diarias de NO₂ en la Región Metropolitana se encuentra en el rango 150 – 220 µg/m³N. Las estaciones con los valores más altos, tanto en la RM como a nivel nacional, son P. O'Higgins con 219 µg/m³N, Las Condes con 202 µg/m³N e Independencia con 200 µg/m³N. En términos comparativos, el P99 de las concentraciones horarias en P. O'Higgins representa un 55% del valor límite de la norma horaria vigente y un 110% del estándar de referencia OMS para promedio horario.

La Figura 2-2 presenta el promedio trianual de NO₂, junto al nombre de cada estación se identifica entre paréntesis el año base de cálculo de acuerdo a la información disponible (por ejemplo, si la estación indica el año 2018, el valor es el promedio de los promedios anuales del periodo 2016-2018). Se incluye referencialmente el nivel de la norma vigente en Chile (línea roja, 100 µg/m³N) y el estándar recomendado por OMS para promedio anual (línea verde, 40 µg/m³N). En la RM, las mayores concentraciones se observan en la estación P. O'Higgins e Independencia con valores cercanos a 53 µg/m³N. En términos comparativos, los mayores valores registrados en la estación P O'Higgins representan un 53% de la norma anual vigente de NO₂ y un 133% del estándar de referencia OMS para promedio anual.

La Figura 2-3 resume el percentil 99 de las concentraciones diarias máximas de 8 horas. Para elaborar la figura se consideraron todas las estaciones donde se realiza monitoreo de NO₂ para identificar en cuales se realiza además medición de O₃. Junto al nombre de cada estación se incluye el año para el cual se calculó el P99. Para el caso de estaciones con medición de NO₂, pero sin medición de O₃ se incluye junto al nombre de la estación el identificador “sin datos”.

De acuerdo a la Figura 2-3 y a la Tabla 2.4, las mayores concentraciones de O₃ se registran en las estaciones de la Región Metropolitana, incluso las estaciones Cerrillos, Cerro Navia, La Florida, Pudahuel y Las Condes tienen concentraciones por sobre el valor de la norma de 8 horas de O₃ establecida en 120 µg/m³N, lo cual es coherente con la declaración de Zona Saturada desde el año 1996. La estación Las Condes con un P99 de 159,4 µg/m³N registra la concentración más alta a nivel nacional por O₃ y corresponde además, a la segunda estación con mayor P99 de NO₂.

La estación Totihue en la Comuna de Requinoa registró en el año 2010 niveles cercanos a la norma de 8 horas de O₃. No se dispone de información de los últimos años que permita evaluar las concentraciones actuales de O₃ en las estaciones de esa zona.

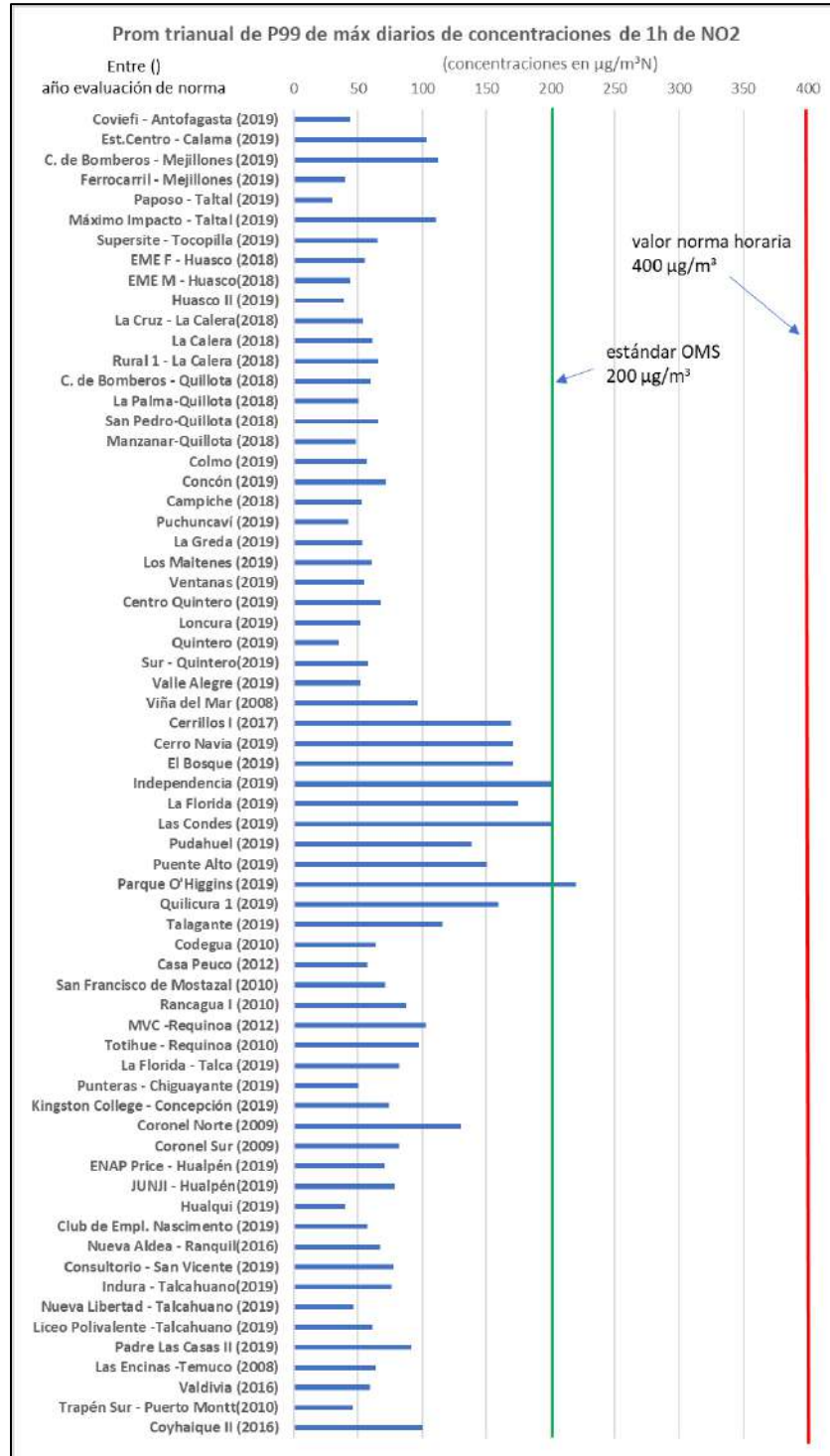
Una tercera zona que muestra concentraciones relativamente altas corresponde a Calama, donde la estación Centro ha registrado niveles horarios con un P99 de NO₂ y O₃ cercano a 100 µg/m³N.

La zona de Quillota- La Calera, a pesar de tener centrales termoeléctricas, fuentes importantes de NO_x, registra P99 de O₃ de 8 h en el rango de 60 a 90 µg/m³N.

La Figura 2-4 y la Figura 2-5 resumen las concentraciones de MP_{2,5}, al igual que para O₃ se incluyeron todas las estaciones donde se realiza medición de NO₂, identificando con “sin datos” aquellas estaciones donde no hay medición de MP_{2,5}. Se observa la diferencia de niveles de concentraciones de MP_{2,5} entre las estaciones de la zona Norte respecto a las estaciones de la zona Centro-Sur, con aumento de concentraciones hacia las zonas más al sur, producto principalmente del uso de leña para calefacción.

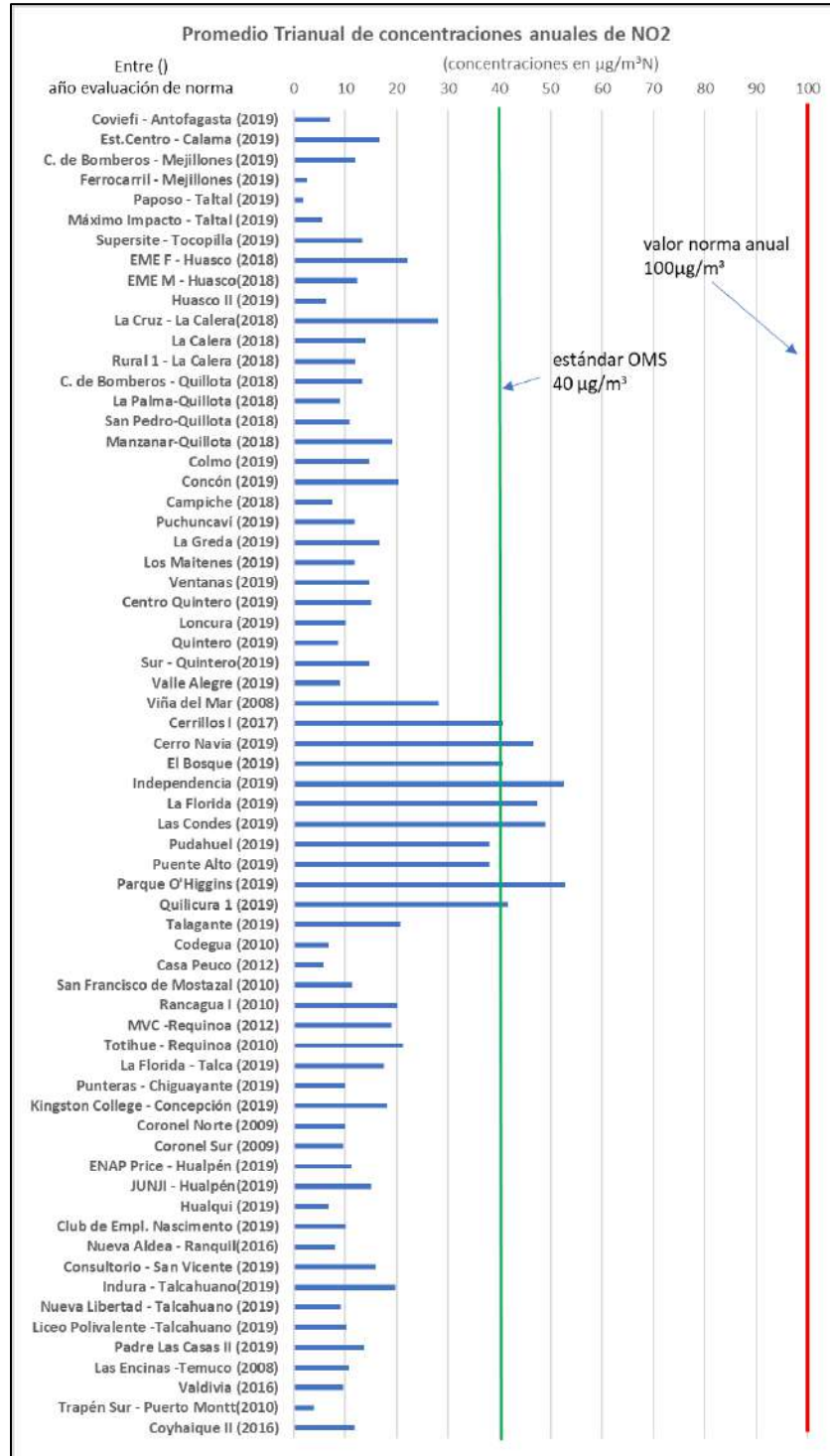
La mayoría de las estaciones desde la Región Metropolitana al Sur tiene un P98 de las concentraciones diarias y promedio trianual de MP_{2,5} por sobre el nivel de la norma diaria y anual de MP_{2,5}, con mayores niveles en las estaciones de Temuco, Valdivia y Coyhaique. Los valores obtenidos son coherentes con las declaraciones de zonas saturadas presentadas en la Tabla 2.4.

Figura 2-1: Percentil 99 de concentraciones de NO₂ en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile. Año base de cálculo entre paréntesis



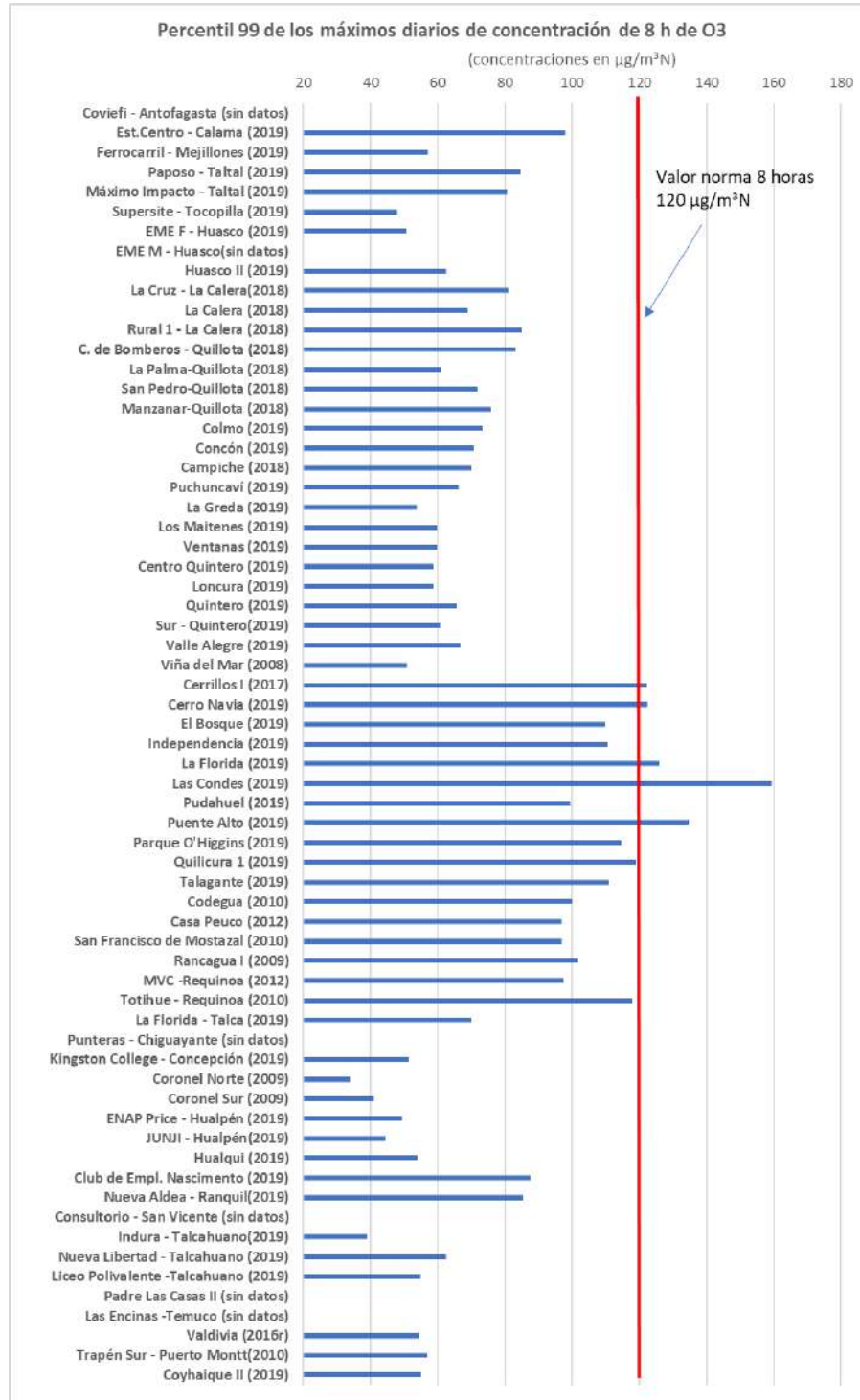
Fuente: Elaboración propia con datos de SEREMI del Medio Ambiente R. de Antofagasta, SINCA, SNIFA y SEA

**Figura 2-2: Promedio trianual de NO₂ en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile.
Año base de cálculo entre paréntesis**



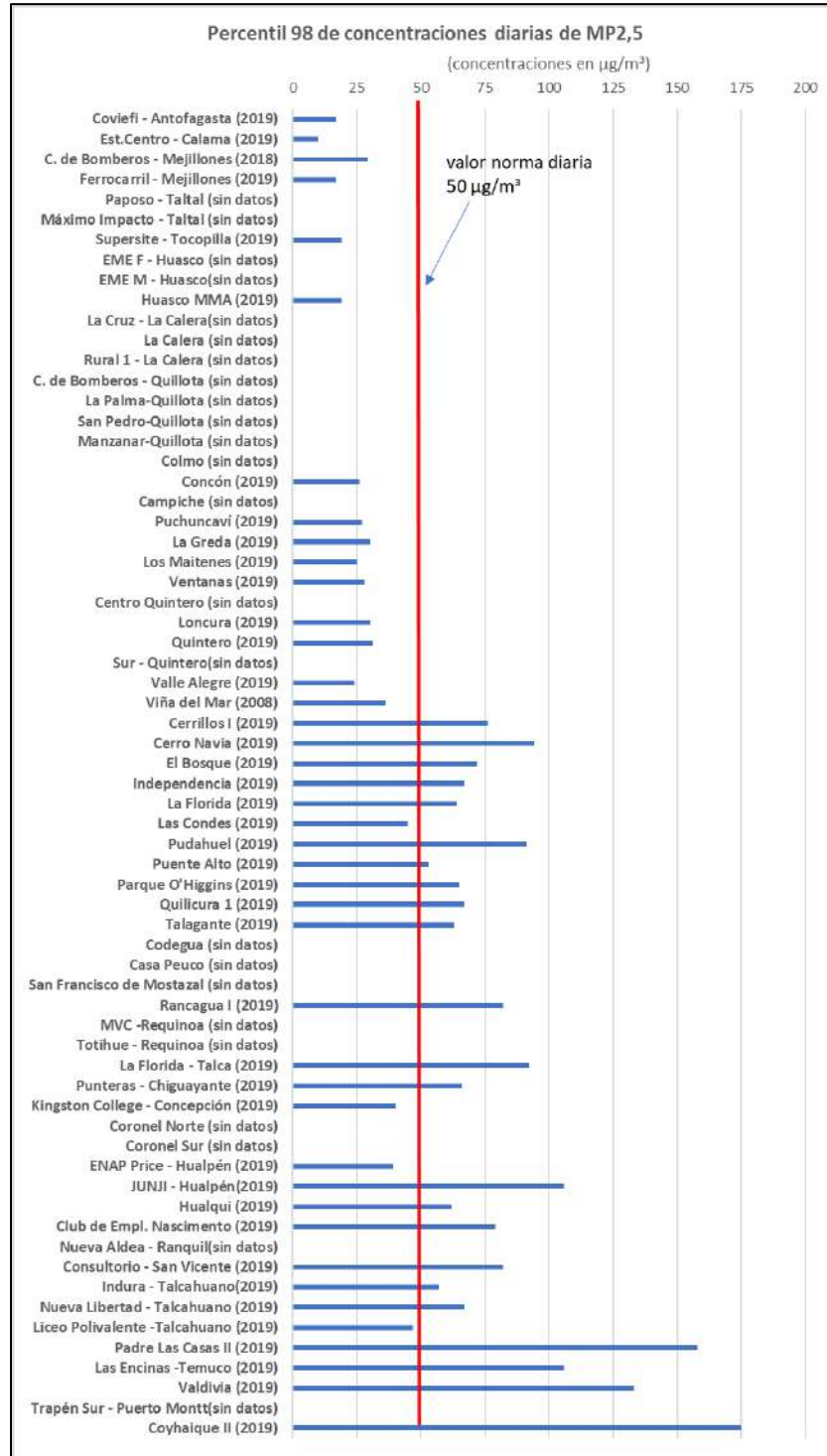
Fuente: Elaboración propia con datos de SEREMI del Medio Ambiente R. de Antofagasta, SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-3: Percentil 99 de máximos diarios de concentraciones de 8 horas de O₃ en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile.



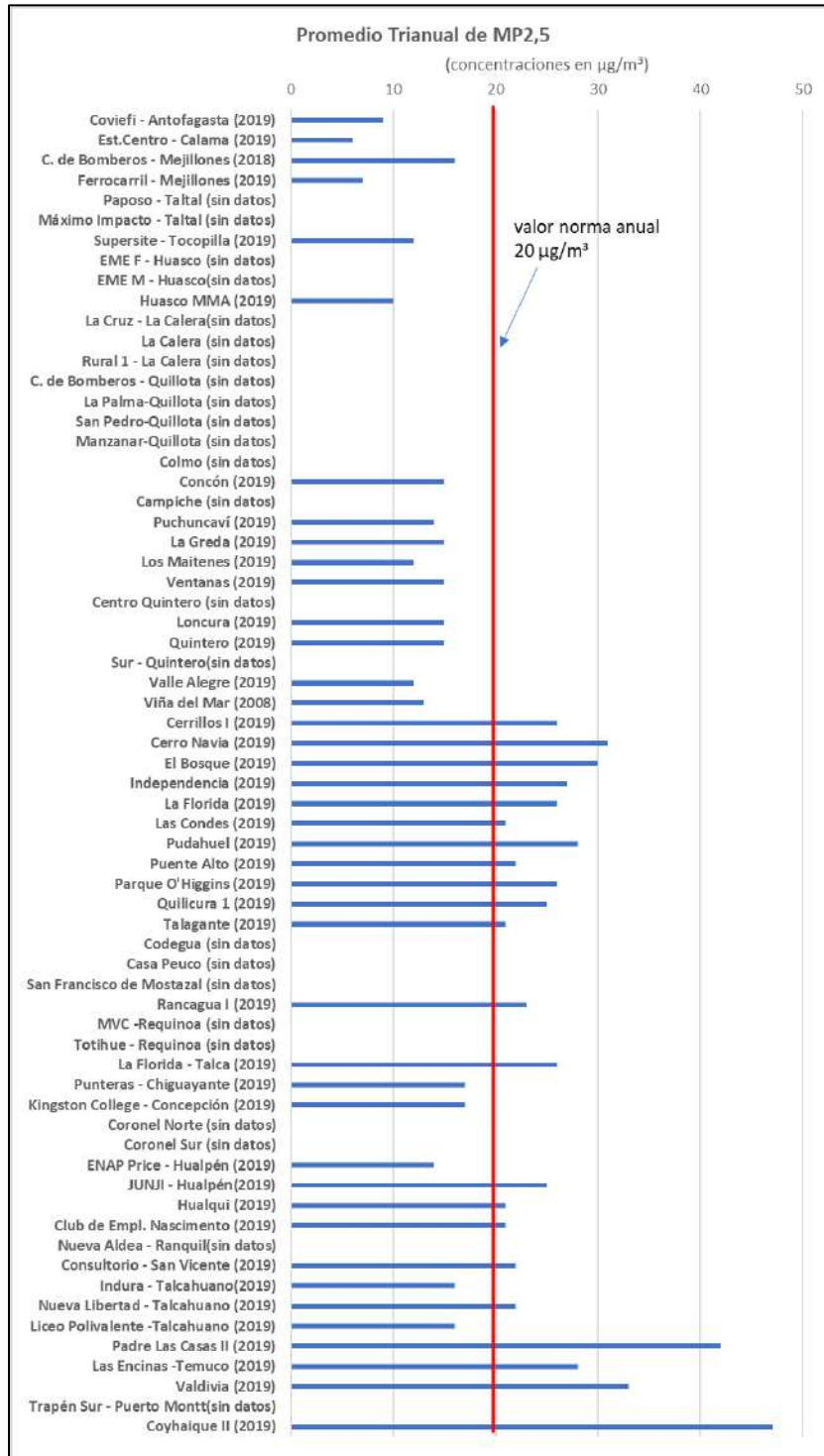
Fuente: Elaboración propia con datos de SEREMI del Medio Ambiente R. de Antofagasta, SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-4: Percentil 98 de concentraciones diarias de MP2,5 en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile.



Fuente: Elaboración propia con datos de SEREMI del Medio Ambiente R. de Antofagasta, SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-5: Promedio trianual de MP2,5 en estaciones de monitoreo de calidad de aire en Chile.



Fuente: Elaboración propia con datos de SEREMI del Medio Ambiente R. de Antofagasta, SINCA, SNIFA y SEA

2.3 Análisis de tendencias de concentraciones de NO₂ por zonas de interés

Para las 4 zonas de interés (Calama, Quillota-La Calera, CQP y Gran Concepción) y para la Región Metropolitana se incluyen gráficos con la evolución del Percentil 99 (P99) y promedio anual de NO₂ durante los últimos años sujetos a la información disponible. En Anexo Digital, carpeta “Datos de Calidad de Aire” se incluyen tablas con los valores de percentil 99 y de los promedios anuales usados para elaborar los gráficos.

2.3.1 Zona 1: Calama

Para la Zona de Calama solamente se cuenta con mediciones de NO₂ en la estación Centro de la red de Codelco Norte, cuya ubicación se ilustra en la Figura 2-6:

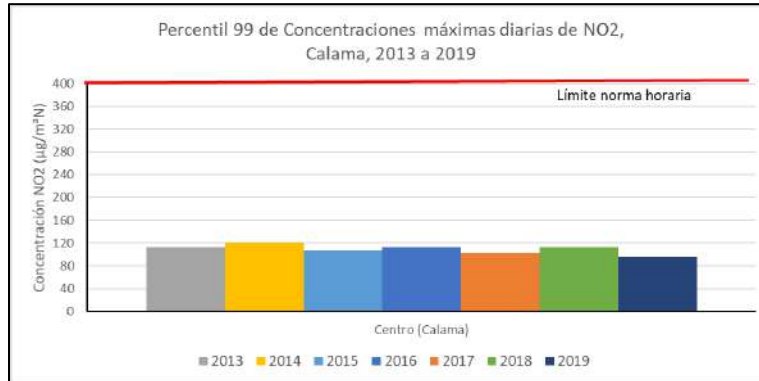
Figura 2-6: Estación Centro ubicada en Calama



Fuente: Elaboración propia en Google Earth con coordenadas disponibles en SINCA

Las Figuras siguientes presentan la evolución del Percentil 99 de NO₂ y del promedio anual de NO₂ para la estación Centro en Calama. De acuerdo a la Figura 2-7 el percentil 99 de NO₂ se ha mantenido con valores cercanos a 115 µg/m³N desde el año 2013, con un leve descenso en el año 2019.

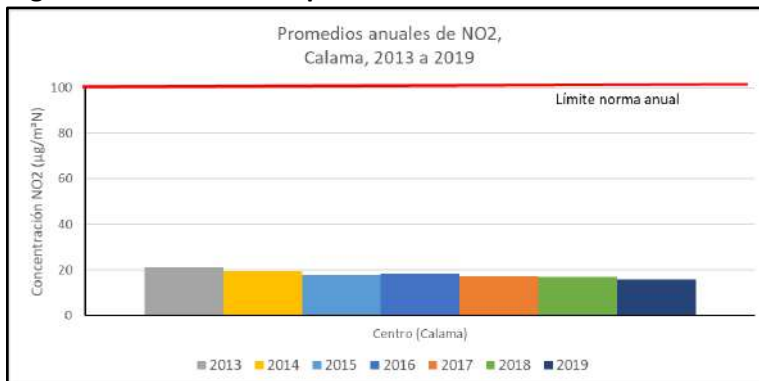
Figura 2-7: Evolución de percentil 99 de concentraciones horarias máximas diarias de NO₂ en Calama



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

De acuerdo a la Figura 2-8, los promedios anuales de NO₂, al igual que para el percentil 99 se han mantenido con valores similares desde el año 2013, en torno a 18 µg/m³N pero con un leve descenso hacia el año 2019, es decir valores cercanos al 18% de la norma anual.

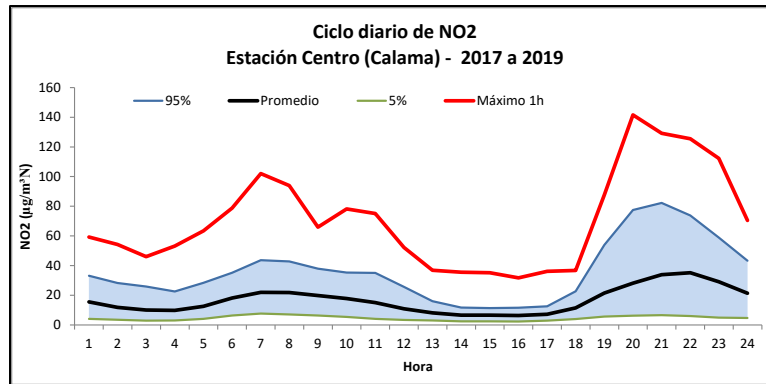
Figura 2-8: Evolución de promedios anuales de NO₂ en Calama



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

La Figura 2-9 muestra el Ciclo diario de las concentraciones de NO₂, incluyendo el ciclo diario promedio, el ciclo para los percentiles 5% y 95% (criterios establecidos en la Guía de calidad de aire de SEA) y un ciclo construido con el máximo de cada hora para el período 2017 a 2019 que corresponde al período considerado para la última evaluación de normas de NO₂. Se aprecia para las 4 curvas un comportamiento similar con un máximo secundario en las mañanas (alrededor de las 07:00), una disminución de las concentraciones hasta valores mínimos en las tardes y un aumento en las noches alcanzando un máximo principal alrededor de las 20:00. Para el ciclo diario promedio el valor más alto es cercano a 70 µg/m³N y la concentración horaria de NO₂ máxima es 141,5 µg/m³N.

Figura 2-9: Ciclos diarios de NO₂ en estación Centro Calama, período 2017 a 2019

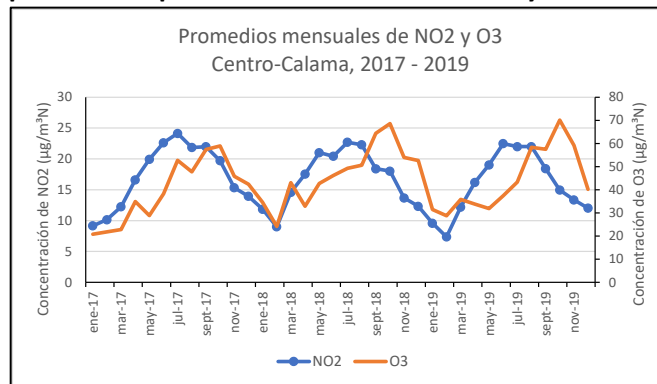


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Análisis estacional para Calama:

La Figura 2-10 presenta una comparación de los promedios mensuales de NO₂ y O₃ en la estación Centro entre los años 2017 y 2019 para analizar el comportamiento estacional de ambos contaminantes. Se observa que tanto para NO₂ como para O₃ las concentraciones menores ocurren en verano con un aumento hasta máximos entre junio y septiembre en caso del NO₂. En cambio, O₃ alcanza valores máximos en el mes de octubre.

Figura 2-10: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Centro-Calama



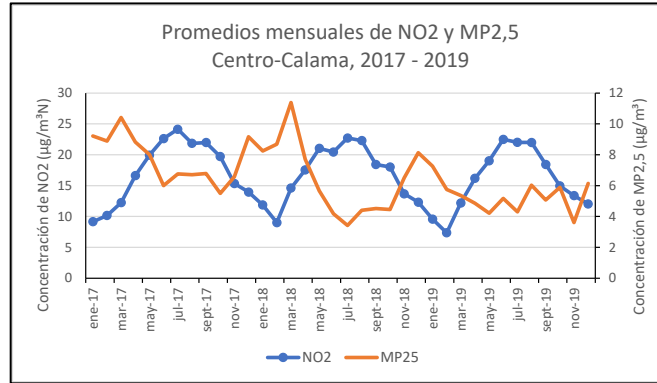
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

La comparación para NO₂ y MP_{2,5} presentado en la Figura 2-11 muestra que a diferencia de los promedios de NO₂, el MP_{2,5} aumenta en meses de verano y disminuye en los meses de mayores concentraciones de NO₂.

Los ciclos anuales de O₃ y MP_{2,5} de Calama tienen diferencias con los presentados para las otras zonas. Para el caso O₃ de una causa probable es que la estación está en el centro de la ciudad y el O₃ está todavía en formación, recordar que es contaminante secundario que se forma más alejado de las fuentes. En el caso, de MP_{2,5} también puede haber un efecto climático en el ciclo de las emisiones, a diferencia de las ciudades de la zona Centro Sur donde aumentan las emisiones y

concentraciones de MP_{2,5} por los inviernos más fríos. Además, los niveles de son bajos en Calama y pueden tener un impacto de aerosol secundario (SO₄) asociado a la fundición de Chuquicamata.

Figura 2-11: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Centro-Calama

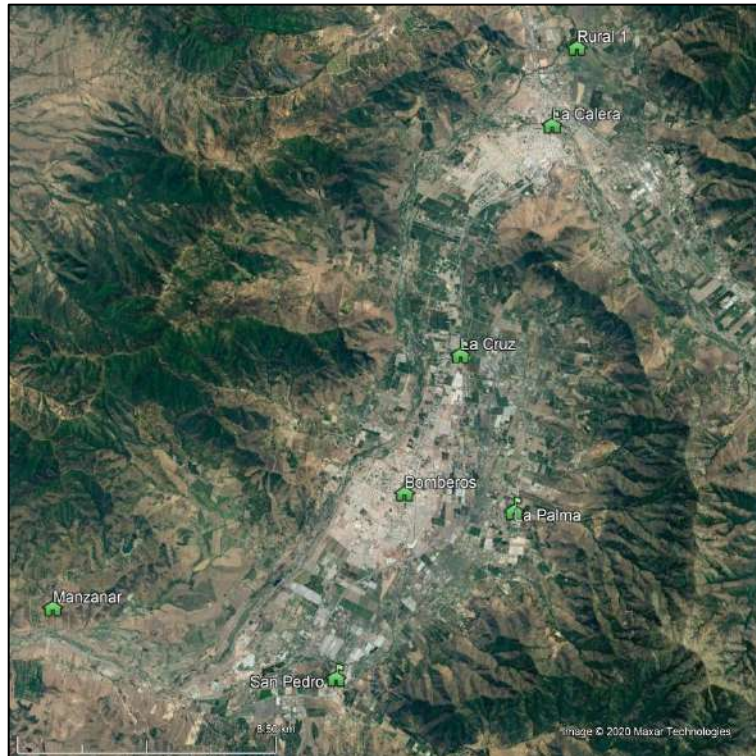


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

2.3.2 Zona 2: Valparaíso interior

La ubicación de las estaciones con monitoreo de NO₂ en la zona de Quillota-La Calera se ilustra en la figura siguiente:

Figura 2-12: Ubicación estaciones con monitoreo de NO₂ en Quillota-La Calera



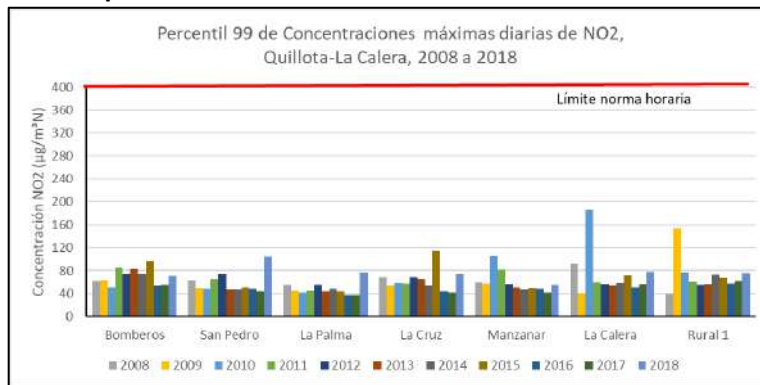
Fuente: Elaboración propia en Google Earth con coordenadas disponibles en SINCA

Para las estaciones de Quillota-La Calera no se logró recopilar datos horarios posteriores al año 2010, por lo cual la tendencia de percentil 99 y promedio anual presentada fue construida con información disponible en el informe “Línea base de la calidad del aire en la Región de Valparaíso período 2016-2018” de la SEREMI del MMA de la Región de Valparaíso el cual contiene indicadores anuales desde el año 2008 hasta 2018.

De acuerdo a la Figura 2-13, entre los años 2008 y 2018 la evolución del percentil 99 de NO₂ no tiene un comportamiento definido, con valores en el rango de 40 a 80 µg/m³N para la mayoría de los años excepto el año 2010 en La Calera con un valor cercano a 190 µg/m³N y el año 2009 en la estación Rural 1 con un P99 cercano a 160 µg/m³N.

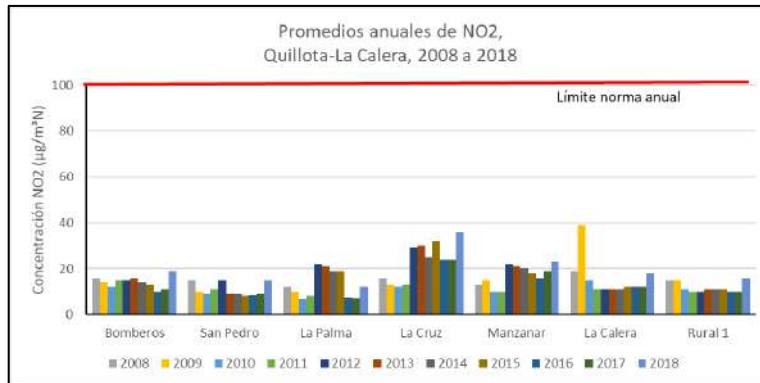
De acuerdo a la Figura 2-13, los promedios anuales registran un aumento cercano a 100% entre los años 2011 y 2015 en las estaciones La Palma, La Cruz y Manzanar, pero en el año 2016 la estación registra promedio anual de NO similar al año 2010. Luego, durante los últimos años (2016-2018) los promedios anuales de NO₂ son cercanos a 10 µg/m³N en Bomberos, La Palma, San Pedro, Rural 1 y La Calera y en cambio en La Cruz, y Manzanar son más cercanos a 20 µg/m³N.

Figura 2-13: Evolución percentil 99 concen. horarias máximas diarias NO₂ Quillota-La Calera



Fuente: Elaboración propia con datos de SEREMI

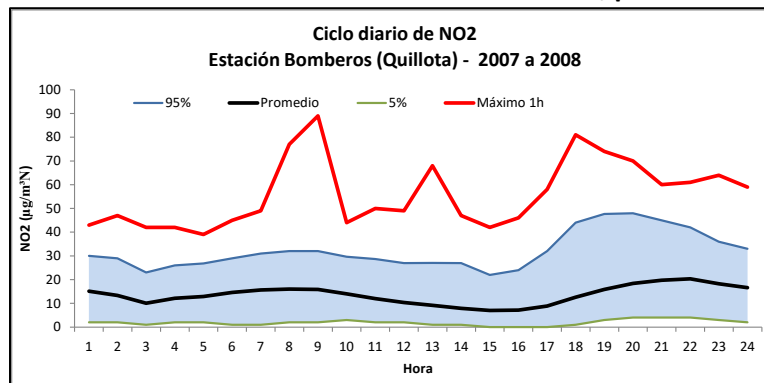
Figura 2-14: Evolución de promedios anuales de NO₂ en Quillota-La Calera



Fuente: Elaboración propia con datos de SEREMI

El ciclo diario promedio de NO₂ para el período 2007 y 2008 (se descartó el año 2006 por períodos de comportamiento anormal de las concentraciones de NO₂ durante varios meses), al igual que el ciclo diario del percentil 95 de concentraciones de NO₂ muestra aumentos de concentraciones en las mañanas y noches, siendo mayor en las noches especialmente para el ciclo del percentil 95% con máximos alrededor de las 20:00. Los valores máximo de cada hora tienen un comportamiento más irregular registrando la concentración horaria de NO₂ más alta a las 09:00 con un valor de 89 µg/m³N. El ciclo diario promedio tiene valores máximos cercanos a 20 µg/m³N.

Figura 2-15: Ciclos diarios de NO₂ en estación Bomberos, período 2007 a 2008

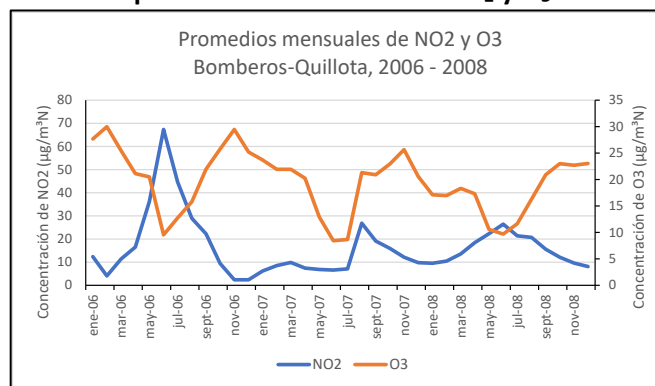


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Análisis estacional para la Zona de Quillota-La Calera

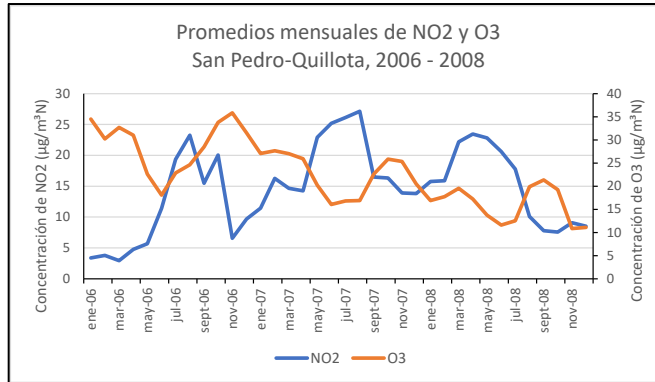
La información disponible sólo permite una comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ para las estaciones Bomberos, San Pedro, La Palma y Rural entre los años 2006 y 2008. Los datos horarios presentan fuertes variaciones interanuales que pueden estar asociados a problemas de mantención por sobre cambios en el comportamiento, especialmente para NO₂. Por lo cual el análisis debe ser considerado como un ejercicio ilustrativo a la espera de obtener información de los últimos años. En todas las estaciones se aprecia una relación inversa entre los promedios mensuales de NO₂ y O₃ registrando mayores concentraciones de NO₂ en meses de invierno, durante los cuales las concentraciones de O₃ disminuyen.

Figura 2-16: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Bomberos-Quillota



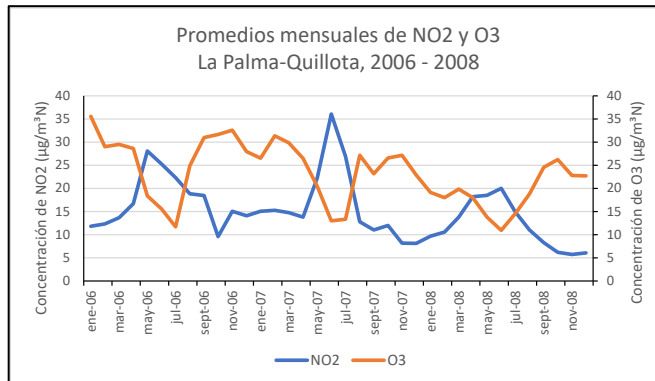
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-17: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación San Pedro-Quillota



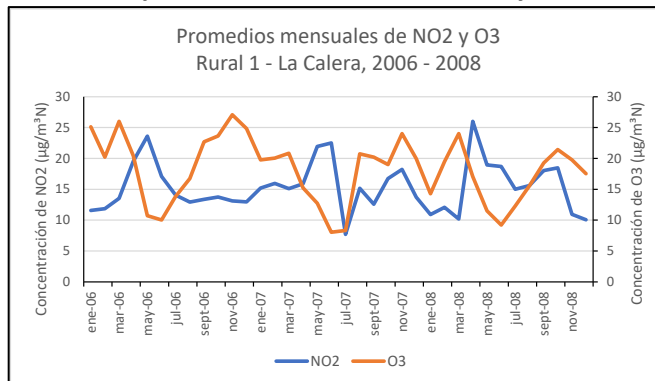
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-18: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación La Palma-Quillota



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-19: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Rural 1-La Calera

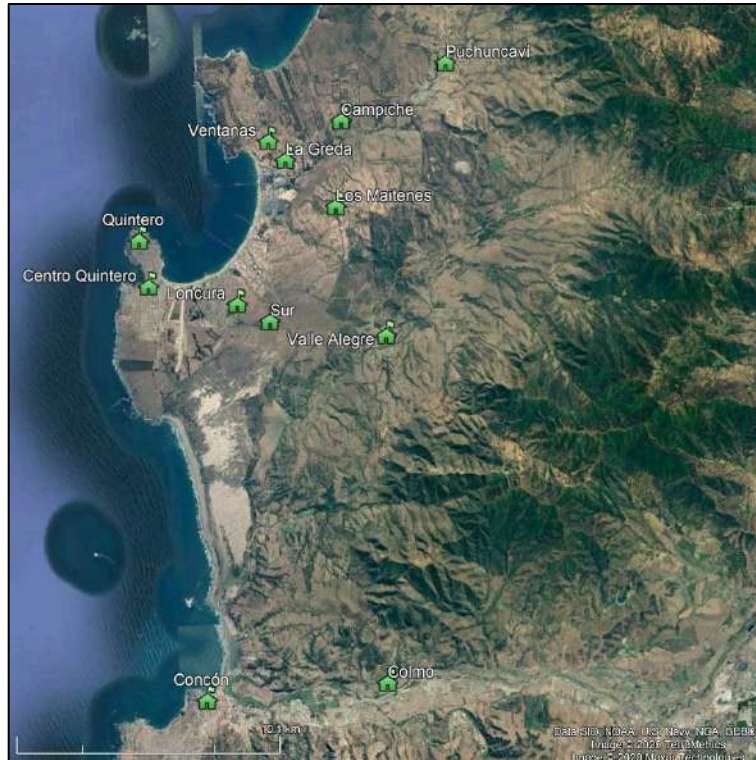


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

2.3.3 Zona 3: Concón - Quintero - Puchuncaví

La ubicación de las estaciones con monitoreo de NO₂ en la zona de Concón, Quintero y Puchuncaví se ilustra en la Figura 2-20:

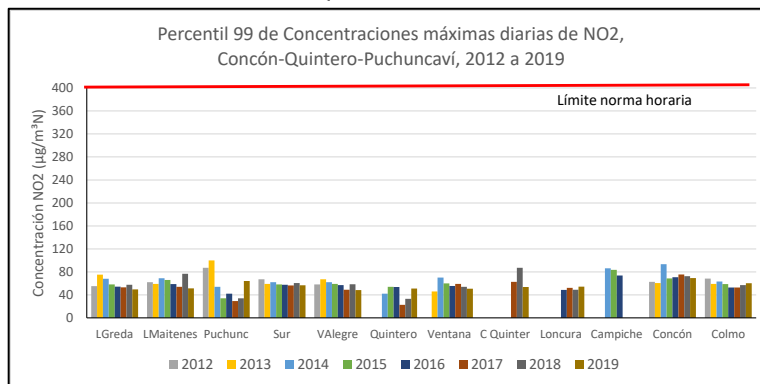
Figura 2-20: Ubicación estaciones con monitoreo de NO₂ en Concón, Quintero y Puchuncaví



Fuente: Elaboración propia en Google Earth con coordenadas disponibles en SINCA

De acuerdo a la Figura 2-21, entre los años 2012 y 2019 el percentil 99 de NO₂ registra valores en el rango 40 a 80 µg/m³N para la mayoría de los años con valores similares entre las estaciones con un leve descenso entre los años 2012-2014 para luego presentar un leve aumento alcanzando en el año 2019 un P99 similar al registrado en el año 2012 en todas las estaciones.

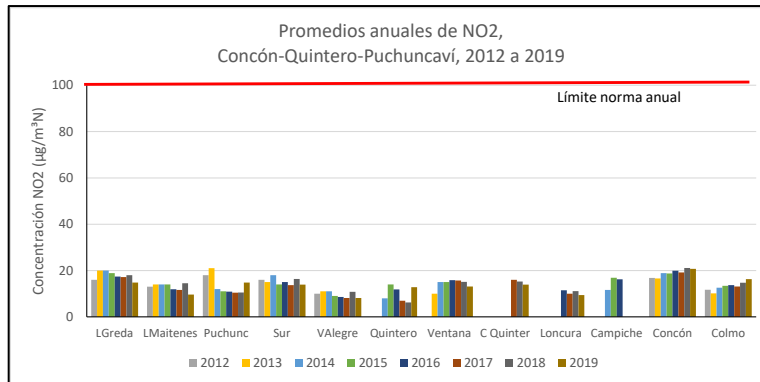
Figura 2-21: Evolución de percentil 99 de concentraciones horarias máximas diarias de NO₂ en Concón-Quintero-Puchuncaví



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

De acuerdo a la Figura 2-22, la evolución de los promedios anuales de NO₂ tiene un comportamiento similar al percentil 99, es decir un leve descenso desde 2012 a 2015 y luego un aumento para alcanzar valores muy parecidos en el año 2019 respecto al año 2012. El rango de concentraciones anuales está entre 10 y 20 µg/m³N siendo menores en Valle Alegre y más altas en Concón y La Greda.

Figura 2-22: Evolución de promedios anuales de NO₂ en Concón-Quintero-Puchuncaví

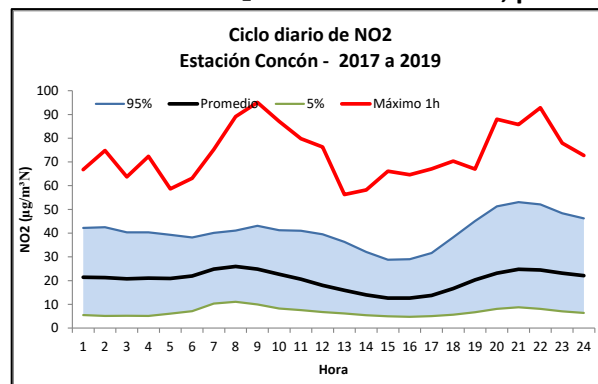


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Para ilustrar el comportamiento de las concentraciones de NO₂ se incluyen Ciclos diarios para una estación representativa de cada comuna, es decir para Concón, Quintero y Puchuncaví. Ciclos diarios para el resto de las estaciones de la Zona de CQP se incluyen en Anexo digital, documento “Calidad de Aire.pdf”.

De acuerdo a la Figura 2-23, el ciclo diario promedio horario de NO₂ tiene forma similar al ciclo del percentil 95% del promedio horario de NO₂ y de los calores máximos, es decir a un aumento de las concentraciones en las mañanas, valores más bajos en las tardes y un aumento desde las 17:00 hasta concentraciones más altas en las noches alrededor de las 21:00. Para el ciclo diario promedio de NO₂ las concentraciones están en el rango de 15 a 30 µg/m³N. Los máximos horarios están en el rango de 55 a 95 µg/m³N.

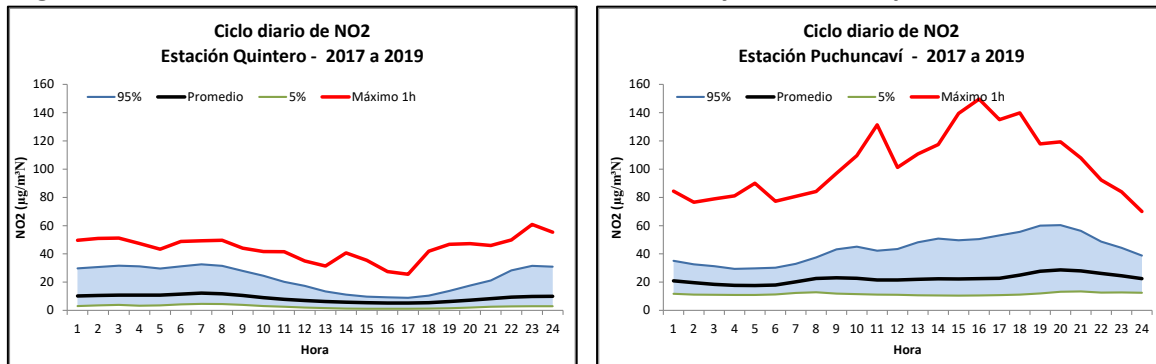
Figura 2-23: Ciclos diarios de NO₂ en estación Concón, período 2017 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

La Figura 2-24 presenta los ciclos diarios de NO₂ para las estaciones Quintero y Puchuncaví. Se observa que la envolvente del P95% y los máximos son más altos en la estación Puchuncaví, la cual presenta un aumento de las concentraciones durante las tardes, desde 14:00 a 19:00, a diferencia de Quintero que tiene valores más altos en noche-madrugada y menores en las tardes. Las máximas horarias en Puchuncaví están entre 75 y 145 µg/m³N, en cambio en Quintero los máximos están en el rango 35 a 65 µg/m³N.

Figura 2-24: Ciclos diarios de NO₂ en estaciones Quintero y Puchuncaví, período 2017 a 2019

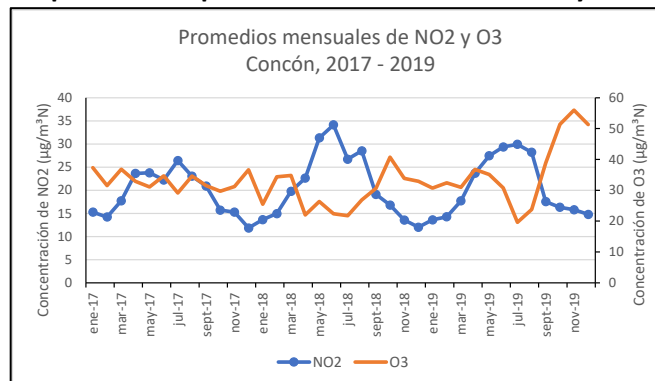


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Análisis estacional mediante Comparación de promedios mensuales de NO₂ v/s O₃

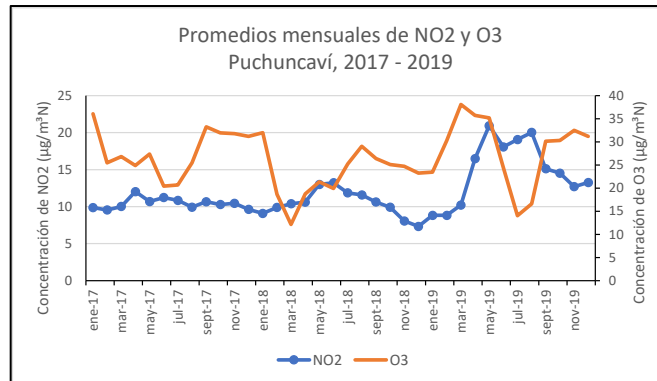
La comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ para las estaciones Concón (ver Figura 2-25), Puchuncaví (ver Figura 2-26) y Quintero (ver Figura 2-27) al igual que para la Zona de Quillota la Calera muestra una relación inversa con aumento de concentraciones de NO₂ en los meses de invierno que coincide con las menores concentraciones de O₃. Las concentraciones más bajas de NO₂ ocurren entre diciembre y enero. En cambio, los promedios mensuales de O₃ son más altos en meses de primavera, entre octubre y noviembre.

Figura 2-25: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Concón



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

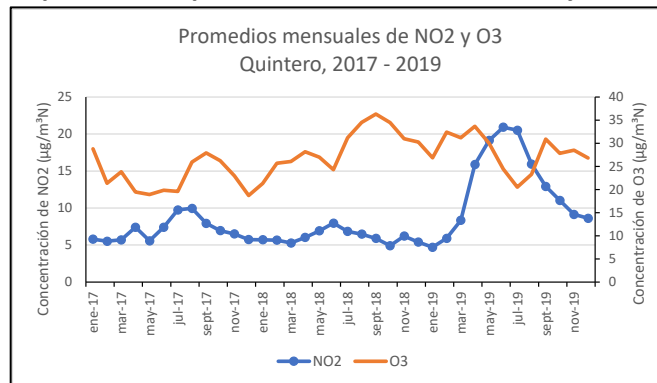
Figura 2-26: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Puchuncaví



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Las estaciones de Puchuncaví y Quintero registran un fuerte aumento en el invierno del año 2019 en comparación a los años anteriores, casi el doble del valor. Esta situación no se presenta en la estación Concón, la cual mantiene valores similares entre los máximos invernales de 2018 y 2019.

Figura 2-27: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Quintero

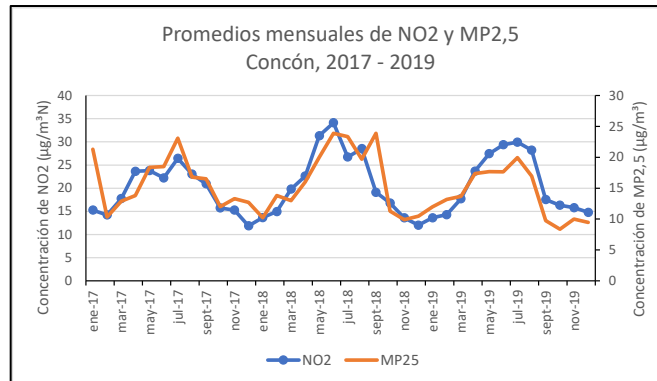


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Análisis estacional mediante Comparación de promedios mensuales de NO₂ v/s MP_{2,5}

Para Concón, de acuerdo a la Figura 2-28, existe una excelente correspondencia entre los promedios mensuales de NO₂ con MP_{2,5}, las curvas son muy similares.

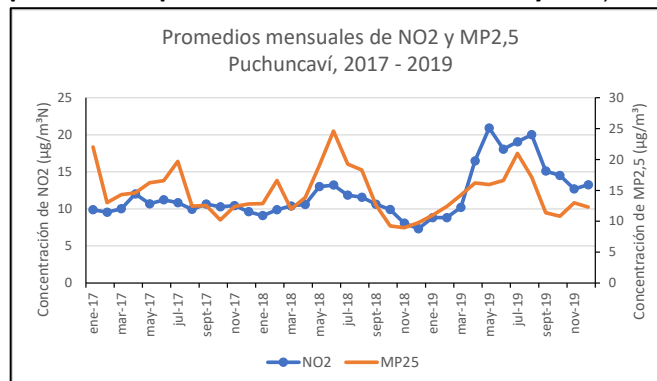
Figura 2-28: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Concón



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

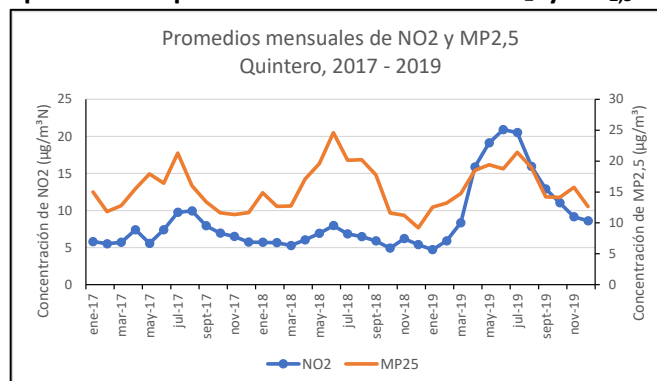
Para Puchuncaví y Quintero, de acuerdo a la Figura 2-29 y a la Figura 2-30 no se presenta una correlación de NO₂ con MP_{2,5} tan cercana como en Concón, pero si tienen el mismo comportamiento estacional. Es decir, el MP_{2,5} registra aumentos en meses de invierno y disminución hasta valores más bajos en verano.

Figura 2-29: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Puchuncaví



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-30: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Quintero

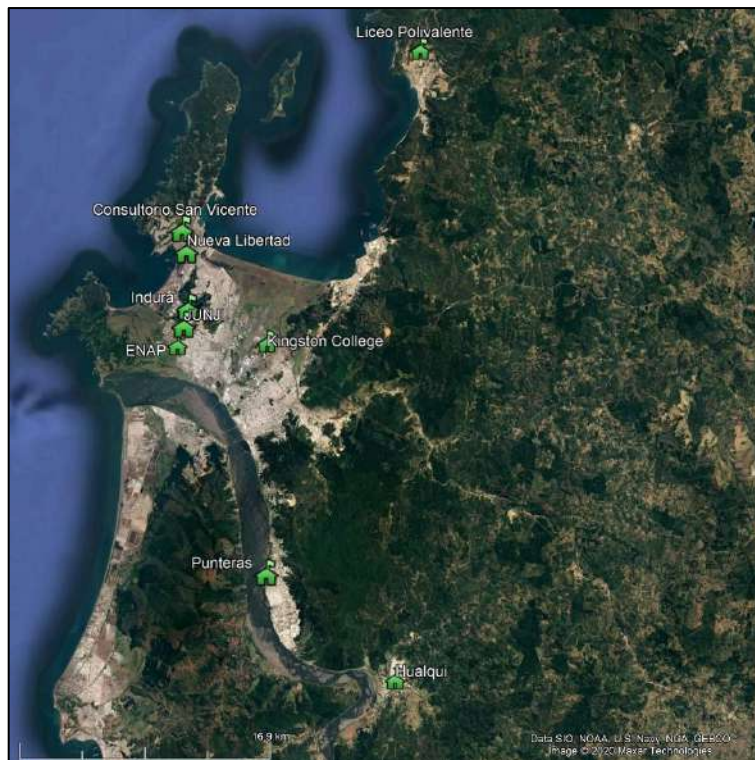


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

2.3.4 Zona 4: Concepción Metropolitan

La Figura 2-31 ilustra la ubicación de las estaciones de monitoreo de NO₂ en el Gran Concepción, en las comunas Talcahuano, Hualpén, Concepción, Chiguayante y Hualqui:

Figura 2-31: Ubicación estaciones con monitoreo de NO₂ en Gran Concepción



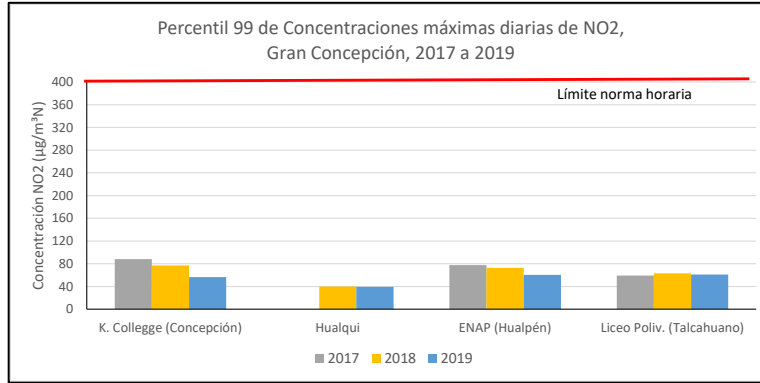
Fuente: Elaboración propia en Google Earth con coordenadas disponibles en SINCA

La información disponible permite elaborar gráficos de percentil 99 y promedios anuales de NO₂ entre los años 2017 y 2019. Se realiza un análisis para estaciones representativas de las Comunas Concepción (Kingston College), Hualpén (ENAP), Talcahuano (Liceo Polivalente) y Hualqui seleccionadas en base a la completitud y calidad de los datos horarios de NO₂ disponibles en SINCA.

De acuerdo a la Figura 2-32, el percentil 99 de NO₂ en las estaciones Kingston College en Concepción y Enap en Hualpén registran una disminución del P99 desde un valor cercano a 80 µg/m³N en 2017 hasta valores cercanos a 60 µg/m³N en el 2019. En cambio, la estación Hualqui mantiene valores cercanos a 40 µg/m³N y la estación Liceo Polivalente de Talcahuano mantiene un P99 cercano a 60 µg/m³N.

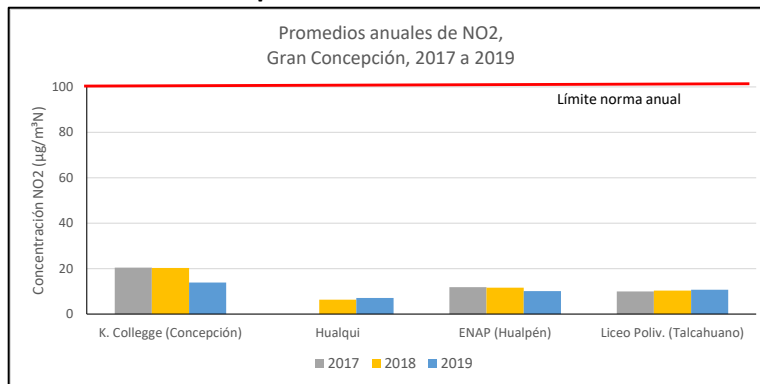
Por otro lado, el promedio anual mantiene valores estables entre los años para Hualqui alrededor de 7 µg/m³N, ENAP y Liceo Polivalente cercanos a 10 µg/m³N. En cambio, Kingston College presenta una disminución de 20 a 13 µg/m³N.

Figura 2-32: Evolución de percentil 99 de concentraciones horarias máximas diarias de NO₂ en Gran Concepción



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Figura 2-33: Evolución de promedios anuales de NO₂ en Gran Concepción



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

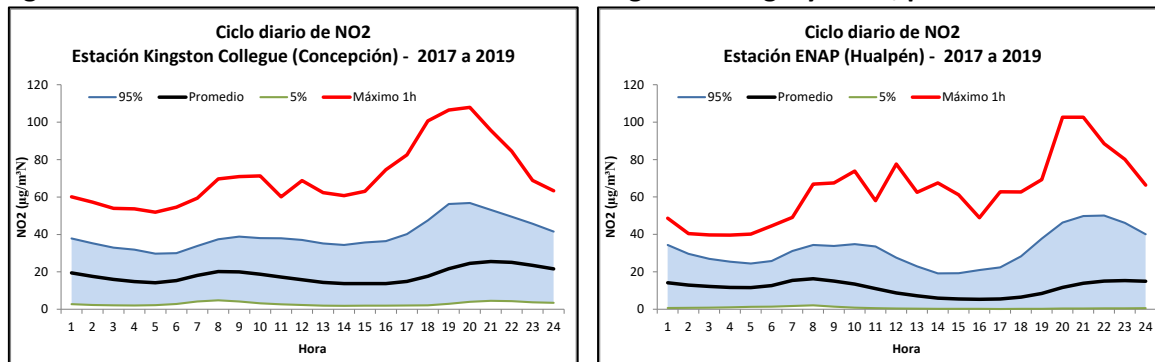
Para ilustrar el comportamiento de las concentraciones de NO₂ se incluyen Ciclos diarios para estaciones representativas de las Comunas Concepción, Hualpén, Talcahuano y Hualqui. Ciclos diarios para el resto de las estaciones del Gran Concepción se incluyen en Anexo digital, documento "Calidad de Aire.pdf".

La Figura 2-34 muestra los ciclos diarios para estaciones Kingston College (KC) de Concepción y ENAP en Hualpén, ubicadas en zonas urbanas con mayor tráfico vehicular lo cual puede explicar las mayores concentraciones respecto al ciclo de las estaciones Talcahuano por la zona norte y Hualqui por la zona sur presentados en la Figura 2-35.

Los ciclos diarios de KC y ENAP son similares en forma y concentraciones, con aumento de valores en las mañanas y noches incluso para las concentraciones máximas horarias, alcanzando 103 µg/m³N en ENAP y 108 µg/m³N en KC alrededor de las 21:00. Para el ciclo del percentil 95% se alcanzan máximos alrededor de las 21:00 de 57 µg/m³N en KC y de 50 µg/m³N en ENAP.

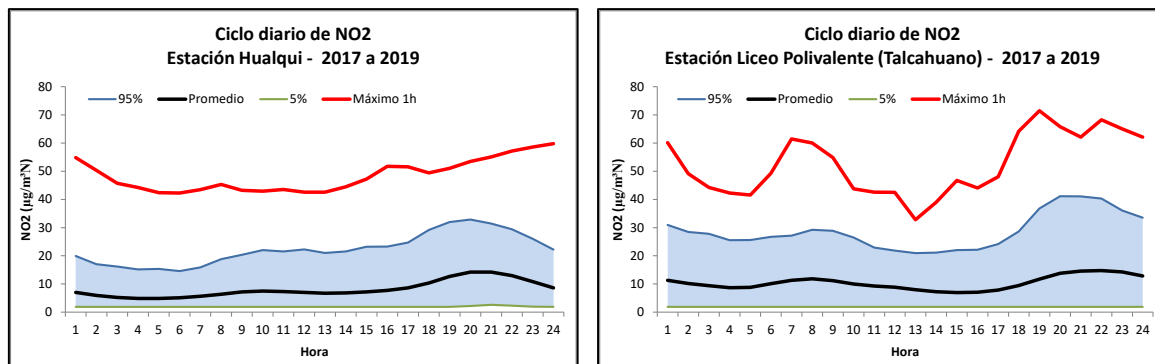
De acuerdo a la Figura 2-35, la estación Hualqui en una zona más suburbana registra menores concentraciones con aumento en las noches alcanzando el ciclo promedio un máximo de 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y un máximo del percentil 95% de 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ alrededor de las 21:00. La estación Liceo Polivalente de Talcahuano tiene ciclos diarios similares a los ciclos de ENAP y KC, pero con menores concentraciones. Para el percentil 95% se alcanza un máximo de 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y para el ciclo promedio se alcanza un máximo de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, ambos valores alrededor de las 21:00, en este horario se registra la máxima concentración horaria de 7,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

Figura 2-34: Ciclos diarios de NO₂ en estaciones Kingston College y ENAP, período 2017 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Figura 2-35: Ciclos diarios de NO₂ en estaciones Hualqui y Liceo Polivalente, período 2017 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

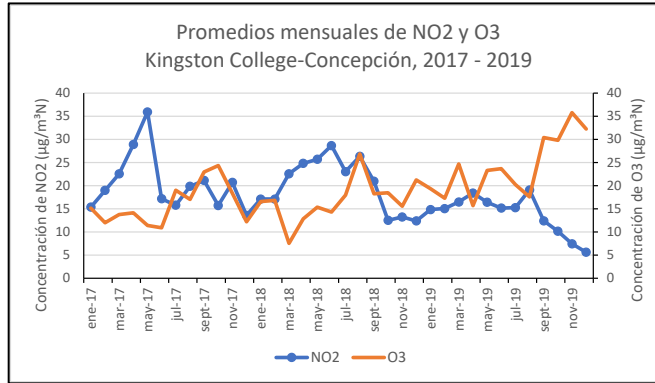
Análisis estacional mediante Comparación de promedios mensuales de NO₂ v/s O₃

Se presenta una comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ para las estaciones Kingston College (ver Figura 2-36), Hualqui (ver Figura 2-37), Enap (ver Figura 2-38) y Liceo Polivalente (ver Figura 2-39)) entre los años 2017 y 2019.

A diferencia de las zonas anteriores no se aprecia una relación tan definida entre los promedios mensuales de NO₂ y O₃. Aunque si se mantiene el comportamiento estacional de NO₂ con mayores concentraciones en los meses de invierno y menores en los meses de verano. De acuerdo a lo

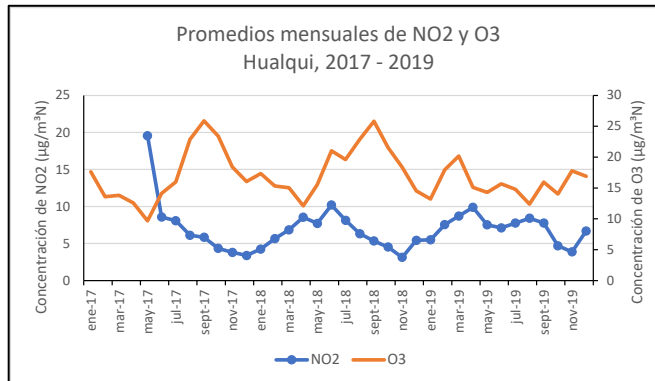
presentado en la Figura 2-38 la estación ENAP es la que presenta un ciclo estacional de NO₂ más marcado y similar entre los años 2017 y 2019.

Figura 2-36: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ Kingston College-Concepción



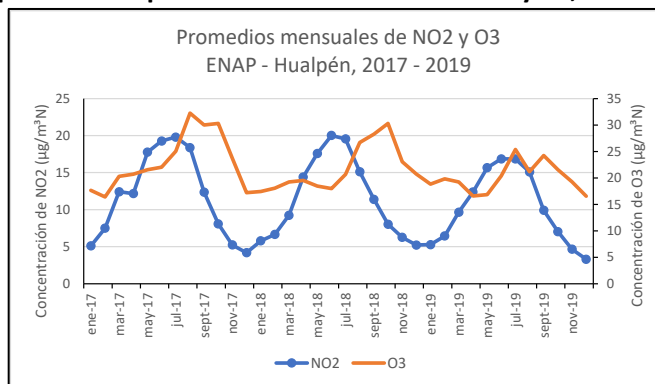
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Figura 2-37: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃, Est. Hualqui



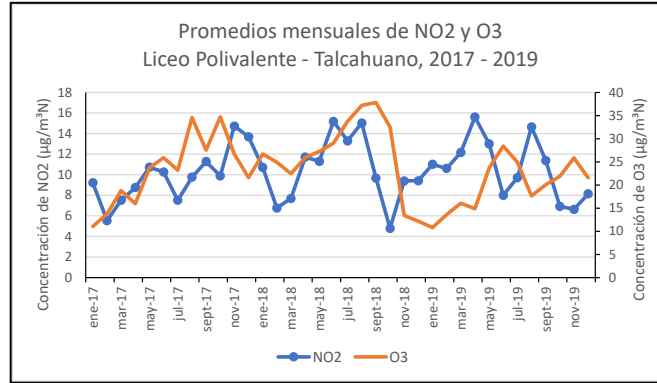
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Figura 2-38: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃, Est. ENAP Price-Hualpén



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Figura 2-39: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃, Est. Liceo Polivalente-Talcahuano



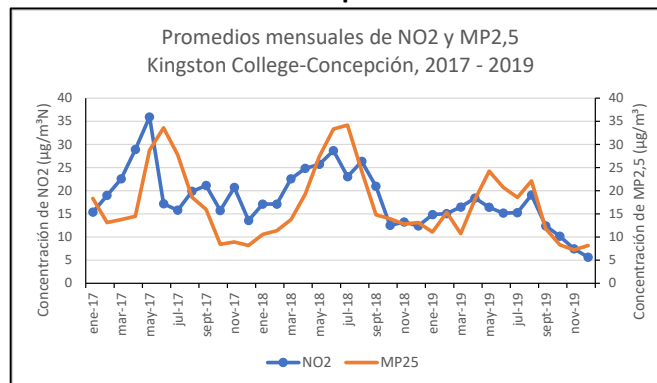
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Análisis estacional mediante Comparación de promedios mensuales de NO₂ v/s MP_{2,5}

Se presenta una comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} para las estaciones Kingston College, Hualqui, Enap y Liceo Polivalente entre 2017 y 2019.

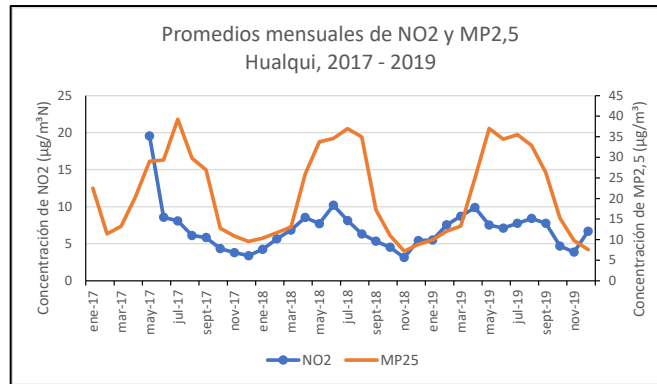
Para las estaciones Kingston College, Hualqui y Enap se aprecia correspondencia entre el comportamiento estacional de NO₂ y MP_{2,5}. De acuerdo a lo presentado en la Figura 2-40, la estación Kingston College es la que tiene mayor similitud entre los promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5}. La estación Hualqui presenta mayor aumento de las concentraciones de MP_{2,5} en los meses de invierno, con máximos similares entre 2017 y 2019. En cambio la estación Enap presenta un mayor aumento de los promedios de NO₂ en relación a MP_{2,5}.

Figura 2-40: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Kingston College-Concepción



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

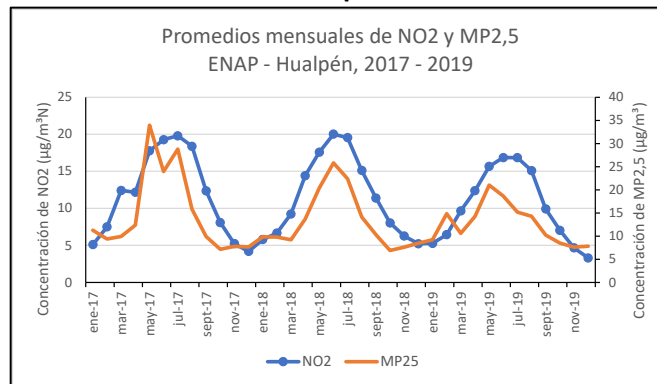
Figura 2-41: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP2,5 estación Hualqui



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

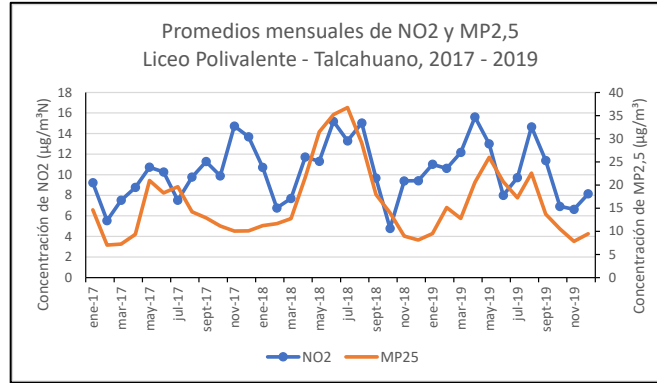
Por otro lado, de acuerdo a la Figura 2-43, la estación Liceo Polivalente registra un comportamiento diferente a las otras estaciones especialmente durante el año 2017 con un aumento de las concentraciones de NO₂ en primavera durante meses de bajas concentraciones de MP_{2,5}. Esta situación no se presenta en el año 2018 con promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} muy similares, pero en el año 2019 hay un aumento mayor de las concentraciones de NO₂ respecto a los promedios de MP_{2,5}.

Figura 2-42: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP2,5 estación ENAP Price-Hualpén



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

Figura 2-43: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP2,5 estación Liceo Polivalente-Talcahuano



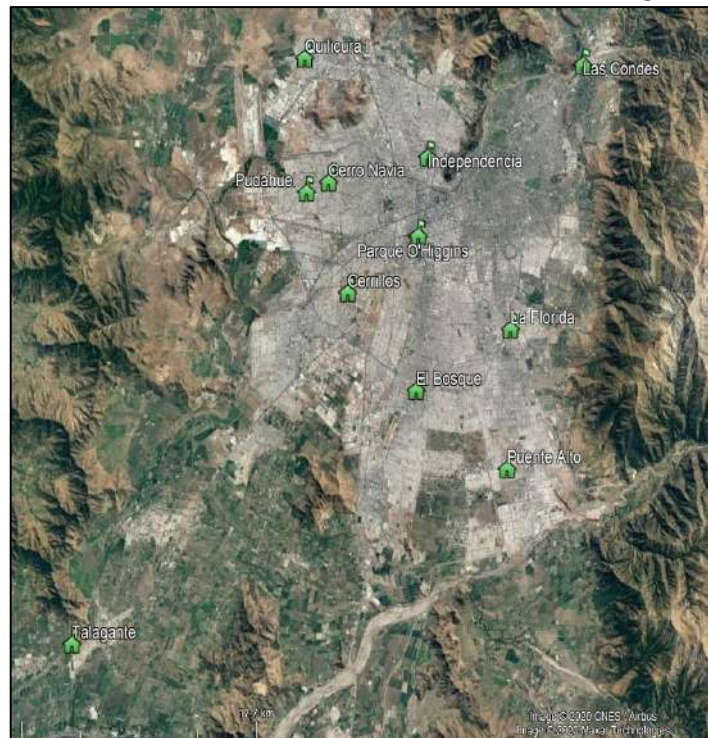
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA

2.3.5 Zona 5: Región Metropolitana

La Región Metropolitana fue declarada Latente por NO₂ en el año 1996 y desde el año 1998 se cuenta con un Plan de Prevención que incluye medidas para disminuir emisiones de NO_x.

La ubicación de las estaciones con monitoreo de NO₂ en la RM se ilustra en la Figura 2-44.

Figura 2-44: Ubicación estaciones con monitoreo de NO₂ en la Región Metropolitana

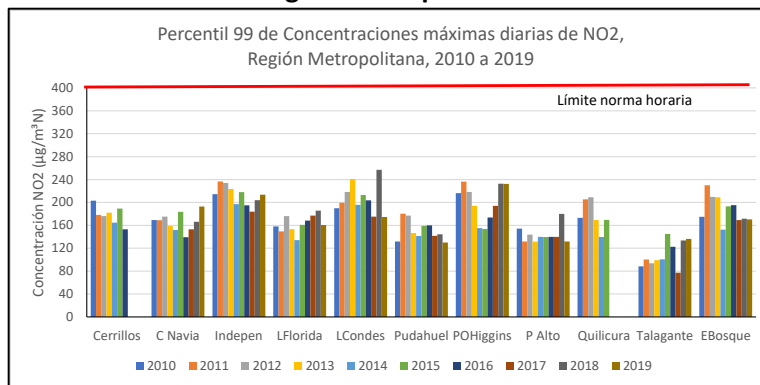


Fuente: Elaboración propia en Google Earth con coordenadas disponibles en SINCA

Las estaciones de monitoreo Independencia, Parque O’Higgins y Las Condes son las más cercanas a calles de alto tránsito vehicular. En cambio, el resto corresponde a estaciones ubicadas en sectores residenciales de las comunas que dan el nombre a la estación, incluso la estación Talagante se podría considerar como una estación suburbana.

De acuerdo a la Figura 2-45, el percentil 99 de NO₂ está en el rango de 150 a 250 µg/m³N excepto en la estación Talagante, la cual tiene menores concentraciones, en el rango de 120 a 160 µg/m³N. Para la mayoría de las estaciones hay un descenso del P99 hasta el año 2015 para luego registrar un aumento alcanzando niveles similares entre los años 2010 y 2019. Situación similar a la ocurrida en la zona de Concón, Quintero y Puchuncaví.

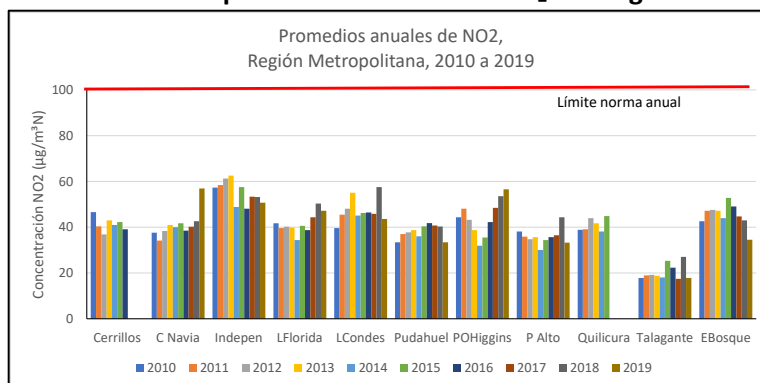
Figura 2-45: Evolución de percentil 99 de concentraciones horarias máximas diarias de NO₂ en Región Metropolitana



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

De acuerdo a la Figura 2-46, los promedios anuales de NO₂ tienen un comportamiento similar al P99, excepto las estaciones Cerro Navia, Parque O’Higgins y La Florida que presentan aumentos de los promedios anuales más marcados en comparación a los valores de 2010. El rango de promedios anuales es entre 30 y 60 µg/m³N, siendo más alto en Parque O’Higgins y menores en Talagante con promedios cercanos a 20 µg/m³N.

Figura 2-46: Evolución de promedios anuales de NO₂ en Región Metropolitana

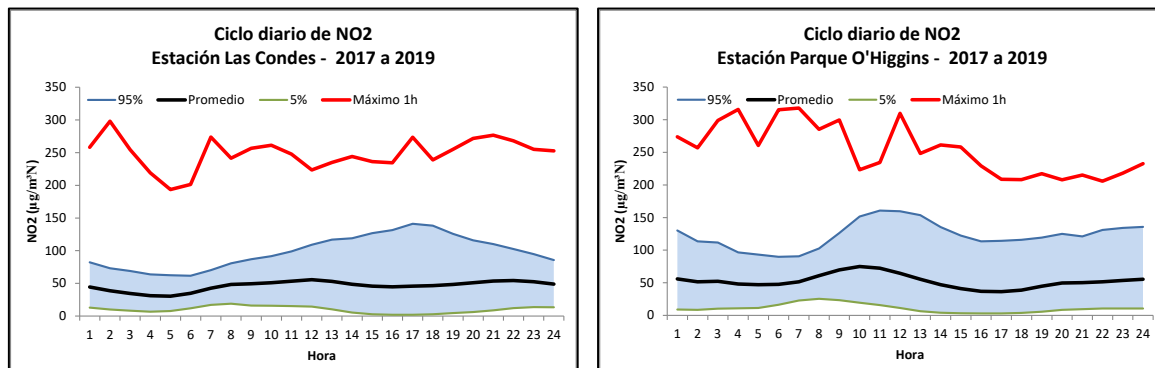


Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Para ilustrar el comportamiento de las concentraciones de NO₂ se incluyen Ciclos diarios para estaciones representativas de sectores de alto tráfico vehicular (Parque O'Higgins), donde se registran las mayores concentraciones de MP_{2,5} (Pudahuel), donde se registran mayores concentraciones de O₃ (Las Condes) y una de sector residencial con altas concentraciones de NO₂ (El Bosque). Ciclos diarios para el resto de las estaciones de la Región Metropolitana se incluyen en Anexo digital, documento "Calidad de Aire.pdf".

La Figura 2-47 presenta ciclos diarios para las estaciones Las Condes (LC) y Parque O'Higgins(PO). Se aprecian concentraciones de NO₂ en rangos similares, aunque un más altos en PO que tiene un ciclo diario promedio con mayores valores en las mañanas, cercanos a 75µg/m³N, entre 09:00 y 10:00 asociado principalmente al tráfico vehicular, pero el percentil 95% tiene un máximo cercano a 160µg/m³N desfasado hacia el mediodía, las concentraciones máximas horarias se registran en la madrugada por sobre 300µg/m³N. En la estación Las Condes, hay un ciclo promedio relativamente plano con valores cercano a 50µg/m³N, menores en la madrugada y leve aumento en mañanas y noches. En el ciclo del percentil 95% se aprecia con mayor claridad que las concentraciones más altas ocurren al finalizar la tarde, hasta 140µg/m³N, probablemente por aumento del tráfico vehicular en esa zona y transporte de contaminantes de oriente a poniente.

Figura 2-47: Ciclos diarios de NO₂ en estaciones Las Condes y Parque O'Higgins, período 2017 a 2019



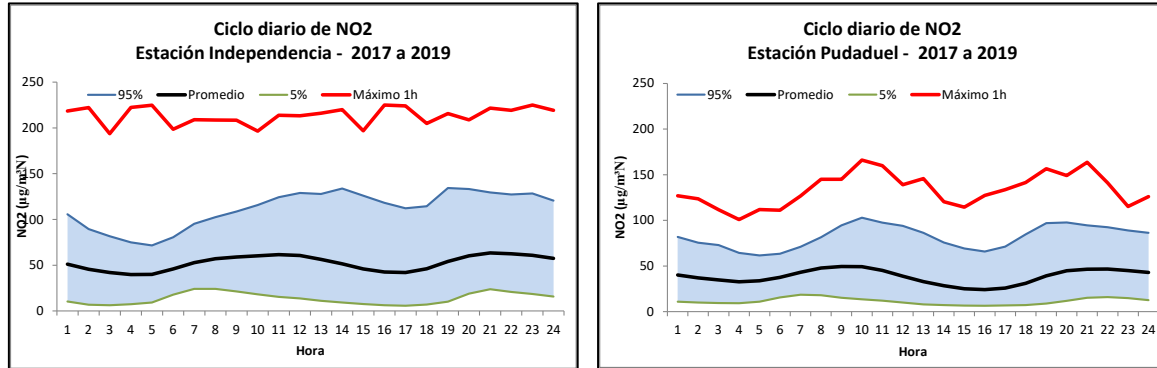
Fuente: Elaboración propia con datos de MMA, SINCA y SNIFA

La Figura 2-48 presenta ciclos diarios para las estaciones Independencia y Pudahuel. Se aprecian ciclos diarios promedios y de percentil 95% similares con aumentos en mañanas y noches, pero con mayores concentraciones de NO₂ en la estación Independencia, la cual tiene valores máximos de percentil 99% cercanos a 130 µg/m³N a mediodía y máximos horarios cercanos a 220 µg/m³N más altos que en Pudahuel donde se registran máximos de percentil 99% cercanos a 100µg/m³N a las 10:00 y máximos horarios cercanos a 160µg/m³N. Es probable registro de mayores concentraciones en Independencia por su cercanía a zonas de alto tráfico vehicular a diferencia de Pudahuel en zona más residencial.

La Figura 2-49 muestra los ciclos diarios para la estación El Bosque, similares a los registrados en la estación Pudahuel, pero con valores más cercanos a los registrados en Independencia. El ciclo diario promedio con mayores valores en las mañanas, cercanos a 55µg/m³N, entre 09:00 y 10:00 asociado principalmente al tráfico vehicular, con percentil 95% máximo cercano a 120µg/m³N alrededor de

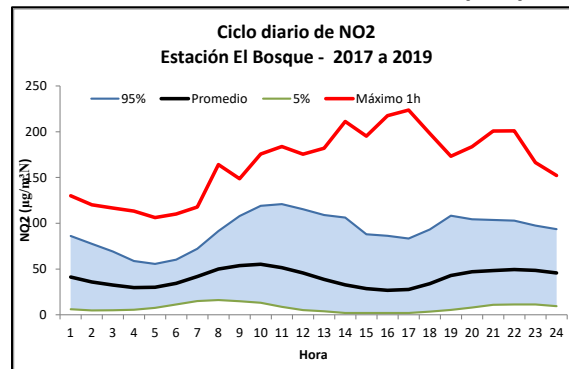
las 11:00. Las concentraciones máximas horarias se registran en las tardes, entre 14:00 y 17:00 con valores por sobre 200µg/m³N.

Figura 2-48: Ciclos diarios de NO₂ en estaciones Independencia y Pudahuel, período 2017 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA, SINCA y SNIFA

Figura 2-49: Ciclos diarios de NO₂ en estación El Bosque, período 2017 a 2019



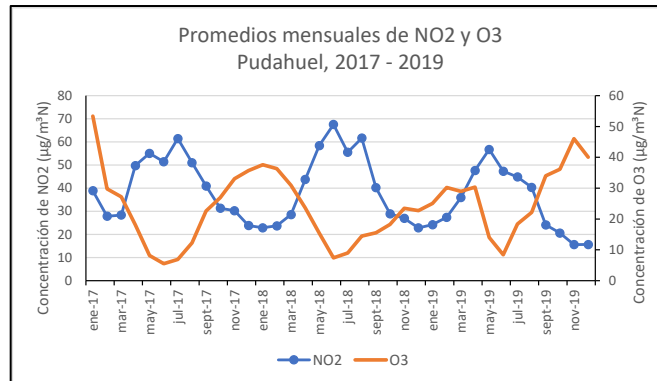
Fuente: Elaboración propia con datos de MMA, SINCA y SNIFA

Análisis estacional mediante Comparación de promedios mensuales de NO₂ v/s O₃

Se presenta una comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ para las estaciones Pudahuel (ver Figura 2-50), Parque O'Higgins (ver Figura 2-51), Las Condes (ver Figura 2-52), Independencia (ver Figura 2-53), y El Bosque (ver Figura 2-54) entre 2017 y 2019.

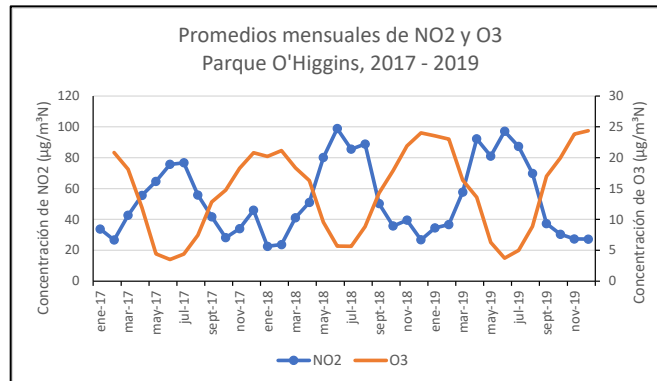
En las estaciones hay comportamiento estacional muy marcado y una relación inversa entre NO₂ y O₃. Al igual que en las zonas anteriores, las mayores concentraciones mensuales de NO₂ ocurren en meses de invierno y las menores en meses de verano (diciembre-enero), a diferencia de las concentraciones de O₃ con mayores niveles en meses de Verano y menores en invierno.

Figura 2-50: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Pudahuel



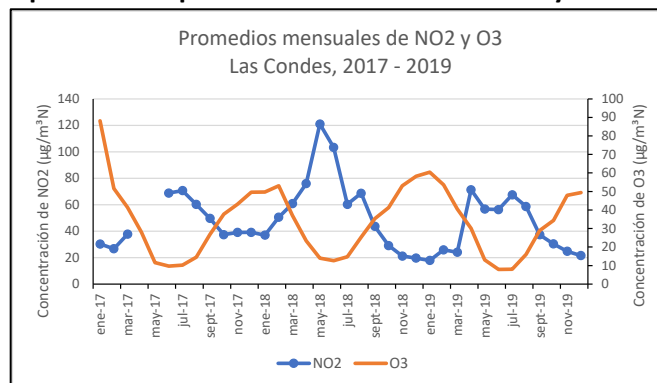
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-51: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Parque O'Higgins



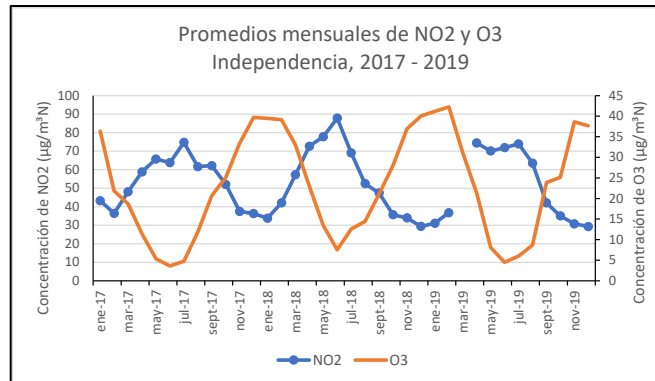
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-52: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Las Condes



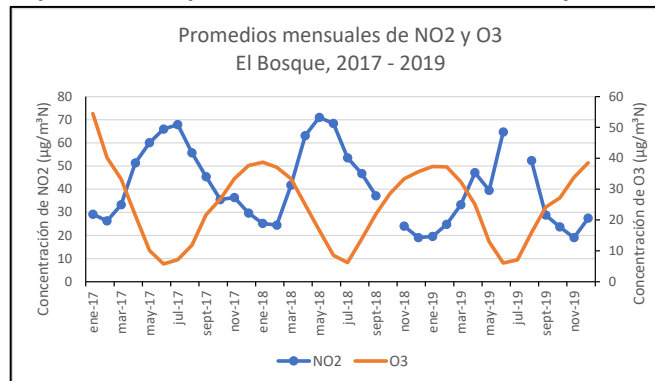
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-53: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación Independencia



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-54: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y O₃ estación El Bosque



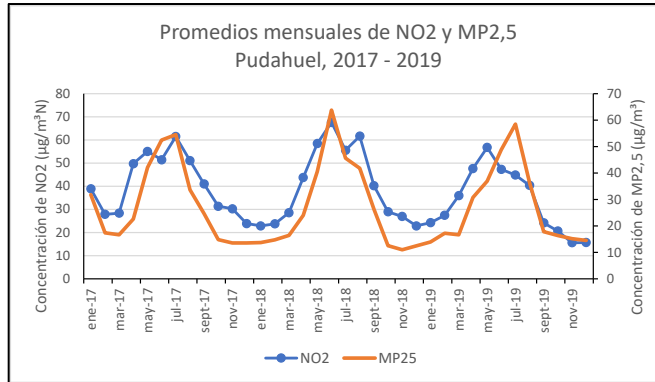
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Análisis estacional mediante Comparación de promedios mensuales de NO₂ v/s MP_{2,5}

Se presenta una comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} para las estaciones Pudahuel, Las Condes, Independencia, Parque O'Higgins y El Bosque entre 2017 y 2019.

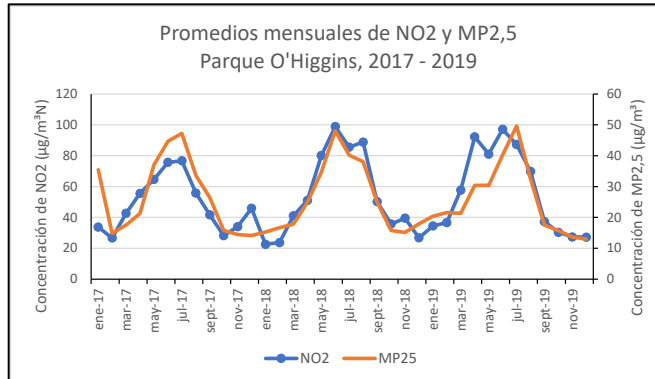
De acuerdo a lo presentado entre la Figura 2-55 y la Figura 2-59, en las estaciones existe una excelente correspondencia entre los promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} con un comportamiento muy parecido en todos los meses, reflejando a la perfección los cambios en las concentraciones.

Figura 2-55: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Pudahuel



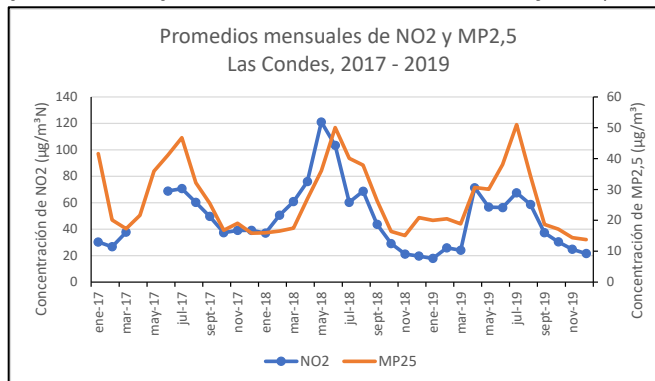
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-56: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Parque O'Higgins



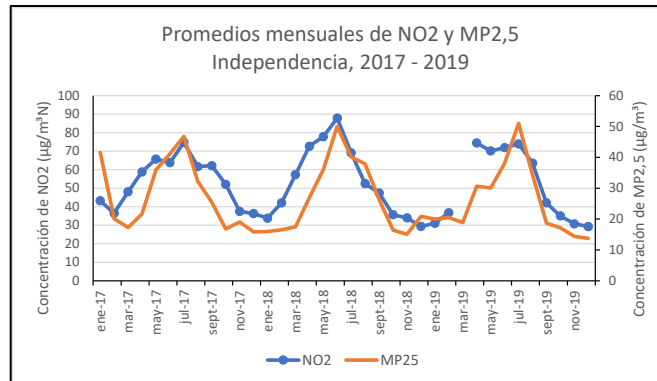
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-57: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Las Condes



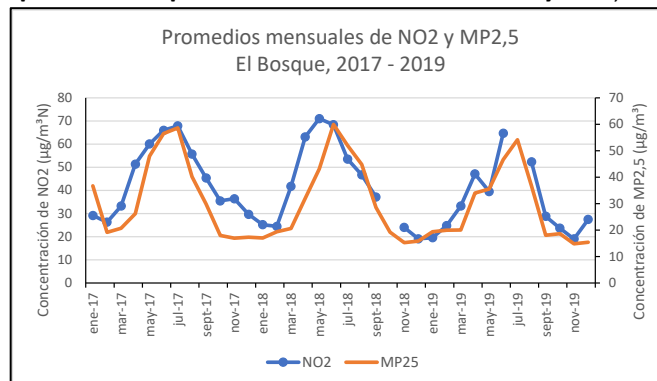
Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-58: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación Independencia



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

Figura 2-59: Comparación de promedios mensuales de NO₂ y MP_{2,5} estación El Bosque



Fuente: Elaboración propia con datos de SINCA, SNIFA y SEA

2.4 Síntesis análisis general de calidad de aire

Los contaminantes NO₂, O₃ y MP_{2,5} están íntimamente vinculados por las reacciones químicas en las que participan conjuntamente en la atmósfera. La calidad del aire es finalmente el resultado del conjunto de emisiones, las transformaciones que ocurren en la atmósfera y el transporte de estos contaminantes en las masas de aire, a su vez vinculado a las características geográficas de cada lugar.

En general, se observan niveles mayores de NO₂ ambiental en ciudades grandes con emisiones importantes asociadas a la actividad de transporte con motores de combustión, como es evidente para las comunas de Santiago en la Región Metropolitana y en menor medida para otras urbes de la zona centro sur del país. Y también, pero menores, en núcleos urbanos con presencia de fuentes industriales significativas de NO_x, como termoeléctricas y cementeras.

En el caso del O₃, nuevamente los niveles de preocupación se encuentran en las comunas urbanas de la zona centro sur del país, y particularmente en las localizadas al “interior”, donde se presentan todos los componentes favorables para la formación de O₃ a partir de los precursores y las

condiciones de radiación y ventilación que determinan la residencia de las masas de aire en las cuencas. En el contexto nacional, destacan las comunas de las zonas seleccionadas para este estudio, Calama, la RM, y el interior de Valparaíso.

En el caso del MP_{2,5}, que en parte es emitido directamente por las fuentes y secundariamente se forma en la atmósfera, los niveles más preocupantes se presentan en la zona centro y sur del país, en el sur asociado fundamentalmente a la combustión de leña, y como se aprecia en la RM directamente vinculado a la presencia de NO₂.

En los ciclos anuales de promedios mensuales se observan con claridad las relaciones entre NO₂ y O₃ y entre NO₂ y MP_{2,5}. En el caso de Calama, es posible señalar algunas condiciones particulares que podrían explicar la diferencia en los patrones de los ciclos respecto a los observados en las otras zonas de estudio. La primera es que la estación que mide las concentraciones ambientales se encuentra ubicada al centro de la ciudad, y por ello no refleje niveles mayores de ozono (en detrimento del NO₂) que generalmente se forma aguas abajo de las fuentes, como es el caso de la mayor parte de las estaciones en otras zonas del país. Otra condición particular es la menor disponibilidad de COVs, dada la casi ausencia de vegetación en el entorno (con excepción de la pequeña cuenca del río Loa), esta diferencia condiciona la dinámica de formación de la contaminación fotoquímica. Por otra parte, el ciclo anual del NO₂ es consistente con los ciclos de las otras zonas registrando aumentos en los meses de otoño-invierno. En el caso de MP_{2,5} hay diferencias en las emisiones respecto a las ciudades de la zona Centro Sur, donde aumentan las emisiones y concentraciones de MP_{2,5} por los inviernos más fríos dado el consumo de leña y otros combustibles para calefacción y uso doméstico. Además, los niveles MP_{2,5} son bajos en Calama y el aerosol secundario asociado a la fundición de Chuquicamata, es decir sulfatos (SO₄), pueden tener un rol más importante que los aerosoles asociados a nitratos. Se requiere de mayores estudios y análisis para profundizar en estas hipótesis.

En términos de tendencias de promedios anuales, en Calama han caído leve, pero sistemáticamente en los últimos años. En las estaciones de Quillota y Calera, estos indicadores han fluctuado, pero se observa un aumento en todas las estaciones en el 2018. Algo similar, también se observa en las comunas de CQP, donde las estaciones de Puchuncaví y Colmo, tienden a aumentar en 2018 y 2019. En las estaciones del Gran Concepción, K. College y Enap Hualpén, se observa una disminución sostenida desde 2017, y en Hualqui y Talcahuano un leve aumento, pero en valores muy bajos en torno a 5 y 10 µg/m³N.

En la Región Metropolitana, se dan situaciones particulares, donde la estación P O'Higgins, La Florida, Cerro Navia tienen niveles sostenidamente crecientes desde 2014, mientras que Las Condes (salvo el año 2016), Independencia y El Bosque están disminuyendo. También hay fluctuaciones.

En todo caso, como ya se anticipó, la RM es la zona que podría presentar condiciones de latencia o saturación ante una norma de NO₂ más cercana a las directrices de la OMS.

2.5 Tecnologías de medición de NO₂

El Artículo 8 de la norma primaria para NO₂ establece que la medición de la concentración de dióxido de nitrógeno en el aire se realizará mediante uno cualesquiera de los siguientes métodos de medición:

- Quimiluminiscencia;
- Los que se basen en el método modificado de Griess-Saltzman;
- Espectrometría de absorción óptica diferencial, con calibración in-situ, y
- Un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea.

Una breve explicación de cada uno de los métodos se entrega a continuación:

2.5.1 Quimiluminiscencia:

Este método se basa en la reacción de quimiluminiscencia en fase gaseosa de NO con O₃, que produce NO₂ estimulado emitiendo luz (quimiluminiscencia) a una longitud de onda de aproximadamente 1200 nm. La reacción quimiluminiscente es: $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2^* + \text{O}_2$. La luz o energía emitida por el NO₂ excitado se convierte en un voltaje de salida mediante un tubo fotomultiplicador y un amplificador.

Los monitores que utilizan el método de quimiluminiscencia miden las concentraciones de NO₂ en forma indirecta mediante la diferencia entre las concentraciones de NO_x (que corresponde a NO + NO₂) y NO, las cuales son determinadas por separado o en 2 ciclos. En el ciclo de determinación de NO_x la muestra de aire pasa por un horno a 400° C que reduce el NO₂ a NO, luego al entrar a la cámara de reacción en presencia de O₃ se obtiene una señal de voltaje que es proporcional a la concentración de NO_x. En el ciclo de NO la muestra de aire pasa directo a la cámara de reacción la cual en presencia de O₃ entrega una señal de voltaje proporcional a la concentración de NO. Finalmente, la concentración de NO₂ se determina como la diferencia entre las dos señales. Un mayor detalle del método se explica en la norma ISO-7996:1985.

2.5.2 Método modificado de Griess-Saltzman:

Este método (ver ISO 6768:1985) determina la masa de NO₂ por análisis espectrofotométrico desde una muestra o solución previamente tratada con ácido sulfanílico para formar sal de diazonio. Esta solución se mezcla, durante un período de tiempo de al menos 15 minutos, con N-(1-naftil) Etilendiamina Diclorhidrato para formar un compuesto azoico de color rosa. La absorbancia de la muestra se determina con una longitud de onda entre 540 y 550 nm. Posteriormente, la absorbancia se compara con una recta de calibración para determinar la masa y concentración de NO₂. Este método se utiliza principalmente para mediciones discretas o muestreos en zonas rurales siendo implementado en monitores automáticos en Japón en los años 80s, pero fueron discontinuados por el uso masivo de monitores que utilizan el método de Quimiluminiscencia.

2.5.3 Método DOAS (Espectroscopía de absorción óptica diferencial):

Este método corresponde a una medición óptica de trayectoria abierta aplicable a varios gases, incluido el NO₂, que absorbe luz en las regiones espectrales UV y visible (Platt y Perner, 1983). La técnica se basa en la absorción diferencial, es decir, la diferencia entre máximos y mínimos locales en el espectro de absorción del gas a determinar. Equipos basados en método DOAS están conformados por un emisor de un haz de luz, un retroreflector, una fuente de alto voltaje, un espectrómetro y un sistema de adquisición de datos. Para la operación se requiere que el emisor y el reflector se encuentre perfectamente alineados y enfocados. El rango de absorción de la longitud de onda varía entre 2000 Å y 6500 Å. Para el cálculo de la concentración de NO₂ en la atmósfera se utiliza la teoría Beer-Lambert, esta concentración de NO₂ corresponde a un valor promedio para la trayectoria del haz de luz (distancia entre emisor y reflector).

2.5.4 Instrumentación de tecnologías de medición de NO₂

La norma primaria de NO₂ establece además, que el monitoreo de calidad de aire deberá realizarse con instrumentos que cumplan con los métodos de medición señalados en el Artículo 8 y que hayan sido reconocidos, aprobados o certificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea. Esta consideración, también fue incluida en el Reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos (D.S. N°61/2008 de MINSAL), en su Artículo 5º. Que estableció como tercera alternativa el uso de instrumentos que tengan certificación de que dan cumplimiento a los estándares de calidad exigidos en el país de origen entregada por algún ente acreditado por el gobierno de ese país.

Por otro lado, el Artículo 9 de la Norma Primaria también estableció que para realizar un diagnóstico de la calidad de aire para NO₂ dentro del plazo de tres años luego de promulgar la Norma se podían utilizar técnicas de medición alternativas a los métodos de referencia, pero debían ser aprobadas por el Servicio de Salud respectivo. Al respecto, en esos años se utilizaron técnicas de medición con tubos pasivos para identificar zonas con mayores niveles en los cuales posteriormente se instalaron estaciones de monitoreo continuo de calidad de aire.

En el año 2015, La “Guía para la descripción de la calidad del aire en el área de influencia de proyectos que ingresan al SEIA” estableció que además de los equipos que cumplen las exigencias de la Norma Primaria de NO₂ y del D.S. N°61/2008 *“también se pueden utilizar otros métodos/equipos siempre y cuando cuenten con literatura apropiada. Ello, sin perjuicio de lo dispuesto en las normas ambientales de calidad de aire, nacionales o de los países que señala el Reglamento del SEIA, en el caso de existir. En todo caso, la autoridad ambiental deberá establecer durante el proceso de evaluación la idoneidad del instrumento de medición utilizado.”*

En resumen, el monitoreo de calidad de aire en Chile para NO₂ tanto para evaluación de normas en las redes de vigilancia, como para levantamiento de Líneas Bases en los Estudios de Evaluación Ambiental de los Proyectos se ha realizado con analizadores continuos que utilizan el método de referencia de Quimiluminiscencia establecido por USEPA y CEE (ver Tabla 2-5).

Tabla 2-5 Referencia para medición de NO₂ por Quimiluminiscencia

Método	Referencias normativas		
	Europa	US EPA	Australia/NZ
Quimiluminiscencia	EN 14211:2013	40CFR 50 Apend F	AS 3580.5.1-2011

De acuerdo a experiencia del consultor y a documentación de fiscalización de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), se ha constatado el uso generalizado en Chile de equipos aprobados por la USEPA, o la CEE o por la Agencia Ambiental de Japón, particularmente equipos de marcas Horiba, Quimoto. Este tipo de equipos son usados en la gran mayoría de las redes de monitoreo de calidad de aire a nivel mundial.

Al respecto, USEPA actualiza periódicamente un listado de equipos que cumplen el método de referencia o equivalencia para la medición de NO₂, denominado “ *List of Designated Reference and Equivalent Methods (PDF)*⁵”. Para obtener la aprobación de USEPA, los monitores deben cumplir los criterios de desempeño detallados en la Tabla 2-6:

Tabla 2-6 Límites de desempeño para equipos de monitoreo de gases

Parámetro de desempeño	Unidades	NO ₂ (rango Std.)	Definiciones y test de procedimientos
1. Rango	ppm	0-0.5	Sec. 53.23(a)
2. Ruido	ppm	0.005	Sec. 53.23(b)
3. Menor límite detectable	ppm	0.010	Sec. 53.23(c)
4. Equivalente de interferencia			
Cada interferente	ppm	±0.02	Sec. 53.23(d)
Total, todos	ppm	0.04	Sec. 53.23(d)
5. Corrimiento Cero, 12 y 24 horas	ppm	±0.02	Sec. 53.23(e)
6. Corrimiento Span 24 h			
20% rango	%	±20.0	Sec. 53.23(e)
80% rango	%	±5.0	Sec. 53.23(e)
7. Tiempo retardo	min	20	Sec. 53.23(e)
8. Tiempo aumento	min	15	Sec. 53.23(e)
9. Tiempo caída	min	15	Sec. 53.23(e)
10. Precisión			
20% rango superior	% ¹	4	Sec. 53.23(e)
80% rango superior	% ¹	6	Sec. 53.23(e)

¹ Desviación estándar expresada como porcentaje del límite del rango superior

Fuente: Table B-1 to Subpart B of Part 53—Performance Limit Specifications for Automated Methods. <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?gp=&SID=5878bcb671215c75086813ba0929b624&mc=true&n=sp40.6.53.b&r=SUBPART&ty=HTML>





En los últimos años, también se ha incrementado la recomendación de la medición directa de NO₂ mediante el método CAPS (Cavity Attenuated Phase Shift) como alternativa a la tradicional Quimiluminiscencia, que determinan el NO₂ en forma indirecta mediante la diferencia entre NO y NO_x. Los equipos CAPS tienen un costo o precio mayor a los equipos por Quimiluminiscencia, pero permiten límites de detección menores, junto con mejor resolución y precisión. USEPA y CEE los ha aprobado como equipos con método **Equivalentes** adecuados para evaluar normas de calidad de

⁵ Disponible en : <https://www.epa.gov/amtic/air-monitoring-methods-criteria-pollutants>

aire por NO₂, en cambio, los basados en Quimiluminiscencia son aprobados como equipos con método de **Referencia**.

La Tabla 2-7 presenta una comparación de equipos de monitoreo o analizadores de NO₂ basados en los métodos de referencia establecidos en la actual norma primaria de NO₂:

Tabla 2-7 Comparación de metodologías de medición de NO₂

Equipo/metodología	Ventajas	Desventajas
Analizador por quimiluminiscencia 	Datos continuos en tiempo real. Promedios de minutos, horas. Método de referencia. Las lecturas se comparan directamente con los objetivos y límites de calidad. Método de referencia. Está incluido en la mayoría de las redes de vigilancia de calidad de aire y evaluación de normas	Altos costos de capital y operativos. Requiere energía, ser instalado en una estación de monitoreo. Seguridad en el sitio de instalación. Costo US\$12000 – US\$15000
Analizador por método CAPS 	Además de las ventajas para un analizador por quimiluminiscencia permite medición directa de NO ₂ y con mayor precisión. Es más eficiente ya que no cuenta con convertidor de molibdeno tampoco utiliza generador de O ₃ . Método de equivalencia, aprobado por USEPA y CEE. Si baja de precio será el analizador de NO ₂ más usado en las redes de monitoreo en el futuro.	Tiene un costo mayor a un monitor por quimiluminiscencia. Equipos relativamente nuevos en las redes de monitoreo pueden generar problemas de stock de repuestos. Costo US\$17000 – US\$20000
Analizador DOAS 	Datos continuos en tiempo real. Proporciona una lectura "promedio" para varios contaminantes. No requiere cabezal. Baja mantención. Son más adecuados para medición en túneles o para detectar emisiones	No es considerado para evaluación de normas de calidad de aire por USEPA y CEE ya que no permite determinar concentraciones en un punto específico. Precio elevado, puede superar US\$100000. No se implementa fácilmente. Problemas de desalineamiento. Difícil calibración. La niebla, humedad, lluvia o la nieve pueden afectar el rendimiento.
Analizador por método modificado de Griess-Saltzman  DKK GPH-104	Se utilizó principalmente en Japón entre los años 80s y 90s. Mediciones más precisas, especialmente para bajas concentraciones, no presenta corrimientos de cero o span.	Equipo discontinuado, no cuenta con soporte del proveedor ni venta de repuestos. No se recomienda su uso actualmente

Fuente: Elaboración propia

2.5.5 Criterios de instalación

Otro tema importante a considerar, además de la selección del equipo de medición de NO₂ es la definición de lugar de instalación de la estación de monitoreo de calidad de aire y de ubicación de tomamuestra para tener valores o concentraciones de NO₂ confiables y representativos.

En Chile no se han establecido criterios específicos para monitores de gases, a diferencia de los criterios establecidos en Resoluciones de la SMA para la representatividad poblacional de estaciones que miden MP_{2,5} (Res. N°106/2015) y MP₁₀ (Res. N°744/2017). La operación, mantención, calibración y procesamiento de datos está establecido en el D.S. N°61/2008 de MINSAL.

Considerando el juicio experto del consultor junto a los lineamientos de USEPA⁶, las directivas de Europa⁷ y las guías de Australia y Nueva Zelanda⁸ para la instalación de equipos de monitoreo, se recomienda considerar los siguientes criterios para ubicación de estaciones y tomamuestras para monitoreo de NO₂:

a) Criterios para instalación horizontal y vertical de la entrada del tomamuestras

- Instalar entre 2 y 15 metros sobre el nivel del suelo y a 1 m respecto al techo de la estación.
- A una distancia mayor o igual a 1 m tanto vertical como horizontalmente alejada de cualquier estructura de soporte, paredes, barandas, áticos, etc. Si la entrada del tomamuestra se encuentra cerca del lado de un edificio o pared, debe ubicarse enfrentando a la dirección del viento predominante.
- A una distancia mayor o igual a 2m de muestreadores de MP10 de alto volumen y a 1m de cabezales o muestreadores de bajo volumen de MP10 o MP2,5.

b) Distancia a fuentes menores

- Instalar la entrada del tomamuestras al menos a 50 m de distancia respecto a fuentes menores emisoras de NO_x.

c) Distancia a obstrucciones

- La distancia desde el obstáculo hasta la entrada del tomamuestras deber ser mayor al doble de la altura que el obstáculo sobresale por encima de la entrada del tomamuestras. Se puede hacer una excepción a este requisito para mediciones realizadas en calles tipo cañón urbano o en sitios orientados a fuentes donde los edificios y otras estructuras son inevitables.
- Tener un flujo de aire sin restricciones en un arco de al menos 270 grados. Este arco debe incluir la dirección predominante del viento para la temporada de mayores concentraciones.

⁶ Appendix D to Part 58—Network Design Criteria for Ambient Air Quality Monitoring y Appendix E to Part 58—Probe and Monitoring Path Siting Criteria for Ambient Air Quality Monitoring ambos del CRF40

⁷ ANEXO III de la directiva 2008/50/CE modificado por la directiva 2015/1480/UE

⁸ AS/NZS 3580.1.1:2007 Australian/New Zealand Standard Methods for sampling and analysis of ambient air Part 1.1: Guide to siting air monitoring equipment”

- Tener cielo despejado (sobre tomamuestras) en ángulo de 120°
- En caso de estaciones de monitoreo de NO₂ cercanas a caminos o calles no deben existir obstáculos a la altura de la entrada del tomamuestras, entre la estación de monitoreo y el borde exterior más cercano de las vías de tránsito.

d) Distancia a árboles

- Entrada del tomamuestras una distancia de al menos 10 m respecto de la línea de goteo de los árboles y aumentar a más de 20 m cuando la línea de goteo actúe como una obstrucción.

e) Distancia a calles o caminos

- Ubicar la entrada del tomamuestras a una distancia mínima de 10 m, la cual debe aumentar en la medida que aumenta el flujo vehicular de acuerdo a lo recomendado en la Tabla 2-8.

La Tabla 2-8 presenta la distancia, indicada por criterios USEPA, entre la entrada del tomamuestras y las calles, en función del flujo de vehículos de la calle más cercana para monitoreo de calidad de aire en escalas de vecindario y Urbana para O₃ y NO₂.

Tabla 2-8 Distancia Mínima de Separación entre la entrada del tomamuestras y Calles para Escalas Vecindario y Urbana para Óxidos de Nitrógeno (NO, NO₂, NO_x, NO_y)

Tráfico promedio por día (Número de vehículos por día)	Distancia a calles ¹ (m)
<1000	10
10000	10
15000	20
20000	30
40000	50
70000	100
≥110000	250

¹ Distancia desde el borde del carril de tráfico más cercano. La distancia para recuentos intermedios de tráfico se debe interpolar a partir de los valores de la tabla en función del recuento de tráfico real.

3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE NORMAS DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA O₃ y NO₂

3.1 Comparación de normas a nivel internacional

El organismo que establece las indicaciones regulatorias en materia de Calidad del Aire, más seguido por los países es la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La última revisión de las guías de calidad del aire del año 2005 de la OMS, estableció para el ozono, al igual que para el material particulado (MP₁₀ y MP_{2,5}) y el dióxido de azufre, una norma más estricta que la anteriormente fijada, estableciendo un nivel de 100 µg/m³ y niveles intermedios (Nivel IT-1⁹ de 160 µg/m³ y Alto Nivel de 240 µg/m³) para apoyar la gestión de la calidad del aire de los países.

Sin embargo, para el dióxido de nitrógeno la OMS mantuvo los valores horarios y anual y no definió niveles intermedios. Tampoco, a pesar de los antecedentes epidemiológicos, estableció un estándar para el rango de 24 horas o diario. Esta decisión de la organización, estaría reflejando la opinión en boga en ese tiempo de *“que el NO₂ per se podría no tener efectos sobre la salud en concentraciones ambientales, y que podría estar actuando como un sustituto de otros componentes de la mezcla de contaminación relacionada con la combustión, que no se miden habitualmente”*¹⁰.

La Tabla 3-1 y Tabla 3-2 muestran las regulaciones vigentes en varios países y organizaciones. Se puede observar que Chile, junto con otros países en vías de desarrollo como Argentina, México y Brasil, tiene niveles de norma comparativamente más laxos para NO₂. En efecto, la gran mayoría de los países desarrollados fijan sus regulaciones en límites comparables a los establecidos por la OMS (200 µg/m³ promedio horario y 40 µg/m³ promedio anual), y los que difieren, fijan niveles más estrictos, como Suecia y Suiza.

Japón, Suecia, Suiza y Nueva Zelanda tienen además valores para 24 horas de NO₂. Todos tienen valores horarios, a excepción de Japón que sólo tiene valor para 24 horas, pero de promedio horario, y es el país que tiene el estándar de 24 horas más estricto.

Cabe señalar que la US EPA realizó una revisión específica de los períodos contemplados en la norma para NO₂ y emitió un documento el año 2018 (40 CFR Part 50)¹¹ en el que señala que la evidencia de efectos en salud por exposición a concentraciones por períodos de 1 y 24 horas, exhiben correlación, sin embargo, para efectos de protección de salud, el estándar de 1 hora cubre ambos rangos temporales.

⁹ IT-1 Interim Target 1: nivel intermedio 1)

¹⁰ OMS Evolution of EHO air quality guidelines: past, present and future. ISBN 9789289052306

¹¹ US EPA. Review of the Primary National Ambient Air Quality Standards for Oxides of Nitrogen. 40 CFR Part 50 [EPA-HQ-OAR-2013-0146; FRL-9976-78- OAR]. April 2018

Tabla 3-1: Guías de Calidad del Aire, para Óxido de Nitrógeno, países y organizaciones seleccionadas

País	Año(0)	Unidad	1 hora	Diaria	Anual
Chile	2003	µg/m ³	400		100
OMS	2006	µg/m ³	200 (1)		40
Unión Europea	2008	µg/m ³	200 (1)		40
Alemania (2)	2002	µg/m ³	200		40
Países Bajos (2)	2006	µg/m ³	200		40
USA	2016	Ppb	100 (3) (188 µg/m ³)		53 (100 µg/m ³)
Japón	1978	Ppm		0.04-0.06 (4) (75-113 µg/m ³)	
España	2011	µg/m ³	200		40
Italia	2010	µg/m ³	200		40
Suiza (2)	2010	µg/m ³	100 (6)	80 (7)	30
Suecia	2010	µg/m ³	90 (8)	60 (9)	40
Argentina	2013	Ppm	0.45 (845 µg/m ³)		
Australia	2008	Ppm	0,12 (10) (226 µg/m ³)		0.03 (56 µg/m ³)
Brasil	2013	µg/m ³	320		100
Canadá(14)	2013	Ppb	60 (11) - 13 (12) (113-25 µg/m ³)		42 (11)- 12 (12) (79-23 µg/m ³)
Nueva Zelanda	2011	µg/m ³	200	100	
México	2014	µg/m ³	395(13)		
UK	2010	µg/m ³	200 (1)		40

(0): Año de fijación, revisión o publicación

(1): Puede excederse hasta 18 veces al año.

(2): Corresponden a estándares de inmisión:

a) concentración de masa, como masa de aire contaminado por unidad de volumen; para las sustancias gaseosas, la concentración debe referirse a 293.15 K y 101.3 kPa

b) deposición, como masa de contaminante por unidad de área de suelo por unidad de tiempo.

(3): Percentil 98, promediado sobre 3 años.

(4): Promedio al día de niveles horarios.

(6): Establece medias semi-horarias, que corresponden a la medición de 30 minutos. La definición estadística considera el 95% de las medias semi-horarias de un año debe ser < o= a 100 microgramo/m³.

(7): No debe sobrepasarse más que una vez al año.

(8) El valor puede ser excedido 175 veces en el año calendario solo si nunca se excede el valor de 200 microgramos por metro cúbico de aire durante una hora o más que 18 veces en el año calendario.

(9) El valor puede ser excedido no más de 7 veces en el año calendario.

(10) Máximo 1 excedencia al año.

(11) Valor vigente al año 2020

(12) Valor vigente al año 2025

(13) Excedencia 1 vez al año

(14) El estándar de 1h se evalúa con el promedio de tres años del P98 del máximo horario diario . El estándar anual se evalúa con el promedio de las mediciones del año

Fuente: elaboración propia

Tabla 3-2 Guías de Calidad del Aire, para Ozono, países y organizaciones seleccionadas

País	Año (0)	Unidad	8 horas	4 horas	1 hora
Chile	2013	µg/m ³	120		
OMS	2006	µg/m ³	100		
Alemania	2002		N/A		
Países Bajos	2006	µg/m ³	120		
USA	2016	µg/m ³	140 (1)		
Japón	1973	µg/m ³			118
España	2011	µg/m ³	120		
Italia	2010	Ppb	40(2)		
Suiza	2010	µg/m ³			120 (3)
Suecia	2010	µg/m ³	120		
Argentina	2013	µg/m ³			196
Australia (4)	2008	µg/m ³		200	170
Brasil	2013	µg/m ³			160
Canadá	2015	µg/m ³	135		
Nueva Zelanda	2011	µg/m ³	150		100
México	2014	µg/m ³	157		21
UK	2010	µg/m ³	100(5)		

(0): Año de fijación, revisión o publicación
 (1): Anual de la cuarta más alta máxima diaria de 8 horas de concentración, un promedio de más de 3 años.
 (2): Valor puede ser excedidos en 25 días al año, promediado sobre 3 años.
 (3): No puede superarse más de una vez al año. Además estableció un valor de 100 µg/m³ para promedio de media hora 98% del tiempo en un mes.
 (4): La nueva propuesta indica derogar los rangos de 1 y 4 horas y establecer un estándar de 8 horas de 65 ppb, sin excedencia, pero excluyendo los eventos “excepcionales”^{12,13}.
 (5): No puede excederse más de 10 veces al año.

Fuente: elaboración propia

La comparación entre los valores regulados para NO₂ vigentes en Chile y países de referencia muestra que la norma chilena horaria es el doble de permisiva que los valores de otros países y la norma anual entre 1,8 veces (comparada con norma USA) a 3,3 veces (norma Suiza) más permisiva. Respecto de los países de la OCDE, todos ellos presentan estándares más estrictos que los chilenos, y en relación a otros países de América Latina y a excepción de México igual o más estricta que la guía de la OMS.

Respecto de la situación de la regulación de NO₂ y O₃ en el continente americano, se puede observar que existe una mayor variedad de valores y rangos en las guías¹⁴. Colombia, Ecuador, Panamá, Venezuela, República Dominicana y El Salvador (Centro América) establecen normas o guías para 24

¹² Se debe implementar una regla de evento excepcional para O₃, definida de manera que sea consistente con el enfoque establecido para PM₁₀ y PM_{2.5} en AAQ NEPM. Ref (23)

¹³ National Environmental Protection Council. Impact Statement for the Review of the Ambient Air Quality NEPM standards for SO₂, NO₂ and O₃, may 2019

¹⁴ Kutlar, Joss, (2017) Time to harmonize national ambient air quality standards. *International Journal of Public Health* volume 62, pages 453–462 (2017)

horas¹⁵, en el caso de NO₂, pero se desconoce si corresponden a regulaciones vinculantes o solamente a guías de calidad del aire.

Respecto del ozono, la norma chilena no se aleja tanto de la guía de la OMS, y es más estricta que su nivel intermedio 1.

3.2 Gestión de episodios de críticos

El estudio predecesor a éste elaborado por la Universidad de Chile en el año 2016, desarrolló un completo análisis respecto de la gestión de episodios de alta contaminación atmosférica en Estados Unidos (modelo EPA), Unión Europea, Reino Unido, China y México. Las principales conclusiones fueron:

- Dado que los niveles nacionales son muy similares a los de EEUU, las concentraciones que definen los niveles de episodios críticos no sean modificadas.
- Establecer un Índice de Calidad de Aire, de una naturaleza y fundamento similar a los usados en EEUU.

A efectos de la gestión de episodios, el fundamento de actuación se realiza a partir de dos grandes enfoques: los Índices de Calidad del Aire (ICA) y los Índices de Salud de la Calidad del Aire (ISCA). La principal diferencia entre ambos tipos de indicadores está dada por el tipo de dato crudo utilizado para su cálculo. Los indicadores tipo **ICA**, se basan en los niveles de los estándares de calidad para efectos de la definición de los niveles de actuación. Los índices tipo **ISCA**, por su lado, tienen su fundamento en salud, asociado a los efectos en mortalidad de los contaminantes en determinadas concentraciones.

El Índice de calidad del aire (**ICA**), comúnmente usado en muchas ciudades del mundo proviene de la EPA, y se creó como una herramienta para clasificar la calidad del aire y su relación con un estándar establecido o guía de calidad del aire. Tiene por lo tanto en su génesis una relación normativa o estandarizada.

Normalmente se miden varios contaminantes, pero es el contaminante con la concentración más alta en relación con su valor estándar el que determina el valor del índice. Esto significa que los efectos aditivos de varios contaminantes del aire no se capturan.

Tampoco entregan información espacial o geográfica de los efectos sobre la salud, pues en su construcción no se utiliza data sobre el riesgo en salud.

El Índice de salud de la calidad del aire (**ISCA**) es una herramienta que se ha desarrollado para abordar los efectos sobre la salud causados por la exposición simultánea a varios contaminantes del aire (mezclas) y, por lo tanto, se puede usar con fines preventivos en un sistema de advertencia sobre el pronóstico de la situación de la calidad del aire.

¹⁵https://www.swisstph.ch/fileadmin/user_upload/SwissTPH/Institute/Ludok/Grenzwerte/AirQualityStandards_PMOzoneNO2SO2CO_TablesReferences.pdf

A diferencia del ICA, que privilegia un contaminante, el ISCA se basa en un enfoque de múltiples contaminantes, donde se utilizan los riesgos excesivos de diferentes resultados de salud relacionados con la exposición a un grupo de contaminantes del aire para construir el índice. En general, se utilizan efectos sobre la salud a corto plazo en términos de mortalidad o morbilidad.

Su formulación inicial se elaboró en Canadá (Stieb et al, 2008), pero en la actualidad varios países, tales como Suecia, China y Sudáfrica lo están probando (Du X, 2020; Olstrup, 2019; Li 2017; Cairncross 2007).

El paso de un índice basado en el umbral (ICA) a un índice basado en el riesgo para la salud (ASCI), puede reflejar varias ventajas. Su uso ilustra los efectos acumulativos que surgen de la exposición combinada a varios contaminantes diferentes. La importancia relativa de cada contaminante durante diferentes partes del año también se ilustra a través de este enfoque de múltiples contaminantes.

En Estocolmo, al incorporar una variable, no normada, pero de alto impacto a la salud como es el polen, el ISCA ilustró el aumento del riesgo de las atenciones de urgencia por asma asociado con la exposición combinada y su variación durante todo el año, con el mayor aumento de riesgo durante el período de marzo a junio, junto con niveles relativamente altos de MP₁₀, O₃ y polen de abedul (Olstrup, 2019), lo que permite una comunicación del riesgo eficiente para la población.

Desde el punto de vista de política pública, hay dos factores particularmente importantes que se pueden lograr incorporando el concepto de salud en la gestión ambiental. El primero, es presentar las diferencias geográficas en la situación actual de la calidad del aire con un índice basado en la coexistencia de varios contaminantes diferentes, dando cuenta implícita también de las diferencias en condiciones ambientales, lo que se asemeja a la realidad. El segundo es que tiene fines de pronóstico para el objetivo de proporcionar advertencias sobre la situación de la calidad del aire mañana o los próximos días, considerando el efecto combinado de varios contaminantes.

La Tabla 3-3 siguiente ilustra los distintos tipos de indicadores o índices utilizados, clasificándolos según el tipo.

Tabla 3-3: Tipos de Indicadores e Índices de Calidad del Aire

Índice	Nombre	País
TIPO ICA		
ICAP	Índice de calidad de aire referido a partículas	Chile (DS 59/1998)
ICAG	Índice de calidad de aire referido a gases	Chile (DS 104/2018)
AQI	Air Quality Index	EPA, USA
CAQI	Common Air Quality Index	Citeair, UE
ORAQI	Oak Ridge Air Quality Index	Oak Ridge National Laboratory, USA
NAQI	New Air Quality Index	Bishoi, USA
AQDI	Air Quality Depreciation Index	Singh, USA
IAPI	Integral Air Pollution Index	Bezuglaya, Rusia
AQI	Aggregate Air Quality Index	Kyrkilis, UE
TIPO ISCA		
PI	Pollution Index	Cannistraro, Italia
ARI	Aggregate risk index	Sciard, Francia
AQI-NNT	AQI con PCA-Neural Network Model	Kumar, India
FAQI	Fuzzi Air Quality Index	Mandal,
AQHI	Air Quality Health Index	Canadá
APISSA	Air pollution indexing System in South Africa	Caincross, Sud Africa

Fuente: Elaboración propia

Los índices de calidad, cualquiera sea el enfoque que se adopte, constituyen una herramienta estandarizada que busca medir la calidad de aire y expresarla en términos del nivel de riesgo en la salud expresado de una manera simple y comprensible, sin necesidad de conocer el detalle de la información sobre la cual se basan. A nivel internacional, se han desarrollado una importante variedad de índices que intentan satisfacer las necesidades de información pública respecto de la calidad de aire y en ese contexto resulta complejo el desarrollo de un análisis comparado¹⁶, tanto respecto de los niveles como de las actuaciones y medidas asociadas.

En el caso de la norma de calidad para NO₂ en Chile, la regulación establece un protocolo de actuación basado en tres rangos de concentración que originan situación de alerta, preemergencia y emergencia ambiental, asociados a los niveles pronosticados de calidad de aire, o por la constatación de concentraciones a partir de estaciones de monitoreo con representación poblacional¹⁷. En el caso de NO₂, estos son los siguientes.

Tabla 3-4: Niveles emergencia para NO₂

Nivel	Concentración NO ₂ 1h
1 Alerta	1130 – 2259 µg/m ³ N
2 Preemergencia	2260 – 2999 µg/m ³ N
3 Emergencia	3000 o más µg/m ³ N

Fuente: Decreto N° 114 del MINSEGPRES

En todos los casos, la Gestión de Episodios Críticos solamente se aplica cuando en un área determinada del país se cuenta con Planes de Descontaminación o Prevención de acuerdo con lo que indica la legislación vigente.

¹⁶ A. Monteiro et al. Towards an improved air quality index. *Air Quality Atmosphere & Health*. September 2016

¹⁷ Artículo 5, Decreto 114 MINSEGPRES/2002

3.3 Índices de Calidad del Aire en países seleccionados

Aún cuando no existe una armonización internacional en esta materia, a continuación, se presenta un análisis ilustrativo de los diferentes ICA con la correspondiente escala de valores para concentraciones de NO₂, de algunos países seleccionados. Se ha incluido en la última columna el nivel correspondiente a la regulación de Chile para efectos de analizar la comparabilidad.

Tabla 3-5: Índice de Calidad de Aire. Estados Unidos para NO₂

Valores	Niveles	Concentración 1h µg/mg ³ N	Resumen Actuación	Comparabilidad Regulación Nacional
0-50	Bueno	0-100	Sin restricciones para el desarrollo de actividades al aire libre	Bueno
51-100	Moderado	101-188	Niños y adultos extremadamente sensibles deben evitar ejercicios al aire libre	
101-150	Dañino a grupos sensibles	189-677	Adultos y niños sensibles deben evitar actividades prolongadas al aire libre	
151-200	Dañino	678-1220	Grupos sensibles deben evitar actividades al aire libre y el resto de la población evitar actividades prolongadas al aire libre	Alerta en limite superior
201-300	Muy dañino	1221-2348	Grupos sensibles no deben estar al aire libre y el resto de la población evitar actividades al aire libre	Alerta y preemergencia
301-500	Peligroso	2349 y +	No se deben desarrollar actividades al aire libre. En este nivel se deben pueden implementar alertas de condiciones de emergencia y toda la población se puede ver afectada	Preemergencia y emergencia

Fuente: U.S. EPA. 40 CFR Part 58. Air Quality Index Reporting; Final Rule. 64. 1999;149. Traducción libre

Tabla 3-6: Índice de Calidad de Aire. China para NO₂

Valores	Niveles	Concentración 1h µg/mg ³ N	Resumen Actuación	Comparabilidad Regulación Nacional
0-50	Excelente	0-100	Sin implicancias	Bueno
51-100	Bueno	102-200	Algunas personas hipersensibles deben reducir el ejercicio al aire libre	
101-150	Ligeramente Contaminado	201-700	Los niños, ancianos y personas con problemas respiratorios o cardíacos deben reducir el ejercicio intenso al aire libre.	
151-200	Moderadamente contaminado	701-1200	Los niños, ancianos y personas con problemas respiratorios o cardíacos deberían reducir el ejercicio al aire libre. Reducción moderada de las actividades al aire libre de la población en general.	Alerta en limite superior
201-300	Muy contaminado	1201-2340	Los niños, ancianos y personas con problemas cardíacos o respiratorios deben permanecer en sus casas y evitar las actividades. La población en general debe reducir deportes al aire libre.	Alerta, preemergencia y emergencia

Valores	Niveles	Concentración 1h µg/mg ³ N	Resumen Actuación	Comparabilidad Regulación Nacional
301 y +	Severamente contaminado	2341 y +	Los niños, ancianos y los enfermos deben permanecer en sus casas y evitar el ejercicio. Las personas sanas deben evitar las actividades al aire libre.	Preemergencia y emergencia

Fuente: Ministry of environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 633-2012 Technical Regulation on Ambient Air Quality Index (on trial). 2012. Traducción libre

Tabla 3-7: índice de Calidad de Aire. México para NO₂

Valores	Niveles	Concentración 1h µg/mg ³ N	Resumen Actuación	Comparabilidad Regulación Nacional
0-50	Buena	0-197	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre	Bueno
51-100	Regular	198-395	Las personas que son extremadamente susceptibles a la contaminación deben considerar limitar la exposición al aire libre	
101-150	Mala	396-808	Los niños, ancianos y personas con problemas respiratorios o cardíacos, así como personas que realizan actividad física al aire libre deben limitar la exposición al aire libre.	
151-200	Muy mala	809-1220	Los niños, ancianos, personas con problemas respiratorios o cardíacos y personas que realizan actividad física intensa deben evitar la exposición al aire libre y el resto de la población debe limitar la exposición al aire libre.	Alerta en limite superior
201-300	Extremadamente mala	1221-2348	Toda la población debe evitar la exposición al aire libre.	Alerta, Preemergencia
301 y 500	Peligrosa	2349 y +	Suspensión de actividades al aire libre.	Preemergencia y emergencia

Fuente: Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Noviembre 2018

Tabla 3-8: índice de Calidad de Aire. Colombia para NO₂

Valores	Niveles	Concentración 1h µg/mg ³ N	Resumen Actuación	Comparabilidad Regulación Nacional
0-10	Favorable	0-100	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre	Bueno
10,1-20	Moderada	101-188	Población vulnerable considerar reducir esfuerzos prolongados o pesados	
20,1-30	Regular	189-677	Población vulnerable debe limitar esfuerzos y actividad física intensa al aire libre.	
30,1-40	Mala	678-1221	Población vulnerable evitar actividad física intensa. Población en general reducir actividad física intensa.	Alerta en limite superior
40,1-60	Muy mala	1222-2349	Población vulnerable evitar toda actividad física al aire libre y uso se recomienda uso de N95. Población en general evitar actividad física intensa en espacios abiertos.	Alerta, Preemergencia
60,1 y 100	Peligrosa	2350 y +	Toda la población evitar toda actividad física en exteriores y en interiores solo actividad física leve.	Preemergencia y emergencia

Fuente: <http://www.icde.org.co/>

En general, para las experiencias previamente analizadas, en los primeros niveles de los índices de calidad se producen restricciones principalmente en poblaciones vulnerables, mientras que los resguardos o advertencias a la población en general se comienzan a producir en los tres últimos niveles, como se aprecia en el cuadro resumen siguiente y que resulta consistente con el análisis de los efectos de la exposición analizado en acápite anteriores. En el caso chileno, los resguardos en los mayores niveles se asimilan a los niveles de alerta, preemergencia y emergencia definidos en la regulación, mientras que entre el nivel 0 y alerta (corresponde aproximadamente a un 300% de la norma horaria) no existen acciones predefinidas.

La tabla siguiente muestra el resumen de los rangos de concentración máximos (combinados para todos los países en análisis) y las actuaciones, en el cual se destacan en negrillas las acciones que se comienzan a desarrollar para la población en general, a efectos de ilustrar lo indicado en el párrafo anterior.

Tabla 3-9: Comparación de Índices de Calidad de Aire para NO₂

Nivel	Rango general de Concentración 1h µg/mg ³ N	EEUU	China	México	Colombia
1	0 - 197	Sin restricciones para el desarrollo de actividades al aire libre	Sin implicancias	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre
2	197 - 395	Niños y adultos extremadamente sensibles deben evitar ejercicios al aire libre	Algunas personas hipersensibles deben reducir el ejercicio al aire libre	Las personas que son extremadamente susceptibles a la contaminación deben considerar limitar la exposición al aire libre	Población vulnerable debe considerar reducir esfuerzos prolongados o pesados
3	396 - 808	Adultos y niños sensibles deben evitar actividades prolongadas al aire libre	Los niños, ancianos y personas con problemas respiratorios o cardíacos deben reducir el ejercicio intenso al aire libre.	Los niños, ancianos y personas con problemas respiratorios o cardíacos así como personas que realizan actividad física al aire libre deben limitar la exposición al aire libre.	Población vulnerable debe limitar esfuerzos y actividad física intensa al aire libre.
4	809 - 1220	Grupos sensibles deben evitar actividades al aire libre y el resto de la población evitar actividades prolongadas al aire libre	Los niños, ancianos y personas con problemas respiratorios o cardíacos deberían reducir el ejercicio al aire libre. Reducción moderada de las actividades al aire libre de la población en general.	Los niños, ancianos, personas con problemas respiratorios o cardíacos y personas que realizan actividad física intensa deben evitar la exposición al aire libre y el resto de la población debe limitar la exposición al aire libre.	Población vulnerable evitar actividad física intensa. Población en general reducir actividad física intensa.
5	1221 - 2349	Grupos sensibles no deben estar al aire libre y el resto de la población evitar actividades al aire libre	Los niños, ancianos y personas con problemas cardíacos o respiratorios deben permanecer en sus casas y evitar las actividades. La población en general debe reducir deportes al aire libre.	Toda la población debe evitar la exposición al aire libre.	Población vulnerable evitar toda actividad física al aire libre y uso se recomienda uso de N95. Población en general evitar actividad física intensa en espacios abiertos.
6	2349 y +	No se deben desarrollar actividades al aire libre. En este nivel se deben implementar alertas de condiciones de emergencia y toda la población se puede ver afectada	Los niños, ancianos y los enfermos deben permanecer en sus casas y evitar el ejercicio. Las personas sanas deben evitar las actividades al aire libre.	Suspensión de actividades al aire libre.	Toda la población evitar toda actividad física en exteriores y en interiores solo actividad física leve.

Fuente: Elaboración propia

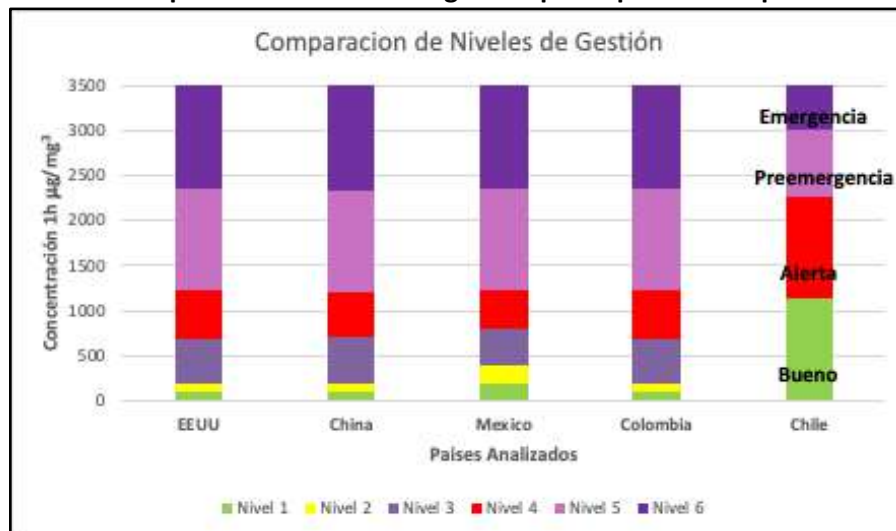
A continuación, se muestra un cuadro comparativo y gráfico de umbrales y rango de actuación de las experiencias analizadas con Chile, a efectos de ilustrar las brechas que presenta la regulación en materia tanto de umbrales como de las actuaciones asociadas.

Tabla 3-10 Cuadro comparativo de umbrales:

País	Rangos de Concentración 1h $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$					
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6
EEUU	0 - 100	101 - 188	189 - 677	678 - 1220	1221 - 2348	2349 y +
	Bueno	Moderado	Dañino a grupos sensibles	Dañino	Muy dañino	Peligroso
China	0 - 100	102 - 200	201 - 700	701 - 1200	1201 - 2340	2341 y +
	Excelente	Bueno	Ligeramente Contaminado	Moderadamente contaminado	Muy contaminado	Severamente contaminado
México	0 - 197	198 - 395	396 - 808	809 - 1220	1221 - 2348	2349 y +
	Buena	Regular	Mala	Muy mala	Extremadamente mala	Peligrosa
Colombia	0 - 100	101 - 188	189 - 677	678 - 1221	1222 - 2349	2350 y +
	Favorable	Moderada	Regular	Mala	Muy mala	Peligrosa
Chile	0 - 1129			1130 - 2259	2260 - 2999	3000 y +
	Bueno			Alerta	Preemergencia	Emergencia

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1 Cuadro comparativo de niveles de gestión para episodios en países seleccionados.



Nota: El nivel 6 se extiende a valores más altos de 3500, no obstante, se ha limitado a 3500 para efectos ilustrativos.
Fuente: Elaboración propia

3.4 Análisis de la ocurrencia de peaks de NO₂ respecto a niveles de emergencia ambiental internacional y de Chile

La Tabla 3.11 muestra en resumen de las concentraciones máximas en las 5 zonas de estudio y se observa que no se registran días con concentraciones de NO₂ sobre el nivel de Alerta establecido por la norma de calidad de aire de NO₂ en 1130 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Además, la concentración horaria más alta se registró en la estación Parque O'Higgins con un valor de 317,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

Al considerar los niveles establecidos en EEUU, China, México y Colombia se decidió mantener como criterio los niveles de EEUU, ya que el resto de los países tienen o el mismo nivel o valores similares del rango de NO₂ para los tramos definidos en la escala. En base a la mayor concentración registrada de NO₂ en Chile, solamente se incluyeron los niveles 1, 2 y 3 en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Días de episodios (Nivel 2, Nivel 3 y Alertas) y concentraciones máximas registradas en las zonas de estudio para el período 2017-2019:

ZONA/Estación	Días Nivel 1 <100 µg/m ³ N	Días Nivel 2 101 – 188 µg/m ³ N	Días Nivel 3 189 – 677 µg/m ³ N	Días Alerta >1130 µg/m ³ N	conc 1h máx µg/m ³ N
ZONA 1 Calama					
Centro Calama	1072	21	0	0	141,5
ZONA 2 Quillota					
Quillota ¹	729	0	0	0	89,0
ZONA 3 Concón-Quintero-Puchuncaví					
Concón	1091	0	0	0	95,1
Colmo	948	26	0	0	139,5
Puchuncaví	1083	12	0	0	149,6
La Greda	1080	15	0	0	147,2
Los Maitenes	1071	21	1	0	248,1
Ventanas	1079	15	0	0	159,2
Centro Quintero	1093	2	0	0	174,0
Loncura	1095	0	0	0	91,2
Quintero	1095	0	0	0	60,8
Sur	1090	0	0	0	79,2
Valle Alegre	1058	0	0	0	77,9
ZONA Región Metropolitana					
Cerro Navia	666	242	5	0	198,1
Independencia	711	317	21	0	225,1
La Florida	736	260	6	0	222,6
Las Condes	695	209	19	0	298,0
Pudahuel	900	147	0	0	166,1
P O'Higgins	638	324	49	0	317,8
Puente Alto	821	165	2	0	216,4
Talagante	863	30	0	0	164,2
El Bosque	797	195	4	0	223,8
ZONA Gran Concepción					
Club Empleados	272	0	0	0	62,5
Enap Price	1093	2	0	0	102,6
Junji	1094	1	0	0	100,1
Indura	1091	2	0	0	112,6
Liceo Polivalente	1055	0	0	0	71,5
Nueva Libertad	1088	0	0	0	86,7
Consultorio SV	1042	2	0	0	102,4
Punteras	1084	0	0	0	67,7
Kingston College	1058	2	0	0	107,9
Hualqui	1029	0	0	0	59,8

¹ Para estación Bomberos solamente hay datos horarios disponibles para años 2007 y 2008.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Centro Calama, entre 2017 y 2019 hay 21 días con concentraciones horarias máximas que alcanzan el nivel 2 (entre 101 – 188 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) o moderado, ningún día supera el nivel 2. En Anexo digital, documento “Calidad de Aire.pdf” se incluye una serie de tiempo con las máximas diarias de NO₂ para este período.

Para la Zona de Quillota, en la estación Bomberos entre los años 2007 y 2008 la concentración horaria más alta es 89 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, luego todas las concentraciones están en nivel 1 o Bueno. En Anexo digital, documento “Calidad de Aire.pdf” se incluye una serie de tiempo con las máximas diarias de NO₂ para este período.

Para la Comuna de Concón solamente la estación Colmo alcanza el Nivel 2 o moderado durante 26 días, en la Comuna de Quintero solamente la estación Centro Quintero alcanza el nivel 2 durante 2 días. En la Comuna de Puchuncaví las estaciones La Greda, Puchuncaví, Los Maitenes y Ventanas alcanzan el nivel 2 entre 12 y 21 días, incluso la estación Los Maitenes alcanza un día el nivel 3 dañino a grupos sensibles con una concentración horaria máxima de 248,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. En Anexo digital, documento “Calidad de Aire.pdf” se incluyen gráficos con series de tiempo con las máximas diarias de NO₂ para todas las estaciones de la zona CQP.

En la Región Metropolitana se registran las concentraciones más altas, a excepción de las estaciones Pudahuel y Talagante el resto alcanzan el nivel 3 Dañino a grupos sensibles, siendo la estación Parque O’Higgins la que registra la concentración horaria máxima de 317,8.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, 324 días en nivel 2 y 49 días en nivel 3. En segundo lugar se ubica la estación Las Condes con una concentración horaria máxima de 298,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, 209 días en nivel 2 y 19 días en nivel 3. Por otro lado, la estación Pudahuel registra una concentración máxima de 166,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y 147 días en nivel 2. En Anexo digital, documento “Calidad de Aire.pdf” se incluyen gráficos con series de tiempo con las máximas diarias de NO₂ para todas las estaciones.

En el Gran Concepción, las mayores concentraciones horarias se obtienen en Concepción (Kingston College), Hualpén (ENAP y Junji) y Talcahuano (Indura y Consultorio San Vicente), pero solo alcanzan el nivel 2 o moderado a lo más durante 2 días. La concentración horaria más alta corresponde a 107,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en Kingston College.

Síntesis general de análisis de episodios

En la perspectiva de la regulación nacional vigente **no existen episodios**, pues las concentraciones horarias de NO₂ registradas en los últimos años se encuentran dentro el rango calificado como BUENO (0 a 1129 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$), siendo las más altas Parque O’Higgins seguida por Las Condes con niveles aproximadamente en un 30% de lo considerado bueno.

Considerando como referencia la regulación de otros países (EEUU, China y Colombia), se podría hablar de episodios ante situaciones de exposición en Nivel 3 (mayor a 189 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$), que es un estado dañino para grupos sensibles de la población. En esa condición, la mayor cantidad de casos se observan en las comunas céntricas de la RM (P O’Higgins, Las Condes e Independencia) y unos pocos en las comunas

periféricas (Cerro Navia, La Florida, Puente Alto y El Bosque), mientras que en el resto del país, sólo hay un caso aislado en la estación La Greda de la comuna de Puchuncaví

Cabe señalar que en la regulación de Chile, el rango considerado como ALERTA (1129 a 2259 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$), es considerado en otros países entre los niveles 4 y 5, esto es, moderadamente contaminado a muy contaminado, y en la perspectiva de la salud, dañino a muy dañino para la población general. Esta condición no se ha registrado en ninguna estación del país.

Dado lo anterior, y conocidos los efectos en salud ante exposición aguda, los valores umbrales para la definición de situaciones que requieran gestión deben disminuir para los objetivos de:

- Informar a la población sobre el riesgo de exposición, especialmente a población sensible.
- Activar medidas de gestión que reduzcan la exposición en condiciones ambientales de concentraciones de riesgo para población sensible y población general
- Implementar medidas estructurales para la reducción de emisiones.

4 EVIDENCIA Y ANTECEDENTES EN SALUD

4.1 Aspectos Metodológicos

Se llevaron a cabo revisiones sistemáticas (RS) de la literatura internacional tomando en consideración lo establecido por el protocolo PRISMA¹⁸.

Las RS sintetizan los resultados de investigaciones primarias mediante estrategias que limitan el sesgo y el error aleatorio. Estas estrategias incluyen:

- La búsqueda sistemática y exhaustiva de todos los artículos potencialmente relevantes.
- La selección, mediante criterios explícitos y reproducibles, de los artículos que serán incluidos finalmente en la revisión.
- La descripción del diseño y la ejecución de los estudios originales, la síntesis de los datos obtenidos y la interpretación de los resultados.

Con mayor detalle la metodología de la RS contempló:

- a) Planteamiento de preguntas estructuradas;
 - Población estudiada: población general de grandes urbes;
 - Intervención: normas de calidad del aire – episodios de alta contaminación por NO₂ y O₃.
 - Criterios de exclusión: estudios publicados antes del año 2014.
 - Criterios de inclusión: artículos en humanos - artículos primarios – revisiones sistemáticas y metaanálisis.
- b) La búsqueda se realizó en bases de datos (Medline, PubMed, Scielo) por medio de los siguientes términos MeSH: health effects – NO₂ – O₃ -prediction- synergism / guidelines NO₂ and O₃ / new design and air pollution;
- c) Selección de artículos: la selección preliminar se realizó sobre la base de resúmenes y títulos.
- d) Extracción de datos: Se resumió la información por medio de la confección de tablas resumen de resultados con autor, lugar, diseño, evaluación de los sesgos y de la calidad de la evidencia. La calidad de la evidencia fue clasificada como alta, moderada, baja y muy baja. Se reportó separadamente el grado de recomendación (recomendación fuerte o débil).

Para efectos de la evaluación teórica de la sinergia entre contaminantes, sobre la base de los resultados encontrados en las RS se realizó un análisis teórico y resultados de la revisión sistemática de la información de los efectos comunes que se producen debido a la exposición a óxidos de nitrógeno y ozono.

¹⁸ https://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/public/uploads/PRISMA_Spanish.pdf. PRISMA es el acrónimo de “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses”

A partir de la revisión sistemática de literatura gris¹⁹ se confeccionó una tabla de comparación de las normas de calidad del aire para óxidos de nitrógeno, vigentes en los países nombrados en el artículo 11 del Reglamento del SEIA²⁰ como Estados de referencia. Se sistematizaron los valores de las normas y los criterios técnicos de excedencia.

Mediante una búsqueda sistemática de literatura gris, se confeccionó una matriz con los niveles y períodos de exposición, así como los niveles de actuación definidos (en el caso de estar explícitos) en Estados Unidos, Canadá, Australia, Unión Europea, UK, China, Colombia y México. Se resumieron los modelos para la gestión de episodios de emergencia y se compararon con lo vigente en Chile para dióxido de nitrógeno (NO₂).

Sobre la base de las actividades anteriores se entregan los fundamentos para tres escenarios normativos diferentes para NO₂.

Para efectos de actualizar, recopilar y sistematizar estudios sobre efectos en salud por concentración de NO₂ (funciones dosis respuesta), se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Revisión de las evaluaciones de impacto regulatorio de normas de calidad de NO₂, identificando los efectos en salud utilizados y su valoración. Se confeccionó una tabla resumen con las funciones dosis-respuesta identificadas y una opinión sobre la aplicabilidad de ellas tomando en consideración las características poblacionales de los países estudiados y su similitud con Chile.
2. Se realizó también una comparación cuantitativa en formato de tabla, de los distintos tipos de beneficios calculados en las evaluaciones internacionales recopiladas.
3. Se revisaron las guías metodológicas y cinco papers recientes sobre estimación de efectos en salud por concentración de NO₂.

Para efectos de la actualización de los valores de la Guía metodológica del Ministerio del Medio Ambiente y la proposición de coeficientes de riesgo unitario para NO₂, se llevó a cabo un análisis crítico de la actual Guía y los valores nacionales para los riesgos unitarios para NO₂.

Se realizó un análisis de compatibilidad entre las tasas de incidencia de mortalidad y morbilidad que se tienen actualmente, obtenidas a partir de la información del DEIS (Departamento de Estadísticas e Información en Salud) y los casos obtenidos a partir de la revisión realizada.

¹⁹ Se entiende por literatura gris aquella publicación que no ha pasado por el proceso de evaluación de pares (*peer review*), que es requerido en las revistas científicas indexadas. Por ejemplo publicaciones de la EPA, OMS, en general documentos de organismos gubernamentales u ONGs.

²⁰ Ministerio del Medio Ambiente Decreto Supremo N°40/2013 Aprueba reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

4.2 Estado del arte de los efectos del NO₂ en la salud humana

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha declarado que una de las principales amenazas para la salud de los habitantes del mundo está dada por la presencia de contaminantes, particulado y gases, en la atmósfera. Asimismo, reconoce que el NO₂ es uno de los contaminantes más ubicuamente distribuido en el aire, lo que afecta a todos los países.

En general, el tráfico vehicular es una fuente importante del NO₂ ambiental y además de exposición directa para la población. Los efectos sobre la salud, morbilidad y mortalidad, frente a exposiciones cortas han sido ampliamente estudiados.

Una vez inhalado el gas, se produce su absorción en el tracto respiratorio, lo que se puede incrementar con el ejercicio. Los estudios experimentales en humanos voluntarios y animales expuestos muestran que el contaminante puede permanecer por períodos prolongados en los pulmones, y posteriormente se difunde en el organismo, por lo que se detectan sales o ácidos (nitrítico o nitroso) en sangre y orina. Esto evidencia que la exposición se inicia en el sistema respiratorio y su presencia produce efectos sobre el resto de los sistemas corporales.

Los efectos dañinos sobre la salud se refieren a alteraciones en el metabolismo pulmonar, la estructura traqueo, bronquial y alveolar, alteraciones de la función pulmonar, inflamación, aumento de la susceptibilidad a patógenos virales o bacterianos, debido a disminución de la capacidad de defensa del individuo expuesto.

Los efectos indicados anteriormente se encuentran mediados por la concentración, más que por la duración de la exposición, es decir, tienden a aparecer frente a aumentos de la concentración del contaminante.

Los pacientes asmáticos presentan exacerbación de sus síntomas de obstrucción y de hiperreactividad bronquial. La evidencia toxicológica experimental en animales y humanos, indica que la exposición a corto plazo de NO₂ en concentraciones que exceden los 200 µg/m³, produce efectos dañinos significativos en la salud humana.

No hay evidencia aislada del NO₂ de efectos crónicos, sin embargo, en presencia del material particulado fino, se producen diversos efectos respiratorios en pacientes asmáticos, en exposiciones mayores a 40 µg/m³ (OMS,2005)²¹.

La OMS en su revisión del año 2013, estableció que un número limitado de grandes estudios epidemiológicos habían estimado una función dosis respuesta (FDR) para la mortalidad asociada con la exposición a largo plazo al NO₂. Esta incertidumbre se reflejaba en el informe HRAPIE (Health Risk of Air Pollution in Europe) de la OMS, que clasificó la FDR de mortalidad a largo plazo para NO₂ como del Grupo

²¹ Forestiere F, Peters A Kelly F y Holgate S Chapter 12. Nitrogen Dioxide. WHO Air Quality Guidelines. Global Update 2005.

“B”²² para el cual existe una mayor incertidumbre sobre la precisión de los datos utilizados para la cuantificación de los efectos” (OMS 2013b).

Además, se indicó que era probable que existiera una superposición considerable entre los efectos sobre la salud de la exposición a largo plazo al NO₂ y PM_{2.5}, ya que están altamente correlacionados. Cualquier método para cuantificar los resultados de salud asociados con el NO₂ debe incluir un ajuste para eliminar la contribución de PM_{2.5}.

La última evaluación realizada en Estados Unidos determinó la presencia de una relación causal del NO₂ sobre la morbilidad respiratoria. Además, planteó que, respecto de la relación entre el contaminante, la mortalidad y los efectos cardiovasculares, sólo se tenía “información sugerente, pero no suficiente para inferir una relación de causalidad” (EPA, 2016)²³.

Tomando en consideración lo establecido en las bases técnicas de este estudio, se llevó a cabo una revisión sistemática de las publicaciones científicas, de los últimos cinco años, relacionadas con los efectos de la exposición a NO₂, encontrándose 60 publicaciones desde el año 2016 en adelante.

Se seleccionaron 14 metaanálisis con resultados relativos a NO₂, con modelos que incluían otros contaminantes. En el ANEXO: Artículos científicos sobre efectos del NO₂, se encuentra el resumen de la búsqueda y revisión sistemática de publicaciones en revistas con comité editorial.

En la Tabla 4-1 siguiente presenta un resumen, principalmente de los estudios de metaanálisis respecto de los efectos conocidos del NO₂ en los sistemas respiratorio y cardiovascular, y se presenta información respecto de indicadores de riesgo para nuevos impactos sobre la salud. Se entrega la información sistematizada por fecha, tipo de efecto, resultado respecto del NO₂, grado de solidez científica de la publicación y una recomendación a juicio experto sobre su generalización para Chile. Es decir, se entrega opinión experta sobre la aplicabilidad de ellas tomando en consideración las características poblacionales de los países estudiados y su similitud con Chile.

²² Clasificación de grado de certidumbre de la evidencia. “B” Indica poco certidumbre.

²³ EPA Integrated Science Assessment (ISA) for oxides of nitrogen- health criteria (final report, 2016). 2016

Tabla 4-1: Resumen de principales resultados respecto de efectos del NO₂²⁴

Autor	Efecto	Resultado	Recomendación para Chile
Ying Zeng, 2019	Depresión	OR: 1.04 (IC 95%: 1.01-1.07) por 5 ppb de NO ₂	No se puede aplicar directamente a Chile, pues nuestro país presenta tasas muy elevadas. Lo que indica algún grado de susceptibilidad de los chilenos a las patologías mentales. Por lo anterior se deben hacer cálculos de riesgo con data nacional.
Shu-Jun, 2020		OR: 1.02 (IC 95%: 1.00-1.04) por incremento de 10 µg / m ³	
Le-qian G, 2019	Nacimientos	Bajo Peso de Nacimiento OR: 1.02 (IC95%: 1.00-1.04); Pequeño para la edad gestacional: OR:1.02 (IC 95%: 1.01-1.03)	Aplicable
Arroyo V, 2019	Parto Prematuro	RR de parto prematuro: 1.150 (IC 95%: 1.084-1.220) RAP de 13.04% (IC 95%: 7.75-18.03), que corresponde a un total de 5731 (IC 95%: 436-10681) casos de PTB.	Aplicable
Cheng-Yang, 2019	Enf. Parkinson	RR: 1.06 (IC 95%: 1.04-1.09) por 10 ppb	Muy novedoso. Se sugiere esperar mayor cantidad de evidencia para incorporarlo en los análisis.
Newell, 2018	Mortalidad Cardiorespiratoria	Un aumento de 10 µg/m ³ se asoció con 0.92% (IC 95%: 0.44-1.39) y 0.70% (0.01, 1.40) de aumentos en la mortalidad cardiovascular y respiratoria respectivamente	Aplicable
Cheng-Yang, 2020	Malformaciones cardiacas congénitas	OR: 1.14 (IC 95%: 1.02-1.26)	Muy específico. Daño muy asociado a particularidades genéticas. Se debe estudiar en Chile, antes de usar esta información.
Mei-Yi, 2020	Insuficiencia Renal Crónica	RR: 1.11 (95% CI: 1.09, 1.14) por 10 ppb de aumento.	Muy específico. Se debe estudiar en Chile, antes de usar esta información.
Bo-Yi, 2018	Presión Arterial	OR: 1.05 (IC 95%: 1.02-1.08).	Aplicable
Bo-Yi, 2020	Diabetes	OR: 1.07 (IC 95% 1.04 -1.11) por incremento de 10 µg/m ³	Aplicable
Huanhuan Zhang, 2020	Diabetes Gestacional	Sin efectos significativos para MP ₁₀ , MP _{2,5} ni NO ₂ . Sólo para ozono y SO ₂	Aplicable
Dales, 2020	Hospitalizaciones Fibrosis Pulmonar Idiopática	RR: 1.44 (IC 95%:1.09-1.92).	Aplicable
Hongxi Yang, 2019	Mortalidad por eventos Cardiovasculares	RR: 1.23 (IC 95%: 1.15-1.31)	Aplicable
Orellano P, 2017	Exacerbación de Asma	OR: 1.024 (IC del 95%:1.005-1.043)	Aplicable
OR: <i>odds ratio</i> o razón de desigualdad es un indicador de asociación RR: Riesgo Relativo, indicador de asociación RAP: Riesgo atribuible poblacional IC: Intervalo de confianza			

Fuente: Elaboración propia

²⁴ El resumen del contenido de los estudios indicados se incluye en el anexo bibliográfico del presente informe.

Los estudios antes señalados muestran que en los últimos años ha habido un aumento significativo en las investigaciones de los efectos del NO₂ en la salud. Las revisiones internacionales han encontrado que los efectos son independientes de otros contaminantes, incluido el material particulado (MP₁₀ y MP_{2,5}) y que no presentan nivel umbral.

La exposición a corto plazo al NO₂ se ha relacionado con aumentos en todas las causas de mortalidad cardiovascular y respiratoria. Los estudios recientes han proporcionado evidencia que ha fortalecido la asociación con los ingresos hospitalarios y las visitas a departamentos de emergencias por enfermedad respiratoria, incluidas todas las causas respiratorias, asma y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC).

Los estudios de niños con asma, muestran asociaciones entre el NO₂ y las reducciones en la función pulmonar, el aumento de la tos, el asma nocturna y el ausentismo escolar. También se ha observado un aumento de los síntomas en niños asmáticos y aumentos en la inflamación y la hiperreactividad de las vías respiratorias.

Los estudios epidemiológicos de los efectos a largo plazo de la exposición al NO₂ sobre la mortalidad (causas respiratorias y cardiovasculares) y sobre los síntomas respiratorios y la función pulmonar de los niños, también respaldan la conclusión de que el NO₂ tiene un efecto sobre la salud independiente de los otros contaminantes.

La exposición a largo plazo al NO₂ se ha relacionado con déficits en el crecimiento de la función pulmonar. También hay una fuerte evidencia de una asociación entre la exposición a largo plazo al NO₂ y la incidencia de asma y sibilancias²⁵. Esta nueva evidencia sugiere que la exposición al NO₂ en realidad puede causar asma, en lugar de sólo exacerbar el asma existente. Esto estaría indicando que el gas podría estar participando en la causalidad de la patología bronquial obstructiva tipo asma.

Sin embargo, a diferencia de la contaminación atmosférica por partículas, que se ha estudiado en detalle, existe una incertidumbre mucho mayor en cuanto al impacto cuantitativo sobre la salud en grandes poblaciones de exposición a largo plazo al NO₂. La evidencia está creciendo, pero aún existe incertidumbre con respecto a los impactos a largo plazo de la mortalidad del NO₂ en comparación con los asociados a las partículas.

Esto se refleja en el informe publicado por el Comité del Reino Unido sobre los efectos médicos de los contaminantes del aire (COMEAP), que señala la falta de consenso dentro del comité. En particular, con respecto a la causalidad de las asociaciones de NO₂ con la mortalidad, la interpretación de los resultados de modelos de múltiples contaminantes en estudios de cohortes y la estimación de la carga de salud de la exposición a largo plazo al NO₂ (COMEAP 2018).

²⁵ Manual MSD: Las sibilancias son sonidos de tono relativamente alto y de carácter sibilante producidos por el movimiento del paso del aire a través de las vías aéreas de pequeño calibre estrechadas o comprimidas. <https://www.msdmanuals.com/es/hogar/trastornos-del-pulm%C3%B3n-y-las-v%C3%ADas-respiratorias/s%C3%ADntomas-de-los-trastornos-pulmonares/sibilancias>

Los nuevos hallazgos acumulados que se resumen en la Tabla 4-1 constituyen información novedosa sobre la variedad de daño sistémico asociado a la presencia de NO₂ como contaminación atmosférica.

En síntesis, en relación con los efectos del NO₂, la información es consistente respecto de los efectos agudos del gas, y hay investigaciones que apoyan la hipótesis de efectos crónicos.

Por efecto agudo, se debe entender que el daño sobre la salud aparece con exposición a corto plazo, generalmente de alta intensidad y dentro de los primeros días de ocurrida la exposición. En general, los efectos agudos son transitorios y la persona recupera la situación basal de salud también en un tiempo acotado, con la excepción de las muertes prematuras. Ellas también son efectos agudos, pero evidentemente son irreversibles.

Los efectos crónicos, aparecen frente a exposiciones bajas, relativamente continuas y repetidas en el tiempo, esto es, más de 12 meses de exposición, a veces más, y dan origen a una condición crónica, es decir, una patología irreversible.

Los efectos intermedios, pueden aparecer en relación con exposiciones repetidas, pero no continuas, y demoran su resolución más allá de treinta días.

Ninguno de los criterios temporales antes descritos es absoluto, y dependiendo de características individuales de las personas, pueden verse modificados.

La Tabla 4-2 siguiente cataloga los efectos observados frente a la exposición a NO₂, en agudos, intermedios y crónicos. También se presenta el descriptor de ellos, según lo establecido por la Décima Clasificación Internacional de Enfermedades CIE-10.

Tabla 4-2: Clasificación de efectos observados frente a la exposición a NO₂. También se presenta el descriptor de ellos, establecido por la Décima Clasificación Internacional de Enfermedades CIE-10.

Nombre	Tipo de Efecto	CIE-10
Cardiovascular		
• Mortalidad CV	Agudo	I00-I99
• Hipertensión	Agudo	I10
• Crisis Hipertensiva	Agudo	I10.10
• Arritmia	Agudo	I47-I49
• IAM	Agudo	I21-I23
• AVE	Agudo	I60-I69
Respiratorio		
• Mortalidad Respiratoria	Agudo	J00-J99
• IRA alta	Agudo	J30-J39
• Neumonía	Agudo	J09-J19
• Exacerbación del Asma	Agudo	J45.21
• Asma	Crónico	J45.0-J45.9
• EBOC/EPOC	Crónico	J40-J44

Nombre	Tipo de Efecto	CIE-10
Otros		
• Depresión	Crónico	F30-F39
• Malformación Congénita	Crónico	Q00-Q99
• Parto Prematuro	Intermedio	P07.1
• Bajo peso de Nacimiento	Intermedio	P05.1
• Diabetes	Crónico	E10-E14
• Parkinson	Crónico	G20

Fuente: elaboración propia

4.3 Efectos de la exposición a Ozono

Los principales efectos sobre la salud asociados con la exposición al O₃ se dan en el tracto respiratorio. El mecanismo por el cual el O₃ afecta el tracto respiratorio, incluye:

- la formación de productos de oxidación secundaria en el pulmón,
- activación de reflejos neurales,
- inicio de inflamación,
- alteraciones de la función de barrera epitelial,
- sensibilización del músculo liso bronquial,
- cambios en la inmunidad, y
- remodelación de las vías respiratorias.

La inflamación sistémica y el estrés oxidativo también pueden ser críticos para los efectos del O₃ en el sistema cardiovascular.

Las revisiones más recientes realizadas por agencias internacionales como la OMS (2013b), USEPA (2016) y COMEAP (2015) han investigado la evidencia sobre los efectos a largo y corto plazo del O₃ en la salud.

Las revisiones de la evidencia a corto plazo han encontrado que hay nueva evidencia sobre los efectos a corto plazo, asociados con concentraciones diarias máximas de O₃ de 1 hora y 8 horas, con todas las causas de mortalidad, mortalidad cardiovascular y respiratoria, así como ingresos hospitalarios cardiovasculares y respiratorios (OMS, 2013; USEPA, 2013; COMEAP, 2015).

La base de evidencia de los efectos a largo plazo del O₃ también se ha fortalecido, en particular, por los aumentos en la incidencia del asma y los impactos en el crecimiento de la función pulmonar.

En resumen, los estudios internacionales han proporcionado evidencia de que la exposición prolongada al O₃ está relacionada causalmente con la mortalidad y la morbilidad principalmente por causas respiratorias. Existe alguna evidencia de que la exposición al O₃ también se asocia con resultados cardiovasculares, pero la evidencia no es tan sólida como la de los resultados respiratorios.

La exposición prolongada al O₃ está relacionada con la incidencia de asma y no sólo con la exacerbación del asma existente. También se encontró que el O₃ está asociado con una variedad de efectos reproductivos y de desarrollo que no se habían relacionado previamente con la exposición a este compuesto.

Actualmente, no hay evidencia convincente de un umbral para la exposición a corto plazo a una concentración máxima diaria de O₃ de 1 hora u 8 horas, o de una relación no lineal a concentraciones bajas. La evidencia con respecto a los efectos a largo plazo del O₃, llevó a la USEPA (2013) a considerar el establecimiento de un promedio estacional a largo plazo para el O₃. Otras agencias, como la OMS (2013b), han notado la evidencia emergente en torno a los efectos a largo plazo, pero concluyeron que la evidencia no es suficiente para establecer una guía o estándar.

En síntesis, los estudios disponibles en este momento no son suficientes para la determinación de una función dosis-respuesta a largo plazo sólida para usar en una evaluación de riesgos para la salud.

4.4 Efectos de la exposición a NO₂ en Chile: evidencia

La situación de calidad del aire en Chile respecto del dióxido de nitrógeno, ha sido poco evaluada y existen escasas publicaciones respecto de ella. Como se ve en el análisis previo, los niveles actuales en las localidades en donde se mide el contaminante, si bien cumplen la norma vigente en Chile, podrían producir riesgo para la población, según se documenta a continuación.

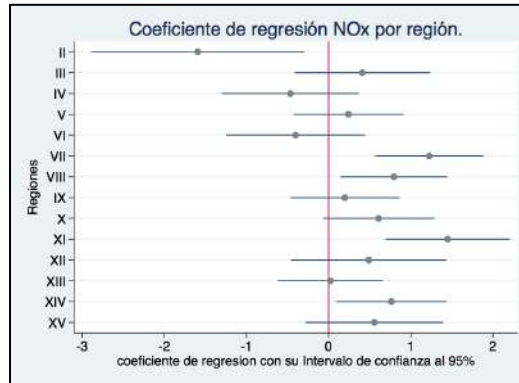
Un estudio recientemente publicado (Dales, 2020)²⁶ muestra la asociación entre la contaminación del aire y la hospitalización de pacientes con una enfermedad respiratoria crónica, denominada Fibrosis Pulmonar Idiopática (FPI), en la Región Metropolitana. Niveles del orden de 43.4 ppb promedio anual de valores diarios (24 horas) de NO₂, están asociados con hospitalizaciones por FPI. Se observó un riesgo relativo (RR) de 1.44 (IC 95% 1.09-1.92), el que se mantuvo estadísticamente significativo ajustado por la presencia de los otros contaminantes (MP₁₀, MP_{2,5}, O₃, CO y SO₂).

El estudio de Salgado (Salgado, 2020)²⁷ evaluó el impacto de las emisiones de NO_x sobre la salud cognitiva de niños en Chile, y encontró riesgo significativo de rezago psicomotor en menores en las regiones del Maule, Biobío, Los Ríos y Aysén. En este estudio, el riesgo asociado estadísticamente al contaminante, se muestra mediante modelos ajustados por la presencia de particulado fino y respirable, además de variables socioeconómicas, educacionales y de la salud materna que determinan el desarrollo normal de los niños. Los resultados permiten fundamentar la hipótesis de que la contaminación atmosférica asociada a emisiones NO_x produce riesgo al desarrollo normal de preescolares. El gráfico siguiente entrega los resultados de la asociación entre rezago psicomotor y emisiones de NO_x y muestra la distribución del Intervalo de Confianza del coeficiente de regresión en las distintas regiones del país.

²⁶ Dales R, Blanco-Vidal C, Cacmak S. The association between air pollution and hospitalization of patients with Idiopathic Pulmonary Fibrosis in Chile. CHEST 2020.(Article in press).

²⁷ Salgado M. Impacto de la contaminación atmosférica en el diagnóstico del desarrollo psicomotor según región y sexo. Tesis para grado de Magíster en Salud Pública Mención Epidemiología, Universidad Andrés Bello.

Figura 4-1: Coeficiente de Regresión e IC95% para el desarrollo psicomotor y emisiones promedio de NO_x (toneladas/año) por región.



Fuente: Tesis Magíster Epidemiología Marisol Salgado

Otro estudio (Matus y cols.)²⁸ con información de Santiago, Valparaíso y Temuco-Padre Las Casas, coincidentemente con la evidencia internacional, establece una asociación entre niveles promedio de NO₂ y mortalidad total. Las series de datos estudiadas corresponden al periodo 2004-2014, y contemplaron exposiciones de 21.6 µg/m³ [13.9-32.4], lo que estaría provocando un incremento de 0.53 % (0.39-0.67) en las muertes totales por cada 10 µg/m³ de aumento en el NO₂ para un rezago de 1 día.

4.5 Evaluación teórica de la sinergia entre contaminantes

4.5.1 Análisis teórico

Existen distintas perspectivas del fenómeno de interacción (sinergia/antagonismo) entre variables independientes, que explican la aparición de un evento de salud o enfermedad²⁹.

Al interpretar los resultados de los estudios epidemiológicos sobre los efectos en salud asociados con el NO₂, se deben tener en cuenta los vínculos entre el NO₂ en el aire ambiente y otros contaminantes liberados desde las mismas fuentes. En otras palabras, que existe dependencia entre las observaciones de los contaminantes atmosféricos, pues varios de ellos son generados por la misma fuente. Por ejemplo, los gases vehiculares además de NO_x, generan MP_{2,5}, monóxido de carbono e hidrocarburos. Esto hace complejo los análisis estadísticos, y correlaciones simples no permiten asegurar asociación. Por lo tanto, la atribución causal de NO₂ es compleja, ya que las asociaciones epidemiológicas pueden reflejar correlaciones con otros contaminantes en lugar de un verdadero vínculo causal con NO₂.³⁰

²⁸ Publicación en preparación, esta información es parte de un trabajo colaborativo en 398 ciudades y 22 países en el que participa Patricia Matus.

²⁹ Victor J Schoenbach 12. Multicausalidad: Modificación del Efecto. <http://www.epidemiolog.net/es/endesarrollo/Multicausalidad-ModificacionDelEfecto.pdf>

³⁰ DLA Environmental Services Australia Appendix B: Health risk assessment.

En la mayoría de los estudios, las concentraciones ambientales de NO₂ se correlacionan de manera moderada a fuerte con los contaminantes atribuibles a emisiones vehiculares, como el monóxido de carbono (CO) y las partículas finas (PM_{2.5}), y no tanto con los contaminantes que son de naturaleza más regional (por ejemplo, ozono) o que provienen de otras fuentes (por ejemplo, dióxido de azufre). En estos casos, dióxido de azufre y ozono, la atribución es más sencilla debido a la disminución de la colinealidad de estas variables.

Las correlaciones también son moderadas entre la exposición personal al NO₂ y las concentraciones ambientales o la exposición personal a otros contaminantes relacionados con la combustión en áreas urbanas, en particular CO, PM_{2.5}, hidrocarburos aromáticos policíclicos, algunos compuestos orgánicos volátiles como el benceno y el 1,3-butadieno, y componentes en partículas como el carbono elemental (CE) y el carbono orgánico³¹.

Varios estudios con mezclas de contaminantes describen efecto sinérgico entre el material particulado proveniente de emisiones de diésel y el NO₂. Sin embargo, dicha sinergia ha estado mediada por las concentraciones de material particulado y la co-exposición con NO₂, y no incrementa la respuesta patológica¹⁹, por lo que no existiría sinergia.

En conclusión, no se ha descrito sinergia entre NO₂ y O₃, ni entre NO₂ y SO₂.

4.6 Actualización de funciones dosis-respuesta (fdr) para NO₂

Se llevó a cabo una búsqueda en literatura gris de actualizaciones normativas recientes en países utilizados como referencia³², en la gestión ambiental chilena.

De ellos, Australia y Canadá han desarrollado estudios para la revisión de sus normas de calidad del aire, en particular para NO₂, durante el período de estudio. Estados Unidos no ha presentado variaciones desde la revisión realizada por la Universidad de Chile, en el año 2016.

A continuación, se resumen los procesos llevados a cabo en Australia, Canadá y Reino Unido.

4.6.1 Análisis del Impacto regulatorio: Australia, Canadá y Reino Unido

Australia³³

El enfoque adoptado en el estudio para la actualización del nivel de norma para NO₂ fue consistente con la metodología de establecimiento de estándares, que considera los siguientes pasos principales:

³¹ Santé Canadá *Évaluation des risques pour la santé humaine du dioxyde d'azote (NO₂)*, 2016

³² Aquellos países nombrados en el artículo 11 Normas de Referencia del DS 40/2012. A saber: Alemania, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, España, México, USA, Nueva Zelanda, Países Bajos, Italia, Japón, Suecia y Suiza.

³³ National Environment Protection Council Draft Variation to the National Environment Protection (Ambient Air Quality) Measure for sulfur dioxide, nitrogen dioxide and ozone. Australia, may2019.

- Paso 1: Actualización de efectos sobre la salud
- Paso 2: Revisión de las normas internacionales de calidad del aire
- Paso 3: Normas de calidad del aire propuestas
- Paso 4: Análisis de la calidad histórica del aire
- Paso 5: Proyecciones de la futura calidad del aire.

Esto implicó el desarrollo de proyecciones de emisiones (basadas en tendencias de monitoreo ambiental, inventarios y proyecciones de población), y el modelado de dispersión atmosférica de los escenarios de BAU³⁴ y paquete de reducción de emisiones.

- Paso 6: Evaluación de riesgos para la salud (HRA). Esto implicó la conversión de las concentraciones propuestas en resultados de salud que se utilizaron como insumos para el análisis de costo-beneficio.

También se realizó un análisis general de costo-beneficio³⁵. En este análisis, los tres contaminantes revisados, SO₂, NO₂ y O₃ se consideraron juntos en lugar de individualmente.

Canadá

Health Canada es el organismo responsable de actualizar los antecedentes para la fundamentación de los estándares de calidad del aire, con objetivos de protección de la salud humana en Canadá.

En forma recurrente desarrolla actualizaciones de los impactos de la contaminación atmosférica sobre la salud de la población.

La evaluación cuantitativa de los impactos sanitarios consta de los siguientes componentes:

- Estimación de la exposición a los contaminantes atmosféricos a lo largo de Canadá;
- Estimación de los riesgos sanitarios asociados a la contaminación atmosférica;
- Antecedentes demográficos, que comprenden la distribución por edad y el estado de salud de referencia.

El análisis del impacto atribuible a la contaminación atmosférica se estima a partir de las concentraciones ambientales superiores a las concentraciones naturales (background). El cálculo se realiza por medio de un algoritmo denominado *Air Quality Benefits Assessment Tool*³⁶ (AQBAT).

³⁴ BAU = *Business as usual*

³⁵ Cost Benefit Analysis **Project 501523 File Aaq-nepm-impact-statement-appendix-c.docx 6 July 2018 Revision Final**

³⁶ Judek et al. *Air Quality Benefit Assessment Tool (AQBAT). User Guide- draft*. Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada.2012.

La revisión del año 2019 incluyó además un análisis de las muertes prematuras, los efectos de la morbilidad asociadas a la contaminación atmosférica y la estimación del valor económico de su impacto sanitario³⁷.

Canadá considera que la información epidemiológica nacional e internacional, fundamentan en forma sólida los efectos de los contaminantes material particulado fino (MP_{2,5}), ozono y dióxido de nitrógeno.

Reino Unido

Inglaterra a fines 2019 publicó un trabajo de análisis respecto de las estrategias para mejorar la calidad del aire y estableció los siguientes principios rectores para la gestión de la calidad del aire³⁸:

- Los diferentes contaminantes del aire deben considerarse y abordarse juntos. Rara vez son independientes entre sí, ya sea en su producción o en las exposiciones resultantes. Por lo mismo, las intervenciones para reducir los contaminantes individuales no deben considerarse de forma aislada de otros contaminantes, de lo contrario reducir el daño de uno puede ser contrarrestado por un aumento en otro.
- Las autoridades locales deben trabajar juntas. Los contaminantes del aire no respetan las fronteras y se logran pocos beneficios en reducir la contaminación del aire en un centro poblacional, pero aumentarla en otra parte. Por lo tanto, las autoridades vecinas deben trabajar juntas, especialmente en intervenciones que se aplican a áreas espaciales definidas, como zonas de aire limpio.
- Los individuos necesitan cambiar sus comportamientos para reducir su exposición y así contribuir a la solución del problema.
- Es mejor reducir la contaminación del aire en su origen que mitigar las consecuencias.
- Existe una jerarquía de intervenciones para prevenir, reducir o reemplazar contaminantes. Las actividades para reducir las emisiones tienen la primera prioridad. Acciones para reducir la concentración de los contaminantes es la segunda prioridad, y la evitación individual de la exposición es la tercera.

4.6.2 Funciones dosis-respuesta para NO₂ identificadas en Canadá y Australia

Las actualizaciones llevadas a cabo por Australia y Canadá mantienen una coherencia, fundada en el modelo exposición-efecto, sin embargo, presentan particularidades metodológicas.

Canadá sustenta su evaluación con información de riesgos calculados en todas sus provincias³⁹. Mientras que Australia, al carecer de ella, utiliza información internacional.

³⁷ Health Canada. Health Impacts of Air Pollution in Canada. Estimates of morbidity and premature mortality outcomes, 2019 Report

³⁸ Public Health England Review of interventions to improve outdoor air quality and public health, 2019.

³⁹ WHO, Regional Office for Europe. Health Impacts of Air Pollution in Canada Estimates of morbidity and premature mortality outcomes 2019 Report, 2013.

Las funciones dosis-respuesta (FDR) para el caso de Canadá fueron generadas a partir de datos observados en distintas ciudades del país y corresponden a antecedentes locales. En el caso de Australia para las evaluaciones de riesgo la autoridad adoptó las FDR de la OMS contenidas en el informe del proyecto HRAPIE de 2013⁴⁰. Una traducción completa de los antecedentes relativos a las FDR del HRAPIE se encuentran contenidos en el numeral 13 del presente informe (Anexo 15 del estudio 2016 de la Universidad de Chile).

Canadá evalúa proyectando escenarios demográficos y de situación de salud, además de los de exposición, con los que puede estimar reales impactos sanitarios.

Australia evalúa sobre la base de escenarios de exposición determinados por el grado de abatimiento de las emisiones. Estima para un escenario, sin cambio (BAU) y otro con escenario de paquete de reducción (NSW⁴¹), por lo que prima el componente tecnológico por sobre el sanitario.

La Tabla 4-3 siguiente indica las funciones dosis-respuesta o concentración – respuesta (FDR) usadas para el cálculo de la evaluación del impacto de la regulación del NO₂.

Tabla 4-3: Funciones dosis – respuesta utilizadas para la revisión de los estándares de NO₂, en Canadá y Australia

	Canadá	Australia
Efecto evaluado	Mortalidad todas las causas por exposición aguda Respiratorias	Mortalidad por causas respiratorias
Fuente	Burnett et al (2004)	Health risks of air pollution in Europe (HRAPIE) (WHO, 2013b)
Detalle	Análisis de contaminación en 12 ciudades canadienses, porcentaje exceso de muertes (asociado al promedio de concentración); 1.69% (22.4 ppb); equivale a coeficiente de regresión SE = 0.000748 (0.000249).	Base de datos europea de morbilidad hospitalaria (OMS, 2013f), códigos ICD-9 460-519; ICD-10 códigos J00– J99 ⁴²
Período promedio	24 horas	1 hora
Tipo de regresión	Log (RR) o Log (OR)	RR
Forma	Normal	Sin información
Beta promedio o RR	24 horas promedio anual: 7.48E-04	1 hora: RR: 1.0027 (1.0016–1.0038)
Desviación Estándar de beta	24 horas: 2.49E-04	Sin información

Fuente: Elaboración propia

⁴⁰ Health risks of air pollution in Europe –HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide.

⁴¹ NSW: New South Wales, Jurisdicción de Australia

⁴² WHO. International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems, Diseases of the Respiratory System,

4.6.3 Beneficios calculados en las evaluaciones internacionales recopiladas

Las regulaciones de NO₂ llevadas a cabo por ambos países estudiados evalúan los costos y beneficios de varios contaminantes.

Canadá

Canadá realizó una valoración económica de los impactos sanitarios de la contaminación del aire por MP_{2,5}, O₃ y NO₂⁴³. Ella tomó en consideración los impactos potenciales sociales, económicos y de bienestar público de los impactos sanitarios, incluidos los costos médicos, la reducción de la productividad del trabajo, el dolor y el sufrimiento y las consecuencias de un aumento de los riesgos de defunciones. La Tabla 4-4 muestra la evaluación económica de los efectos sanitarios considerados en el AQBAT de Canadá.

Los beneficios se calcularon sobre los siguientes indicadores:

- Mortalidad general
- Mortalidad por cáncer pulmonar
- Casos de bronquitis en adultos
- Episodios de bronquitis aguda en niños
- Hospitalizaciones cardiovasculares en personas mayores
- Días con síntomas de asma
- Días con síntomas respiratorios agudos
- Días con restricciones de actividad
- Días con restricciones menores
- Atenciones de urgencia cardiovasculares
- Atenciones de urgencia respiratorias

Los costos se calcularon sobre la base **Salario Riesgo (SR)** o **Disposición a Pagar (WTP)**. El primero de los indicadores hace referencia al valor de los ingresos perdidos por enfermedad y el segundo es una metodología cualitativa que consulta sobre la disposición a pagar.

La valoración económica de las muertes prematuras es considerablemente mayor que para otros efectos sobre la salud. El valor central recomendado de una muerte prematura evitada en el contexto de los análisis de políticas es de CAD⁴⁴ 6,500,000 (en dólar canadiense de 2007), según una revisión de estudios canadienses realizada por Chestnut y De Civita (2009). Este valor se basa en análisis que indican que, en promedio, un canadiense estaría dispuesto a pagar alrededor de CAD 65 para reducir el riesgo de muerte prematura en 1 en 100,000. **Disposición a pagar (WTP)**⁴⁵ de CAD 65 por 100,000 canadienses (donde se evita una muerte) es igual al valor de una muerte evitada.

⁴³ Health Canada. Health impacts of air pollution in Canada: estimates of morbidity and premature mortality outcomes, 2019. ISBN: 978-0-660-31165-4

⁴⁴ CAD Dólar canadiense

⁴⁵ WTP: Willingness to pay (disposición a pagar)

El rango para el costo estimado de una muerte prematura se encuentra CAD 3,500,000 como valor más bajo y CAD 9,500,000 como valor más alto. Estos valores representan un rango razonable para un análisis primario y no deben interpretarse como límites inferior y superior (Chestnut y De Civita, 2009). Estos valores no son equivalentes al valor económico de la vida de una persona; más bien, es la suma de valores individuales que los individuos están dispuestos a pagar por pequeños cambios en el riesgo. Según los ajustes al Índice de Precios al Consumidor, el valor de una muerte prematura evitada en 2015 era de CAD 7.4 millones⁴⁶.

Tabla 4-4: Evaluación económica de los impactos sanitarios de la contaminación del aire en Canadá

Endpoint [reference]	Currency year	Source type	Form ^a	Parameter 1 (prob.)	Parameter 2 (prob.)	Parameter 3 (prob.)
Mortality [Chestnut and De Civita 2009]	2007	WTP/WR	Discrete	\$3,500,000 (25%)	\$6,500,000 (50%)	\$9,500,000 (25%)
Chronic exposure lung cancer mortality [Chestnut and De Civita 2009]	2007	WTP/WR	Discrete	\$3,500,000 (25%)	\$6,500,000 (50%)	\$9,500,000 (25%)
Acute respiratory symptom days [Stieb et al. 2002]	1997	WTP	Normal	\$13	\$7	–
Adult chronic bronchitis cases [Krupnick & Cropper 1992; Viscusi et al. 1991]	1996	WTP	Discrete	\$175,000 (33%)	\$266,000 (34%)	\$465,000 (33%)
Asthma symptom days [Stieb et al. 2002]	1997	WTP	Triangular	\$7	\$28	\$120
Cardiac emergency room visits ^b [Stieb et al. 2002]	1997	WTP	Normal	\$4,400	\$590	–
Child acute bronchitis episodes [Krupnick and Cropper 1989]	1996	WTP	Discrete	\$150 (33%)	\$310 (34%)	\$460 (33%)
Elderly cardiac hospital admissions [Stieb et al. 2002]	1997	WTP	Normal	\$5,200	\$610	–
Minor restricted activity days [Stieb et al. 2002]	1997	WTP	Normal	\$22	\$9	–
Respiratory emergency room visits ^b [Stieb et al. 2002]	1997	WTP	Normal	\$2,000	\$210	–
Restricted activity days [Stieb et al. 2002]	1997	WTP	Normal	\$48	\$18	–

Adapted from Judek et al. (2012)

COPD: chronic obstructive pulmonary disease; prob.: probability of value being selected in analysis; WR: wage risk; WTP: willingness to pay

^a For valuations represented by discrete values, parameters 1, 2 and 3 represent low, medium and high estimates, respectively. For valuations represented by normal distributions, parameters 1 and 2 represent the mean and standard error of the estimates, respectively. For valuations represented by triangular distributions, parameters 1, 2 and 3 represent minimum, most likely and maximum values, respectively.

^b Respiratory and cardiac emergency room visits include the costs of subsequent hospital admissions based on the proportion of emergency room visits that result in admission to hospital. Hospital admissions are assigned a value of zero. This avoids double counting of costs.

⁴⁶ Health Canada. Health impacts of air pollution in Canada: estimates of morbidity and premature mortality outcomes, 2019. ISBN: 978-0-660-31165-4

Australia

En Australia se realizó un análisis de costo- beneficio (ACB)⁴⁷ de las normas de gases SO₂, NO₂ y O₃, incluyendo además al MP_{2,5}.

El ACB se realizó para un período de evaluación de 20 años (2021-2040), utilizando una tasa de descuento social central del 7 por ciento (real) y tasas de descuento de sensibilidad del 3 y 10 por ciento (real) según la orientación del gobierno australiano.

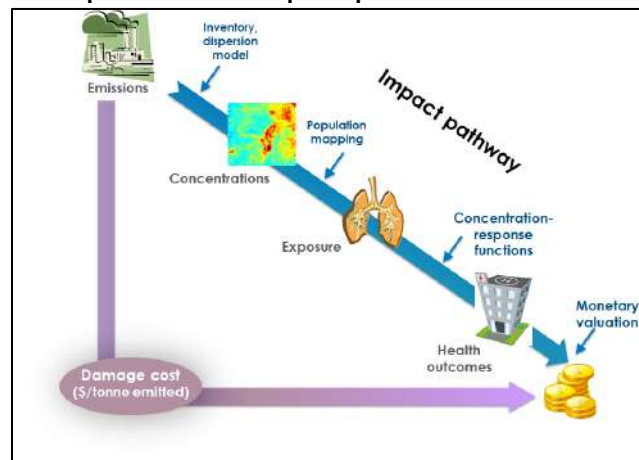
Los costos de las medidas de abatimiento de contaminantes al aire fueron estimados mediante los siguientes pasos:

- 1) Identificación de medidas que se dirigen a las fuentes de emisiones de SO_x, NO_x y CO;
- 2) Selección de un conjunto preferido de medidas utilizando Análisis de Multicriterio (AMC) para seleccionar el escenario de paquete de reducción;
- 3) Estimación de los costos y las reducciones de emisiones para las medidas seleccionadas a través del AMC;
- 4) Cálculo del Valor Presente (PV) de costos por contaminante y jurisdicción para usar el análisis de costo beneficio.

El beneficio de las reducciones de emisiones se estimó en base a una combinación del enfoque de la **vía de impacto**, cuando estaban disponibles los datos requeridos, y el enfoque del **costo del daño** cuando no estaban.

La Figura 4-2 siguiente muestra el enfoque de la vía de impacto utilizada en Australia.

Figura 4-2: Enfoque de la vía de impacto para valorar beneficios en Australia.



⁴⁷ Review of Ambient Air Quality NEPM for SO₂, NO₂ and O₃; Cost Benefit Analysis. EPA Victoria Reference: 501523. Revision: Final501523. Revision: Final. 6 July 2018

La vía del impacto estimó los beneficios asociados con las reducciones en las concentraciones de SO₂, NO₂ y O₃ al considerar:

- La cantidad de emisiones reducidas de SO_x, NO_x y COV (toneladas por año);
- El cambio resultante en las concentraciones de SO₂, NO₂ y O₃ en cada cuenca;
- El cambio resultante en la exposición de las poblaciones a las concentraciones de estos contaminantes;
- La diferencia proyectada en los resultados de salud asociados con ese cambio en la exposición; y
- El valor de esos resultados de salud expresados en términos monetarios.

Los indicadores de salud utilizados incluyeron, como se ilustra en la Tabla 4-5:

- Mortalidad prematura (muertes adelantadas)
- Ingresos hospitalarios relacionados con enfermedades cardiovasculares y respiratorias
- Visitas al departamento de emergencias.

Tabla 4-5: Supuestos económicos para la valoración de los efectos en salud en Australia.

Assumption	Value (2016 prices)	Based on
Value of a statistical life	AUD ⁴⁸ 7.4 m	Access Economics (2008)
Value of a statistical life year	AUD 320,000	Access Economics (2008)
Life years lost due to acute mortality	0.5	DEFRA (2013)
WTP to avoid illness (respiratory)	AUD 431	Access Economics (2008) disability weights
WTP to avoid illness (cardiovascular)	AUD 584	Access Economics (2008) disability weights
Average weekly earnings (AWE)	AUD 1,161	ABS Cat. No 6302 AWE Australia (May 2016)
Hospital stay (respiratory)	3 days	AIHW (2015)
Hospital stay (cardiovascular)	3.8 days	AIHW (2015)
Lost productivity (respiratory)	AUD 697	Calculated based on above assumptions
Lost productivity (cardiovascular)	AUD 871	Calculated based on above assumptions
Hospitalisation cost (respiratory)	AUD 6,595	AIHW (2015)
Hospitalisation cost (cardiovascular)	AUD 6,316	AIHW (2015)
Emergency department visit (asthma)	AUD 807	AIHW (2015)

Fuente: Review of Ambient Air Quality NEPM for SO₂, NO₂ and O₃; Cost Benefit Analysis Cost Benefit Analysis. EPA Victoria EPA Victoria . July 2018

4.6.4 Función dosis respuesta con datos chilenos

El riesgo de sufrir problemas a la salud no depende solamente de la concentración del contaminante, también influyen características de la población tales como su composición demográfica y nivel socio económico; presencia de otros contaminantes y/o factores de riesgo, como el tabaquismo, sedentarismo y obesidad; y de la frecuencia de comorbilidades como la diabetes mellitus y la hipertensión arterial, entre las más importantes. Por lo mismo, las funciones de riesgo varían de una localidad a otra, y en consecuencia son específicas para cada grupo de habitantes en su territorio.

⁴⁸ AUD dollar australiano

Para realizar el ejercicio de calcular una función dosis respuestas con datos chilenos, se utilizó la siguiente información extraída de las bases públicas del Departamento de Estadística e Información del Ministerio de Salud, resultados que forman parte de un artículo en revisión para su publicación en revista internacional⁴⁹:

- Defunciones totales a excepción de causas externas de Región Metropolitana, Temuco, Valparaíso 2005-2013
- Las Variables de exposición: contaminantes atmosféricos y temperatura fueron extraídas de las bases de datos del SINCA

Durante el período de tiempo evaluado ocurrieron 316.800 defunciones en las tres zonas estudiadas.

La Tabla 4-5 resume información descriptiva de las variables utilizadas.

Tabla 4-6: Estadística descriptiva de concentraciones promedios anuales de contaminantes y temperatura, Gran Santiago, Temuco y Valparaíso 2005-2013

Variables	Promedio anual	Percentiles (25-75)
NO ₂ (µg/m ³)	21.6	13.9 - 32.4
MP ₁₀ (µg/m ³)	46.8	34.3 - 70.7
MP _{2.5} (µg/m ³)	21.5	14.2 - 38
O ₃ (µg/m ³)	25.2	13.8 - 33.7
CO (mg/m ³)	0.6	0.3 - 1.1
Temperatura (°C)	13.7	10.7 - 17.2

Fuente: Elaboración propia

Se observó que un aumento de 10 µg / m³ en las concentraciones de NO₂ se asoció con un aumento del 0,46% (IC95: 0,36- 0,57) en la mortalidad total en las 398 localidades estudiadas en el mundo. Para Chile, los valores correspondieron a 0,53% (IC95: 0,39-0,76) y se encuentra en el grupo de países con mayor aumento.

Se calculó la fracción atribuible porcentual (PAF %) del NO₂ en las defunciones totales encontrándose **una función dosis respuesta de 1.13(%) con su IC 95% (0.83 -1.43).**

4.7 Riesgo atribuible a la exposición a corto plazo a NO₂ en sitios seleccionados

Como se estableció en el ítem de efectos a la salud del dióxido de nitrógeno, este contaminante atmosférico provoca efectos agudos y crónicos y no posee nivel umbral.

Si bien en la actualidad se están publicando, efectos sobre las principales enfermedades crónicas no transmisibles (diabetes, depresión y Enfermedad de Parkinson, entre otras) y daño en el embarazo, los efectos dañinos en la salud de la población son principalmente del tipo respiratorio y cardiovascular. Por lo mismo este análisis de riesgo se centrará en el impacto de la exposición sobre la incidencia de patologías respiratorias y la mortalidad.

⁴⁹ BMJ British Medical Journal- ID BMJ-2020-061413

El impacto de una exposición en la salud pública se evalúa estimando su contribución a la incidencia y mortalidad de la enfermedad⁵⁰.

El Riesgo Atribuible es la proporción del impacto sobre la salud (enfermedad o muerte) que puede ser atribuida a la exposición⁵¹. Existen varios indicadores de riesgo atribuibles, sus explicaciones y diferencias exceden este estudio.

A continuación, se muestra la fórmula utilizada para calcular el Riesgo Atribuible a la exposición por NO₂, a partir del Riesgo Relativo dado por la función dosis – respuesta usada.

$$\text{Riesgo atribuible}_{\text{NO}_2} = \text{RR}_{\text{NO}_2} - 1 / \text{RR}_{\text{RRNO}_2}$$

Los Casos Atribuibles se calculan a partir de la siguiente formula:

$$\text{CasosAtribuibles}_{\text{NO}_2 \text{ año } i} = \text{Riesgo atribuible}_{\text{NO}_2} \times \text{Total Casos Observados}_{\text{año } i}$$

Los Riesgos Relativos para efectos agudos utilizados provienen del estudio europeo denominado HRAPIE del año 2013⁵². La Tabla siguiente muestra las funciones dosis respuesta utilizadas.

Tabla 4.7: Funciones concentración respuesta, por tipo de efecto y de exposición a NO₂

Tipo de Exposición NO ₂	Efecto/población	RR (IC95%) por cada 10 µg/m ³
Promedio Máximas de 1 hora (promedio anual de los máximos diarios)	Todas las muertes menos las debido a causas externas	1.0027 (1.0016- 1.0036)
Promedio diario (promedio de valores de 24 horas)	Hospitalizaciones Respiratorias, todas las edades	1.018 (1.0115 -1.0245)
Promedio Anual (promedio de los 365 días)	Crisis Asmáticas en niños 5 a 14 años	1.02 (0.99 – 1.06)

Fuente: Elaboración propia a partir de Estudio HRAPIE-2013

A continuación, se presentan la estimación de los casos atribuibles a la exposición al contaminante NO₂ en el periodo 2016-2018 para las comunas de: Calama, Concón, Quintero, Puchuncaví, Concepción, Comunas de la Región Metropolitana

⁵⁰ Rothman, K; Greenland, S; Lash, T.L *Modern Epidemiology*, 3rd ed.; LW&W: Philadelphia, PA, USA, 2008

⁵¹ Last, J.M. RE: "A dictionary of epidemiology, fourth edition, edited by John M.Last, Robert A. Spasoff and Susan G. Harris. Am. J. Epidemiol. 2001,154,389

⁵² WHO Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide
<https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/health-risks-of-air-pollution-in-europe-hrapie-project.-recommendations-for-concentrationresponse-functions-for-costbenefit-analysis-of-particulate-matter,-ozone-and-nitrogen-dioxide>

Los datos básicos y resultados del cálculo se encuentran tabulados. Las primeras dos columnas contienen los casos de efectos en salud estudiados, con datos obtenidos de la página web del Departamento de Estadísticas e Información de Salud del Ministerio de Salud (DEIS)⁵³:

- Defunciones totales, todas las causas menos las causas externas (DEFTot) para los años 2016 a 2018;
- Hospitalizaciones Respiratorias para los años 2016 a 2018; y
- Atenciones de urgencia por crisis asmáticas en menores de 15 años (CrisisAsma) para los años de estudio

La tercera columna corresponde a las concentraciones de NO₂ utilizadas como exposición característica indicada en la Tabla 4.7. En el caso de las defunciones, se ha utilizado el promedio de los máximos diarios del periodo de estudio; para el caso de las hospitalizaciones se han usado los promedios diarios de cada año y en el caso de crisis asmáticas, el promedio anual.

La sexta columna entrega la estimación de los casos atribuibles, las columnas cuarta y quinta muestran el rango inferior y superior del intervalo de confianza al 95%.

Tabla 4.8: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Calama, y casos atribuibles a exposición de 10 µg/m³ de NO₂, años 2016 a 2018

Efectos	Frecuencia Absoluta	Promedios NO ₂ (**) µg/m ³	Casos Atribuibles (Rango Inf)	Casos Atribuibles (Rango Sup)	Total Casos Atribuibles
DEFTot 2016 (*)	632	50,2	5	11	9
DEFTot 2017 (*)	672	49,4	5	12	9
DEFTot 2018 (*)	680	49	5	12	9
Subtotal	1984		15	35	27
HospResp2016	8884	18,3	185	389	287
HospResp2017	7756	18,3	161	339	251
HospResp2018	9825	16,9	189	397	294
Subtotal	26465		535	1125	832
CrisisAsma<152016	829	18,4	1	86	30
CrisisAsma<152017	1387	17,3	1	136	47
CrisisAsma<152018	1299	16,9	1	124	43
Subtotal	3515		3	346	120
Total	31964		553	1506	979

(*) ajustada a partir tasa regional (**) Datos Estación Centro en Calama

Fuente: elaboración propia

Los casos totales atribuibles a la exposición de NO₂ estimados para Calama en el período 2016-2018 de estudio son 832 hospitalizaciones y 120 crisis de asma y 29 muertes, es decir, un total de 981 casos (IC 95%: 554- 1510).

⁵³ DEIS: Departamento de Estadísticas e Información de Salud, División de Planificación Sanitaria, Subsecretaría de Salud Pública, <https://deis.minsal.cl/>

A continuación, se muestran los resultados para las comunas de Concón, Puchuncaví y Quintero para los mismos años de observación. La Comuna de Puchuncaví no tiene centro de atención de urgencia, por lo que las crisis asmáticas no se pudieron contabilizar. Con probabilidad, los pacientes que requieren atención de urgencia por esta causa acuden a Concón o Viña del Mar, Valparaíso.

En este grupo de comunas se pudo estimar un número total de casos atribuibles en el periodo 2016-2018 a la exposición a NO₂ del orden de 677 (IC 95%: 340-1181).

Tabla 4.9: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Concón, y casos atribuibles, exposición de 10 µg/m³ de NO₂, años 2016 a 2018

Efectos	Frecuencia Absoluta	Promedios NO ₂ (**) µg/m ³	Casos Atribuibles (Rango Inf)	Casos Atribuibles (Rango Sup)	Total Casos Atribuibles
DEFTot 2016 (*)	191	48,4	1	3	2
DEFTot 2017 (*)	204	48,5	2	4	3
DEFTot 2018 (*)	214	52,2	2	4	3
Subtotal	609		5	11	8
HospResp2016	1405	25,7	41	86	64
HospResp2017	988	24,5	28	58	43
HospResp2018	969	25,7	28	60	44
Subtotal	3362		97	204	151
CrisisAsma<152016	692	19,9	1	78	27
CrisisAsma<152017	554	24,4	1	77	27
CrisisAsma<152018	588	25,7	1	86	30
Subtotal	1834		3	241	84
Total	5805		105	456	243

(*) ajustada a partir tasa regional (**) Datos estación Colmo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Puchuncaví, y casos atribuibles exposición de 10 µg/m³ de NO₂, años 2016 a 2018

Efectos	Frecuencia Absoluta	Promedios NO ₂ (**) µg/m ³	Casos Atribuibles (Rango Inf)	Casos Atribuibles (Rango Sup)	Total Casos Atribuibles
DEFTot 2016 (*)	97	60,0	1	2	2
DEFTot 2017 (*)	117	60,0	1	3	2
DEFTot 2018 (*)	125	61,5	1	3	2
Subtotal	339		3	8	6
HospResp2016	785	32,8	29	62	46
HospResp2017	516	32,3	19	40	29
HospResp2018	615	33,8	37	50	37
Subtotal	1916		85	152	112
CrisisAsma<152016		20,4			
CrisisAsma<152017		32,4			
CrisisAsma<152018		33,9			
Subtotal					
Total	2255		88	160	118

(*) ajustada a partir tasa regional (**) Datos estación La Greda

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Quintero, y casos atribuibles exposición de 10 µg/m³ de NO₂, años 2016 a 2018

Efectos	Frecuencia Absoluta	Promedios NO ₂ (**) µg/m ³	Casos Atribuibles (Rango Inf)	Casos Atribuibles (Rango Sup)	Total Casos Atribuibles
DEFTot 2016 (*)	198	86,1	3	6	5
DEFTot 2017 (*)	196	33,7	1	2	2
DEFTot 2018 (*)	176	33,5	1	2	2
Subtotal	570		5	10	9
HospResp2016	2220	32,6	82	173	128
HospResp2017	1772	16	32	68	50
HospResp2018	1428	15,1	25	52	38
Subtotal	5420		139	293	216
CrisisAsma<152016	816	33,4	1	154	53
CrisisAsma<152017	628	16,0	1	57	20
CrisisAsma<152018	594	15,0	1	51	18
Subtotal	2038		3	262	91
Total	8028		147	565	316

(*) ajustada a partir tasa regional (**) Datos estación Quintero Centro

Fuente: elaboración propia

En la comuna de Concepción no hay valores de exposición a NO₂ disponibles para el año 2016, por carecer de dichas mediciones. Sin embargo, se pudo estimar un número total de casos atribuibles en el periodo 2017-2018 (defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas) del orden de 1111 (IC:5% 624-2375), mayor que en los casos de Calama y Concón-Puchuncaví y Quintero. Esto se explica por la mayor cantidad de población expuesta, más que por presentar concentraciones más elevadas del gas.

Tabla 4.12: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la comuna de Concepción, y casos atribuibles exposición de 10 µg/m³ de NO₂, años 2017 y 2018

Efectos	Frecuencia Absoluta	Promedios NO ₂ (*)	Casos Atribuibles (Rango Inf)	Casos Atribuibles (Rango Sup)	Total Casos Atribuibles
DEFTot 2017	1447	35,6	8	18	14
DEFTot 2018	1388	39,6	9	20	15
Subtotal	2835		17	38	29
HospResp2017	13142	20,6	308	647	252
HospResp2018	12822	20,4	297	626	462
Subtotal	25964		605	1273	714
CrisisAsma<152017	5076	20,6	1	592	205
CrisisAsma<152018	4084	20,4	1	472	163
Subtotal	9160		2	1064	368
Total	37959		624	2375	1111

(*) Datos estación Kingstone College

Fuente: elaboración propia

El ejercicio para la Región Metropolitana incluye las comunas de Santiago, Las Condes, Cerrillos, Cerro Navia, Independencia, La Florida, Pudahuel, Puente Alto, Talagante y El Bosque. Este conjunto de comunas concentra a 2.415.125 habitantes y los niveles más altos de exposición al NO₂ del país. Consecuentemente,

acumulan casos atribuibles a dicha exposición del orden de 11.686 casos totales con un rango que va desde 9.241 a 24.649.

Tabla 4.13: Casos de defunciones, hospitalizaciones y crisis asmáticas observadas en la Región Metropolitana, y casos atribuibles exposición de 10 µg/m³ de NO₂, años 2016 a 2018

Efectos	Frecuencia Absoluta	Promedios NO ₂ (*)	Casos Atribuibles (Rango Inf)	Casos Atribuibles (Rango Sup)	Total Casos Atribuibles
DEFTot 2016	1532	79,5	159	357	268
DEFTot 2017	1495	75,7	154	346	260
DEFTot 2018	1591	79,6	163	365	274
Subtotal	4618		476	1069	802
HospResp2016	20399	41,0	1035	2177	1609
HospResp2017	26870	42,7	1075	2262	1672
HospResp2018	23519	46,0	1175	2472	1828
Subtotal	70788		3285	6911	5110
CrisisAsma<152016	3623	40,4	1797	5466	1893
CrisisAsma<152017	3442	42,2	1770	5385	1865
CrisisAsma<152018	3307	45,6	1913	5820	2016
Subtotal	10372		5480	16670	5775
Total	85778		9241	24649	11686

(*) Datos estación Parque O'Higgins, Independencia, Las Condes, La Florida, Cerro Navia, Cerrillos, Pudahuel, Puente Alto, Talagante y El Bosque

Fuente: elaboración propia

Como se aprecia en los cálculos realizados, el número absoluto de casos atribuidos son mayores, a niveles de exposición más altos y obviamente a mayor población expuesta. Para comparar se calcularon las tasas por cien mil habitantes que se presentan en la Tabla 4-16.

Tabla 4.14: Síntesis comparativa de Riesgo Atribuido a exposición de NO₂

Efectos Periodo 2016-2018	Número de casos Atribuibles					
	Calama	Concón	Puchuncaví	Quintero	Concepción	Comunas seleccionadas en RM
Población	165731	42152	18546	21144	223574	2.415.125
DEF Tot Subtotal	27	8	6	9	29	802
Hosp Resp Subtotal	832	151	112	216	714	5110
CrisisAsma<15 Subtotal	120	84	N.A.	91	368	5775
Total	979	243	118	316	1111	11687
	Tasas de Casos Atribuibles (*)					
DEF Tot Subtotal	16	19	32	43	13	33
Hosp Resp Subtotal	502	358	604	1022	319	211
CrisisAsma<15 Subtotal	72	199	N.A.	430	165	239
Total	591	576	636	1495	497	484

(*) Tasas por cien mil habitantes= (N° eventos/población)*100.000

Fuente: elaboración propia

Se observa que la tasa más alta de defunciones asociada a la exposición a NO₂ se encuentra en la comuna de Quintero (43 por cien mil) y la segunda en la Región Metropolitana y Puchuncaví (33 y 32 por cien

mil respectivamente), siendo la más baja Concepción (13 por cien mil). En el resto de las comunas consideradas en este ejercicio, está en el rango de 16 a 19 por cien mil habitantes.

Es interesante notar que la comuna de Quintero también exhibe las tasas más altas de casos atribuibles a NO₂ de ingresos hospitalarios (1022 por cien mil) y por crisis de asma (430 por cien mil), superando a la RM y al resto de comunas, que registran niveles ambientales similares o superiores de NO₂. Esto estaría indicando mayor riesgo en dicha población frente a la exposición al gas

Por otra parte, las tasas más bajas de casos atribuibles para defunciones, e ingresos hospitalarios están en Concepción, y para el caso de las crisis de asma en Calama.

4.8 Riesgo atribuible a la exposición a corto plazo a dióxido de nitrógeno observado en comunas de la región Metropolitana seleccionadas y con función dosis-respuesta chilena

Como se ha planteado con anterioridad, los riesgos son específicos para cada población, por lo que los casos atribuidos a la exposición por dióxido de nitrógeno variarán en función del cambio de parámetros de estimación.

La tabla siguiente compara las estimaciones de casos atribuibles utilizando una función dosis respuesta global, producto de metaanálisis como es la función calculada en el proyecto HRAPIE de la Unión Europea, con la función calculada con datos chilenos.

Tabla 4.15: Comparación de casos atribuibles con funciones de riesgo de Europa y Chile

Efectos	Frecuencia Absoluta	Promedio NO ₂	FUNCIÓN EUROPEA (*)			FUNCIÓN CHILENA (**)		
			Casos Atribuibles	Límite Inf	LímiteS up	Casos Atribuibles	Límite Inf	LímiteS up
DEFTot 2016	12526	79,5	268	159	357	1125	827	1424
DEFTot2017	12755	75,7	260	154	346	1091	801	1381
DEFTol 2018	12784	79,6	274	163	365	1150	845	1455
Totales	38065		802	476	1069	3366	2473	4260
Diferencia						+ 2564		
Razón						4.19		
%						419%		

Nota:
 (*) Riesgo Atribuible HRAPIE = 0,00269273 (IC95: 0,001597444-0,003587086)
 (**) Riesgo Atribuible CHILE= 0,0113 (IC95: 0,000083- 0,000143)

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar al aplicar la función de riesgo chilena, los casos atribuibles al NO₂ aumentan en forma considerable, cuatro veces comparado con los casos atribuibles con la función de riesgo de Europa. Esto refleja el mayor riesgo existente en Chile.

¿Por qué Chile presenta mayor riesgo? Es posible plantear varias hipótesis que expliquen estas diferencias. Si bien el dióxido de nitrógeno es el mismo en ambas partes, la población es distinta. En Chile existe alta prevalencia de factores de riesgo que pueden volver más susceptible a la población, tales como el tabaquismo y la obesidad, y en el ámbito de la contaminación atmosférica la población chilena está expuesta además a elevadas concentraciones de material particulado y otros contaminantes. También se puede plantear que el acceso a la atención de salud puede estar más limitada en nuestro país que en Europa, todos estos factores pueden explicar la mayor mortalidad relativa causada por la exposición a este gas en la población chilena.

4.9 Actualización de los valores de la Guía metodológica del Ministerio del Medio Ambiente

El Ministerio de Medio Ambiente ha establecido una guía metodológica para la elaboración de los Análisis del Impacto Económico y Social (AGIES) de los instrumentos de gestión de la calidad del aire. Dicha guía tiene dos versiones una del año 2013 (Guía 2013)⁵⁴ y otra del año 2015 (Guía 2015)⁵⁵.

Las observaciones siguientes están dirigidas a la Guía 2015, en el entendido que la Guía 2013 no estaría vigente.

La guía metodológica del año 2015 es un instrumento teórico, que enfatiza como herramienta esencial del análisis económico para la toma de decisión en materia de regulación ambiental, la metodología de **Análisis Costo-Beneficio**.

La guía ha introducido aspectos muy interesantes respecto de las externalidades de la regulación, como son los denominados Criterios Transversales: equidad ambiental, perspectiva de género, sensibilidad cultural y cambio climático. Sin embargo, la guía no avanza en su aplicación, centrandose toda la información y ejemplos básicamente en evaluar el costo de las medidas de reducción de emisiones.

Respecto de la valoración de los beneficios, se minimizan los beneficios en salud, entregándose más ejemplos y valores respecto de co-beneficios económicos de actividades agrícolas, que son ganancias colaterales de la reducción de emisiones, que los propiamente en salud.

La gestión de la calidad del aire vigente en el país tiene por objetivo de protección la salud pública, pues las normas primarias de calidad ambiental han dado origen a todos los planes de descontaminación. Nada se ha regulado, a excepción de los olivos en Huasco, respecto del impacto secundario de la contaminación. La guía centra la evaluación del beneficio de dicha gestión en aspectos subsidiarios a los directamente relacionados con salud pública, como son por ejemplo el impacto sobre la agricultura y la visibilidad.

Llama la atención que, en el análisis del impacto económico y social de los instrumentos de gestión de la calidad del aire, se reduzcan los efectos en salud a la disposición a pagar, por una parte y a los costos de

⁵⁴ Ministerio del Medio Ambiente. Guía metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire, 2013

⁵⁵ Ministerio del Medio Ambiente. Guía metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES)2015

la enfermedad valorados teóricamente según datos internacionales, que no reflejan costos y beneficios en el país.

Existe literatura nacional respecto de ellos, el sesgo de usar información principalmente proveniente de Estados Unidos puede provocar una distorsión importante para la toma de decisión nacional.

En Estados Unidos (USA) no existe el concepto de salud pública, sus instrumentos de gestión y toma de decisión lo reflejan. Predomina el paradigma individual, es decir, cada individuo se debe hacer cargo de sus problemas en salud, los que son satisfechos por agentes privados. Por lo mismo, el método de *disposición a pagar* es válido para ese contexto.

Mientras que en Chile, y en numerosos otros países, claramente existe un modelo mixto de atención de salud en el que prima la salud pública (aproximadamente 80% en modalidad institucional, municipal y dada por servicios de salud), por sobre la atención privada (20% de cobertura de las ISAPRES), los costos en salud se encuentran regulados, y las garantías explícitas son un instrumento esencial.

Por lo anterior, un instrumento de gestión ambiental, ya sea norma primaria de calidad del aire y/o plan de prevención y/o descontaminación, debiera ser capaz de analizar los costos que implicará en las atenciones garantizadas, a lo menos, para otorgar al análisis un contexto de realidad nacional.

Si bien la Guía 2015 presenta una síntesis que menciona valores y costos en salud, no se aprecian valores propiamente tal, que pudieran ser actualizados con información reciente, tal como se ilustra en la Tabla 4-5 (Tabla 4-16 de este documento) y la Tabla 9-2 (Tabla 4-17 de este documento).

Tabla 4-16: Efectos en Salud

Tipo de efecto (endpoint)		Causa específica (endpoint)	Disponibilidad de valores (WTP, COI)	
Muerte Prematura		Todas las causas	WTP	
Enfermedad		Bronquitis crónica	WTP	
Acciones Médicas	Admisiones hospitalarias	Enfermedad cardiovascular	WTP	
		Asma	WTP	
		Arritmia	COI	
		Asma	WTP	
	Visitas a la sala de emergencia	Causas respiratorias	WTP	
		Neumonía	COI	
		Enfermedades respiratorias bajas-RSP	COI,WTP	
		Síntomas respiratorios altos-RSP	COI, WTP	
	Enfermedad		Ataques asmáticos	COI, WTP
			Bronquitis aguda	WTP
Días de actividad restringida		Días de trabajo perdido (WLD)	COI	
		Días de actividad restringida (RAD)	WTP	

WTP (Willingness to Pay/Disposición a pagar) y COI (Cost of Illness) explicados en la apartado 9.1.3
Fuente: Elaborado en base a Cifuentes, Krupnick et al. (2005)

Fuente: Guía metodológica MMA, 2015

Tabla 4-17: Resumen de los costos valorados monetariamente en la literatura

Ítem	Contaminante	Costo
Salud pública	Monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos nitrosos, hidrocarburos, compuestos volátiles orgánicos, material particulado, ozono, smog, plomo, ruido.	Pérdida de vidas humanas (valor estadístico de la vida), salarios hedónicos, disminución en la esperanza de vida (disposición a pagar), costos de atenciones de salud de urgencia, costos de tratamientos de largo plazo.
Productividad laboral	Monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos nitrosos, hidrocarburos, compuestos volátiles orgánicos, material particulado, ozono, smog, plomo, malos olores, ruido.	Pérdida de horas-hombre trabajadas, pérdida de salarios percibidos.
Productividad agrícola	Monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos nitrosos, hidrocarburos, compuestos volátiles orgánicos, material particulado, ozono, lluvia ácida, clorofluorocarbonos, efectos invernadero.	Reducción de la producción, reducción de la superficie utilizable, costo de restauración de biomasa, costos por tiempo perdido.
Daños al Ecosistema		Pérdida de biodiversidad, contaminación local, acidificación de suelos, acidificación de agua, pérdida de espacios habitables.
Estructura e Infraestructura	Ozono, smog, material particulado, lluvia ácida.	Pérdidas de vida útil, costo de restauración o protección, costo de reemplazo
Valores de la Propiedad	Ruido, material particulado.	Pérdida de plusvalía, costo de relocalización, pérdida de rentas.
Actividad comercial	Construcción y mantenimiento.	Reducción de la producción.
Actividades recreacionales		Ingresos perdidos, baja en asistencia, pérdida de renta de equipos, disposición a pagar.

Fuente: Guía metodológica MMA, 2015

No obstante lo anterior, la Guía 2013 presenta funciones dosis-respuesta en la Tablas 11-4 para O₃, y Tabla 11-5 para NO₂, (corresponde a la Tabla 4-18 de este documento), pero resultan estar desactualizadas, por lo mismo, se requieren valores más actuales para funciones dosis-respuesta referentes al NO₂.

**Tabla 4-18: Funciones Concentración Respuesta para la exposición a O₃, SO₂ y NO₂ de la Guía
Metodológica 2013 de MMA
SO₂ y NO₂**

Tipo Efecto	Efecto	Causa	Cont.	Grupo Edad	Métrica	β	Sigma Beta	Inc por 10 ug/m ³	Fuente
Acciones Médicas	HA	RSP	SO2	65+	Media 24h	0,0008	0,00046	0,8%	Schwartz et al. (2003)
			NO2	65+	Media 24h	0,0032	0,00173	3,3%	Fung et al. (2006)
	ERV	ASTH	SO2	0-14	Media 24h	0,0050	0,00901	5,1%	Wilson et al. (2007)
			SO2	65+	Media 24h	0,0110	0,01402	11,6%	Wilson et al. (2007)
Restricción Actividad	EA	SLD	NO2	4-12	Media 24h	0,0140	0,01055	15,0%	O'Connor et al. (2008)
	MRAD	Tos	NO2	7-14	Media 24h	0,0157	0,01122	17,0%	Schwartz et al. (1994)

Ozono

Tipo Efecto	Efecto	Causa	Grupo Edad	Métrica	β	Sigma Beta	Inc por 10 ug/m ³	Fuente
Mortalidad Prematura	Mortalidad Prematura	Todos	Todos	Media 24h	0,0015	0,00040	1,50%	Bell et al. (2005)
					0,0015	0,00040	1,51%	Bell et al. (2005)
Acciones Médicas	Admisiones Hospitalarias	RSP	65+	Media 24h	0,0027	0,00139	2,70%	Schwartz (1995)
			Todos	Media 24h	0,0025	0,00072	2,53%	Burnett et al. (1999)
			Todos	Media 24h	0,0030	0,00111	3,05%	Burnett et al. (1999)
			Todos	Media 24h	0,0020	0,00052	2,02%	Burnett et al. (1999)
			Todos	Media 24h	0,0017	0,00103	1,71%	Burnett et al. (1999)
	Visititas Salas Emergencia	ASTH	Todos	Máxima 8h	0,0009	0,00053	0,90%	Peel et al. (2005)
Restricción Actividad	SLD		0-17	Máxima 8h	0,0082	0,00463	8,50%	Gilliland et al. (2001)
	MRAD		18-64	Máxima 1h	0,0022	0,00067	2,20%	Ostro and Rothschild (1989)
						0,00066	2,22%	Ostro and Rothschild (1989)

Fuente: Guía metodológica MMA, 2013

Por lo anterior, se sugiere utilizar la información de FDR más reciente utilizada en las evaluaciones de norma realizadas por Australia en el año 2019, la contenida en el proyecto HRAPIE(2013), y referencialmente la de Canadá, para NO₂ y Ozono contenidas en la Tabla 4-3 anterior para mortalidad respiratoria.

Tabla 4-19 Síntesis de recopilación de Funciones Dosis Respuesta para exposición a NO₂ y O₃ recomendadas para actualizar Guia Metodológica 2015

Contaminante	NO ₂	O ₃	NO ₂
Efecto evaluado	Mortalidad, todas las causas por exposición aguda Respiratorias		Mortalidad por causas respiratorias
Pais/Año/Publicación	Canadá, 2019	Health Canada. Health impacts of air pollution in Canada: estimates of morbidity and premature mortality outcomes, 2019 report.	Australia, 2018
Fuente	Burnett et al. (2004) Resultados de un modelo con cuatro gases (CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂) realizado por R.T Burnett, adicionales a los resultados publicados		Health risks of air pollution in Europe (HRAPIE) (WHO, 2013b)
Detalle	Análisis de contaminación en 12 ciudades canadienses.		Base de datos europea de morbilidad hospitalaria (OMS, 2013f), códigos ICD-9 460-519; ICD-10 códigos J00- J99 [1]
Período promedio	24 h	1 h	1h
Tipo de regresión	Log(RR) or Log(OR)		RR
Forma	Normal		Sin información
Beta promedio o RR	7.48E-04	8.39E-04	1.0027 (1.0016-1.0038)
Desviación Estándar de beta	2.49E-04	1.36E-04	Sin información

4.10 Análisis de compatibilidad entre tasas de incidencia base mortalidad y morbilidad.

El Departamento de Estadísticas e Información (DEIS) del Ministerio de Salud elabora bases de datos públicas que entregan toda la información requerida para realizar los estudios necesarios para fundamentar científicamente los niveles de riesgo históricos y actuales de la contaminación atmosférica.

Las unidades territoriales van desde la comuna (menor unidad) al nivel regional, pasando por un nivel intermedio que corresponde a los espacios territoriales de los 29 servicios de salud del país.

La unidad temporal menor es el día, también se cuenta con la semana epidemiológica.

La limitante para calcular funciones concentración-respuesta está dada por la cobertura de las estaciones de medición de calidad del aire.

Respecto de los tipos de efectos, DEIS entrega bases de datos sobre:

- Defunciones totales, por sexo, edad, y causas específicas
- Hospitalizaciones por sexo, edad y causas específicas
- Atenciones de urgencia por grupo etario, totales y por causas respiratorias totales y específicas; cardio-vasculares, totales y específicas; y causas externas

Todos los efectos son compatibles con las dosis-respuestas reportadas, el vocabulario común es la Décima versión de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-10) de la OMS⁵⁶. La Tabla 4.2 muestra los efectos agudos y crónicos de la exposición a NO₂ y su respectiva clasificación.

Para la actualización de la norma primaria para NO₂ se sugiere valorizar los siguientes beneficios, y utilizar coeficientes de riesgo calculados en Chile.

- Mortalidad general (exceptuando las causas externas)
- Hospitalizaciones cardiovasculares en personas mayores
- Hospitalizaciones respiratorias
- Atenciones de urgencia cardiovasculares
- Atenciones de urgencia respiratorias

⁵⁶ https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=9178:2013-actualizaciones-cie-10&Itemid=40350&lang=en

5 EMISIONES DE NO_x PARA ZONAS DEL ESTUDIO

5.1 Aspectos generales de las emisiones de NO_x

Los NO_x juegan un rol importante en la calidad del aire, son precursores en reacciones fotoquímicas secundarias en la atmósfera, que resultan en la formación de ozono y aerosoles, entre otras especies.

En el ámbito de la contaminación atmosférica, los óxidos de nitrógeno (NO_x) son fundamentalmente emitidos como resultado de la quema de combustibles fósiles (por ejemplo, petróleo y derivados, carbón mineral, gas natural), y no fósiles (por ejemplo: leña, carbón vegetal, biomasa), tanto en procesos antropogénicos como naturales. También son emitidos, pero en menor medida, en procesos biológicos asociados a actividad microbiana en suelos fertilizados para agricultura.

Las emisiones de NO_x corresponden a una mezcla de dos especies, óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), en general con una proporción mayor de NO, que posteriormente se convierte a NO₂ por oxidación en la atmósfera en escalas de tiempo del orden de minutos⁵⁷.

NO_x térmico se produce a altas temperaturas, normalmente por encima de 1200°C. Este es el mecanismo de producción principal en la combustión y se genera como oxidación del nitrógeno diatómico (N₂) contenido en el aire.

El NO_x del combustible se produce a partir del nitrógeno contenido en el combustible, cuando reacciona con el exceso de oxígeno en el aire. Como el hidrógeno y el carbono del combustible se oxidan durante la combustión, los átomos de nitrógeno del combustible se liberan como átomos inestables. Una parte se transforma en NO_x y otra parte en nitrógeno molecular. Por ello en el caso de la combustión de petróleo y carbón, donde existen cantidades importantes de nitrógeno es donde se produce una mayor cantidad. En combustibles como el gas natural, que sólo contienen nitrógeno molecular, no se genera.

NO_x instantáneo (prompt NO_x) es formado en la primera fase de la combustión. Se genera al reaccionar el nitrógeno atmosférico con radicales de hidrocarburos existentes en el aire. Generalmente es muy bajo en la mayor parte de procesos industriales.

En relación con la proporción que representa el NO₂ en el total del NO_x emitido primariamente por las fuentes, es decir, la razón NO₂/NO_x en la “boca” de la chimenea o tubo de escape, tiene un amplio rango de valores, los que dependen de la tecnología de combustión, de los niveles de carga y de los dispositivos de control de emisiones presentes. En el caso de las plantas generadoras de energía, un documento técnico del EPRI⁵⁸ sobre un universo de 200 plantas generadoras de distintas tecnologías en Estados Unidos muestra que la proporción NO₂/NO_x es del orden de 2% en calderas a carbón, cerca de 8% en motores de petróleo pesado, 20% en turbinas de ciclo abierto a petróleo diésel y 17% con gas natural,

⁵⁷ Human health risk assessment for ambient nitrogen dioxide, Mayo 2016, Health Canada.

⁵⁸ Phase II Assessment of NO₂/NO_x ratios at fossil fuel power plants, Technical Update, January 2020, Electric Power Research Institute

mientras que en ciclos combinados representa un 50%. En el caso de fuentes móviles⁵⁹, investigaciones realizadas con mediciones en Europa y Estado Unidos muestran que la proporción varía entre 5% hasta 50% en vehículos diésel y es del orden del 30% en vehículos a gasolina. En el caso de la biomasa⁶⁰ la proporción se estima en menos del 10%.

5.2 Emisiones de NO_x a nivel país

Respecto de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) a nivel nacional, la Figura 5-1 elaborada con datos del RETC, evidencia que las principales fuentes corresponden al transporte en ruta, otras industriales, generación termoeléctrica, combustión de leña residencial y la industria de papel y celulosa, (MMA, 2019)⁶¹.

Figura 5-1: Emisiones de NO_x a nivel nacional por tipo de fuente, año 2017



Fuente: Quinto Reporte Estado del Medio Ambiente en Chile 2019. Datos de RETC del año 2017

En forma desagregada, la Figura 5-2 ilustra la distribución de emisiones de NO_x a la atmósfera, en toneladas por año en las distintas regiones del país. Se puede observar que las regiones con mayores emisiones son la Metropolitana y Biobío, con emisiones del orden de 34.000 t/año cada una. Le siguen las regiones de Antofagasta y Valparaíso con emisiones del orden de 20.000 t/año, más atrás las regiones de Magallanes y Los Lagos con emisiones del orden de 14.000 t/año y finalmente el resto de las regiones con emisiones del orden de 5.000 o menos toneladas por año.

Es interesante notar que la importancia relativa del tipo de fuentes emisoras de NO_x cambia en forma significativa entre regiones a lo largo del país, según la población, desarrollo industrial y características geográficas y climáticas. Por ejemplo, en la Región Metropolitana el transporte es largamente la mayor fuente con aproximadamente el 83% del total, la generación termoeléctrica representa un 2%, la quema

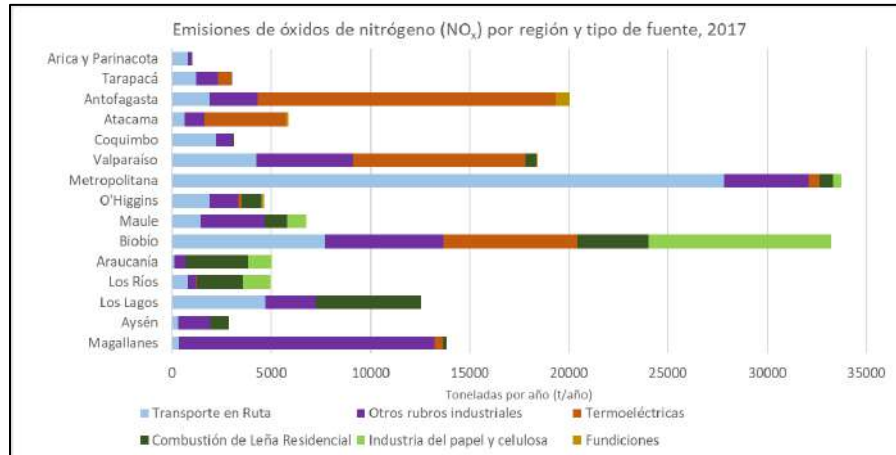
⁵⁹ Emissions of nitrogen dioxide from modern diesel vehicles, G. A. Bishop & D. H. Stedman, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 116

⁶⁰ Chapter 6. Gaseous Emissions from the combustion of Biomass Pellets, WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, Vol 85.

⁶¹ Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente 2019. <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/calidad-del-aire-2/>

residencial de leña 2%, y la industria del papel y celulosa 1%. Mientras que, en la región del Biobío, la industria del papel y la celulosa representan un 28%, el transporte un 23%, la generación termoeléctrica 20%, quema de leña 11%. En la región de Antofagasta, el 75% se explica en generación termoeléctrica, mientras que en la región de Valparaíso el 75% de las emisiones se explica en la actividad de generación termoeléctrica junto con otros rubros industriales.

Figura 5-2: Distribución regional de emisiones atmosféricas de NO_x (toneladas/año), año 2017.



Fuente: Quinto reporte Estado del Medio Ambiente en Chile, 2019. Datos de RETC.

5.3 Consideraciones generales para la elaboración de inventarios de emisiones

Las consideraciones generales para la elaboración y actualización de los inventarios de emisiones en este estudio se refieren a las siguientes:

- Ámbito territorial de las zonas de estudio
- Definición del año base de referencia y
- Conjunto de especies consideradas para el cálculo de emisiones.

El ámbito territorial de las zonas de estudio a nivel de comunas es el siguiente:

- **ZONA 1. CALAMA:** Comuna de Calama,
- **ZONA 2. VALPARAISO INTERIOR:** Comunas Quillota, La Cruz, Calera, Hijuelas, Nogales de la provincia de Quillota, y Comunas Llay Llay, Panquehue y Catemu de la provincia de San Felipe de Aconcagua
- **ZONA 3. CONCÓN-QUINTERO-PUCHUNCAVI:** Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví
- **ZONA 4. CONCEPCIÓN METROPOLITANO:** Comunas de Concepción, Coronel, Chiguayante, Hualpén, Hualqui, Lota, Penco, San Pedro de la Paz, Talcahuano y Tomé, todas ellas de la provincia de Concepción
- **ZONA 5. REGIÓN METROPOLITANA:** Comunas de la Región Metropolitana

Para la definición de las especies a inventariar es pertinente señalar los propósitos de la elaboración de inventarios de emisiones en el marco de este estudio:

- Cuantificar las emisiones de NO_x en cada zona de estudio
- Identificar las fuentes emisoras de NO_x más importantes respecto a su aporte relativo, para efectos de focalizar medidas de control y evaluar los impactos de eventuales reducciones de emisiones.
- Contar con información de especies que permita la realización de una modelación fotoquímica para estimar una relación emisión-concentración, útil para el ejercicio de analizar escenarios regulatorios.

La existencia de redes de monitoreo con mediciones ambientales que cumplen con criterios básicos de representatividad y que son realizadas con métodos estandarizados y validados, dan cuenta del resultado concreto de las emisiones del conjunto de fuentes y la transformación de contaminantes en la atmósfera que finalmente resulta en la calidad de aire ambiental.

El análisis realizado en la sección previa, muestra que la Región Metropolitana actualmente tiene los niveles más altos de NO₂ en el país, con valores cercanos al 50% de la norma vigente, tanto para promedios de una hora como para promedios anuales. Las otras zonas definidas para el estudio se encuentran en tono a un 10% tanto para la norma anual como norma horaria. Sin embargo, en un escenario de norma con niveles más bajos, como el propuesto por la OMS, la RM estaría en condición latencia para norma horaria y en saturación para norma anual, mientras que las otras zonas aproximadamente en el 50% tanto para norma anual como horaria.

Por otra parte, las emisiones que reporta el MMA a través de la información del RETC, muestran que las mayores emisiones también se encuentran en la Región Metropolitana, con una importante participación de las fuentes móviles que abarcan gruesamente el 80% de las emisiones, con el agravante de ser una fuente directa de exposición para las personas. El total de emisiones en la región de Biobío es similar, pero los niveles ambientales son significativamente menores a los observados en la RM.

Considerando que la RM es el caso con los mayores niveles de NO₂ y O₃, junto con las mayores emisiones de NO_x, se enfocarán los esfuerzos de modelación fotoquímica en esta área, por ello la elaboración de inventarios para la RM contendrá las especies necesarias para el modelo fotoquímico CAMx, esto es: CO, COV, SO₂, NO_x y NH₃. En el caso de las otras zonas los inventarios se enfocarán sólo en NO₂.

Respecto del año base, se ha definido el 2017 considerando la revisión de los antecedentes de los inventarios existentes y especialmente de modelación de fuentes móviles, ya que la información para el 2018 de fuentes móviles no se encuentra disponible. También cabe señalar que el año 2019 fue un año anómalo en el último trimestre.

En síntesis, la elaboración de inventarios en este estudio contempla:

- Actualización de un inventario de emisiones para la Región Metropolitana escenario 2017, que considere las fuentes estacionarias de área, puntuales y fuentes móviles, con el propósito de obtener emisiones atmosféricas para modelación fotoquímica, con las siguientes especificaciones:
 - a. Emisiones de CO, COV, SO₂, NO₂ y NH₃
 - b. Ciclos diarios por fuentes
 - c. Para las puntuales: localización altura diámetro velocidad y temperatura de gases
 - d. Para las de área: distribución espacial por tipo
- Actualización de inventarios de emisiones de NO₂ escenario 2017, para las zonas de estudio: Calama, Concón-Quintero-Puchuncaví, valle de Quillota y Gran Concepción.
- Elaboración de criterios y proyecciones a 15 años.

5.4 Recopilación y uso de antecedentes disponibles en inventarios

5.4.1 Antecedentes generales

Los antecedentes de información general usada en la elaboración de los inventarios para todas las zonas contempladas en el estudio se encuentran contenidos principalmente en las siguientes fuentes y estudios:

- Recopilación, revisión y validación de información obtenida desde el Sistema 138⁶², año 2017 para fuentes fijas
- Recopilación, revisión y validación de información base para fuentes móviles y de área que están contenidas en el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC), año 2017 en base al estudio *“Estimación de Fuentes no Puntuales para la Generación del Duodécimo Reporte del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC)”* SISTAM Ingeniería 2018 para la Subsecretaría del MMA. (en adelante “estudio SISTAM RETC 2018”)
- *“Análisis técnico-económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país”*, 2014, GEASUR. (en adelante “estudio GEASUR 2014”)
- *“Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas”*, Departamento de Economía Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente, diciembre 2017. (en adelante “Manual de Inventarios MMA 2017”).

A partir del sistema 138 del MINSAL se obtuvo la información de fuentes fijas declaradas para el período 2017. Se procesaron las declaraciones de fuentes fijas para las comunas de Calama, Quillota, Concón, Quintero, Puchuncaví; las comunas del Gran Concepción y las comunas de la Región Metropolitana

⁶² Declaración de Emisiones de Fuentes Fijas o Formulario 138 (F138), obligación establecida en el D.S. N° 138/2005 del MINSAL

A partir del estudio SISTAM RETC 2018, se obtuvieron las emisiones provenientes de fuentes móviles y de área asociadas a incendios forestales, urbanos, quemas agrícolas y combustión de leña.

5.4.2 Zona 1: Calama

Se calcularon las emisiones de las fuentes fijas de la comuna de Calama para el escenario 2017 a partir de las declaraciones realizadas en el sistema 138 del MINSAL.

La información fue revisada y complementada con lo reportado en el estudio *“antecedentes para elaborar el plan de descontaminación atmosférica de la ciudad de Calama y su área circundante”*, DICTUC Greenlab 2018 para Subsecretaría del MMA, año base 2016. Este estudio también fue utilizado para procesar y obtener las emisiones al año 2017 de fuentes móviles fuera de ruta junto al estudio GEASUR 2014.

En el caso de fuentes de área asociadas a la combustión Residencial de Gas Licuado (GLP), Kerosene y Gas Natural (GN), los niveles de actividad fueron obtenidos de las estadísticas publicadas por la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC), y los factores de emisión de la publicación AP-42 de la EPA; consignados en la metodología contenida en el Manual de Inventarios MMA 2017.

Las emisiones de fuentes móviles en ruta, y de área asociadas a incendios urbanos y combustión de leña fueron obtenidas y procesadas a partir del estudio SISTAM RETC 2018.

5.4.3 Zona 2: Valparaíso interior

Se calcularon las emisiones de las comunas Quillota, La Cruz, Calera, Hijuelas, Nogales de la provincia de Quillota, y las comunas Llay Llay, Panquehue y Catemu de la provincia de San Felipe de Aconcagua con la información de fuentes fijas declaradas al sistema 138 para el período 2017; la información fue revisada y complementada con lo reportado en el estudio *“EVALUACIÓN COSTO MEDIDAS EFECTIVAS PARA DISEÑAR UN INSTRUMENTO DE GESTIÓN AMBIENTAL EN LA ZONA INTERIOR DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO”*; Greenlab 2019 para la Subsecretaría del MMA.

Del mismo estudio se obtuvieron las emisiones de fuentes móviles fuera de ruta complementado con los antecedentes del estudio GEASUR 2014

Los niveles de actividad para calcular las emisiones de la combustión Residencial de Gas Licuado (GLP), Kerosene y Gas Natural (GN) fueron obtenidos de las estadísticas publicadas por la SEC y los factores de emisión utilizados provienen de la publicación AP-42 de la EPA; la metodología utilizada es la contenida en el Manual de Inventarios de Emisiones MMA 2017.

Las emisiones de fuentes de área (Incendios forestales, urbanos, quemas agrícolas y combustión de leña) para el año 2017 fueron obtenidas a partir del estudio SISTAM RETC 2018. Las emisiones de fuentes móviles en ruta fueron estimadas a partir de una metodología top-down que es la usada en el estudio antes citado.

5.4.4 Zona 3: Concón – Quintero - Puchuncaví

Se calcularon las emisiones de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví escenario 2017 a partir del sistema 138 del MINSAL. Lo anterior fue complementado con la información de las planillas del inventario año base promedio 2015-2016-2017; *“IEA, Plan de Prevención y Descontaminación (PPDA) para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví”*, Ministerio del Medio Ambiente 2018, realizado en base a estudio *“Evaluación de medidas costo efectivas para revisar y reformular el plan de ventanas”*, Geoaire Ambiental Ltda., 2015.

Los niveles de actividad para calcular las emisiones de la combustión Residencial de Gas Licuado (GLP), Kerosene y Gas Natural (GN) fueron obtenidos de las estadísticas publicadas por la SEC y los factores de emisión provienen de la publicación AP-42 de la EPA; la metodología utilizada es la contenida en el Manual de Inventarios MMA 2017.

Las emisiones de fuentes de área (Incendios forestales, urbanos, quemas agrícolas y combustión de leña) para el año 2017 fueron obtenidas y procesadas a partir del estudio *“Estimación de fuentes no puntuales para la generación del duodécimo reporte del registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC)”* SISTAM Ingeniería 2018.

Las emisiones de fuentes móviles en ruta fueron estimadas a partir de una metodología top-down que es la usada y aprobada en el estudio antes citado.

Las emisiones provenientes de fuentes móviles fuera de ruta año fueron obtenidas y actualizadas al año 2017 del estudio *“Análisis técnico-económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país”*, 2014, GEASUR.

5.4.5 Zona 4: Gran Concepción

El inventario de emisiones de NO₂ para Gran Concepción fue elaborado íntegramente a partir del estudio *“Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos, desde la Región del Libertador Bernardo O’Higgins hasta la Región de Los Lagos”*, SISTAM Ingeniería 2018 para subsecretaría del MMA.

Junto con lo anterior, se realizó una revisión del estudio *“Actualización del inventario de emisiones atmosféricas de Concepción Metropolitano año base 2013”*, SICAM INGENIERÍA LTDA, 2015, para comparar el universo de fuentes más significativas con el presente estudio.

5.4.6 Zona 5: Región Metropolitana

- Revisión y actualización de información de las planillas con el procesamiento de información del inventario año base 2012, *“Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana”*, 2014, Departamento de Física USACH, con el objetivo de actualizarlas en función de los niveles de actividad para el año 2017.
- *“Generación de Antecedentes Técnicos y Económicos para la Elaboración de Medidas para la Reducción de Emisiones en el Sector Agropecuario, en el marco del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para la Región Metropolitana de Santiago”*, 2016, POCH.
- *“Actualización memoria de cálculo de emisiones aeropuerto Arturo Merino Benítez”*, año 2015”. Preparado por Asesorías Algoritmos para La Dirección de Aeronáutica Civil, octubre, 2016.

Las emisiones de fuentes fijas para las comunas de la RM fueron calculadas a partir de la información del sistema 138 del MINSAL.

En el caso del cálculo de emisiones de fuentes de área, los niveles de actividad para la combustión Residencial de Gas Licuado (GLP), Kerosene y Gas Natural (GN), evaporativas residenciales y comerciales fueron obtenidos de las estadísticas publicadas por la SEC y los factores de emisión provienen de la AP-42 de la EPA; la metodología utilizada es la contenida en el Manual de Inventarios de Emisiones MMA 2017.

Las emisiones de fuentes móviles en ruta y de área asociadas a incendios forestales, urbanos, quemas agrícolas y combustión de leña, fueron obtenidas a partir del estudio SISTAM Ingeniería 2018.

Las emisiones provenientes de crianza de animales fueron obtenidas y actualizadas al año 2017 a partir del estudio *“Generación de Antecedentes Técnicos y Económicos para la Elaboración de Medidas para la Reducción de Emisiones en el Sector Agropecuario, en el marco del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para la Región Metropolitana de Santiago”*, 2016, POCH.

Las emisiones provenientes del Aeropuerto Arturo Merino Benítez fueron obtenidas y actualizadas en base a lo reportado en el estudio *“Actualización memoria de cálculo de emisiones aeropuerto Arturo Merino Benítez, año 2015”*. Preparado por Asesorías Algoritmos para La Dirección de Aeronáutica Civil, octubre, 2016.

Se revisó el estudio *“Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana”*, 2014, Departamento de Física USACH, año base 2012. El inventario de este trabajo cuenta con un número inferior de fuentes fijas consideradas en el actual, probablemente debido al año en que fue realizado. Las emisiones provenientes de fuentes móviles estaban estimadas con una metodología diferente a la usada en los inventarios de emisiones elaborados en Chile y no presentaba trazabilidad de lo reportado.

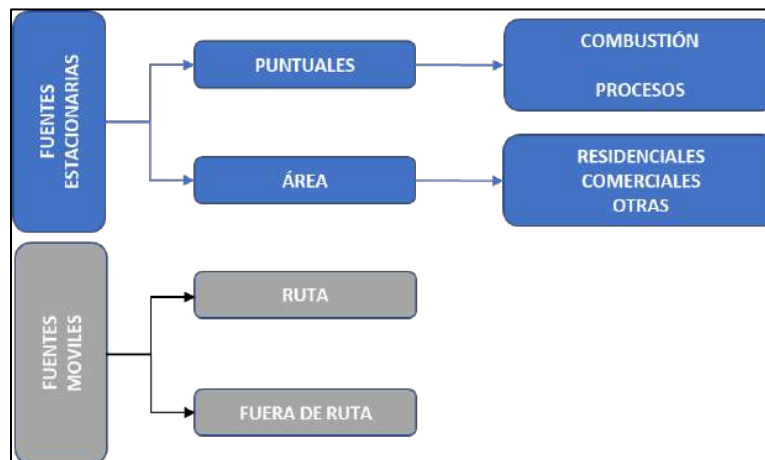
5.5 Estructura de los inventarios de emisiones

La estructura general de los inventarios de emisiones elaborados en este estudio, son asimilables a los esquemas que se proponen en el Manual de Inventarios del MMA 2017 y agrupa los siguientes tipos de fuentes:

- Fuentes estacionarias puntuales: Subgrupo Fuentes de combustión y procesos.
- Fuentes estacionarias de área: Subgrupo residenciales, comerciales y otras.
- Fuentes móviles: Subgrupo en ruta y fuera de ruta.

En la siguiente figura se muestra un esquema por grupo y subgrupo de las fuentes consideradas para la actualización del inventario:

Figura 5-3. Esquema General de clasificación de fuentes para elaboración de los Inventarios



La caracterización de las fuentes se realizó con la información disponible para las áreas comprendidas en el estudio: Calama, Quillota, Concón-Quintero-Puchuncaví, Gran Concepción y Región Metropolitana. Para ello, se utilizaron y compararon los antecedentes de los principales tipos de fuentes de emisión consideradas en los inventarios y estudios revisados, así como los resultados de emisiones de éstos.

Para las emisiones de fuentes estacionarias de área (Evaporativas comerciales y residenciales) se utilizó el Manual de Inventarios MMA 2017, el cual contiene una recopilación metodológica para la estimación de emisiones de los distintos tipos de actividades, con las citas correspondientes a la información de los niveles de actividad de cada tipo de fuente.

La caracterización y levantamiento de la información asociada a los niveles de actividad de los distintos tipos de fuentes permitió realizar el cálculo de las emisiones de NO_x, según la metodología considerada en los inventarios de emisiones previos y en el Manual de inventarios.

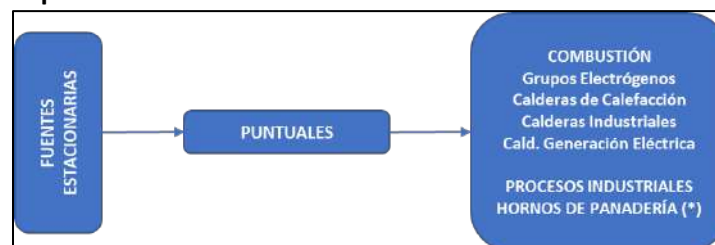
En el caso del inventario de la RM, la caracterización y levantamiento de la información asociada a los niveles de actividad de los distintos tipos de fuentes incluye el cálculo de las emisiones de CO, COV, SO₂, NO_x y NH₃, según las metodologías empleadas en los inventarios de emisiones previos y las planteadas en el Manual de Inventarios del MMA 2017.

En síntesis, la elaboración de inventarios se basó en la recopilación y sistematización de la información disponible de los diversos estudios antes nombrados, considerando las experiencias y conclusiones de ellos.

5.5.1 Fuentes estacionarias puntuales

Para el caso de las fuentes estacionarias puntuales, los tipos de categorías consideradas son los mismos que maneja MINSAL en el F138 (Declaración de Emisiones de Fuentes Fijas Atmosféricas), y se ilustran a continuación.

Figura 5-4. Esquema Fuentes Estacionarias Puntuales Actualización de Inventarios

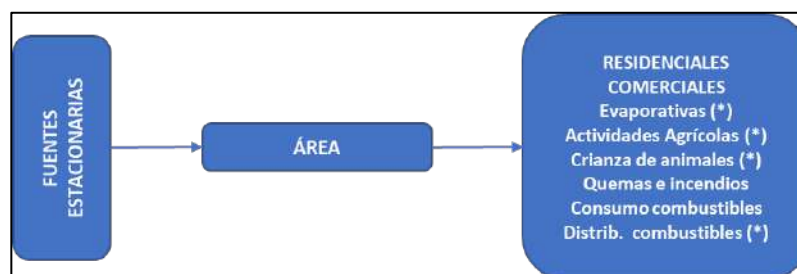


Nota: (*) Los “HORNOS DE PANADERÍA” se clasifican dentro del grupo de fuentes de área (Comerciales).

5.5.2 Fuentes de Área

Para las fuentes de área, las categorías que califican dentro de este grupo son las siguientes.

Figura 5-5. Esquema Fuentes Estacionarias de Área



Nota: (*) Fuentes incorporadas sólo en inventario para RM.

Tabla 5.1: Fuentes estacionarias incorporadas en los inventarios de las zonas de estudio

Grupo	Sub-Grupo	Categoría	Sub-Categoría
FUENTES FIJAS PUNTUALES	Combustión	Combustión interna ⁶³	Grupos electrógenos
	Combustión	Combustión externa puntual ⁶⁴	Calderas (Industriales, Calefacción)
		Combustión externa puntual	Calderas (Generación Eléctrica)
	Procesos	Procesos sin combustión ⁶⁵	Procesos sin combustión
		Procesos con combustión ⁶⁶	Procesos con combustión
FUENTES FIJAS DE ÁREA	Residencial	Combustión externa residencial	Gas Licuado(*)
			Kerosene
			Gas Natural
			Leña
	Comercial	Evaporativas residencial	Uso de solventes (*)
			Pintado arquitectónico (*)
			Fugas residenciales de GLP (*)
			Distribución de combustible (*)
			Lavasecos (*)
			Pintado de vehículos (*)
			Artes gráficas (*)
	Otras	Evaporativas comercial	Aplicación de asfalto (*)
			Fugas comerciales de GLP
			Panaderías
			Quemas agrícolas
Otras	Quemas	Incendios forestales	
		Incendios urbanos	
		Fertilizantes y plaguicidas	
Otras	Actividades agrícolas	Fertilizantes y plaguicidas	

(*) Compilado para la RM

Fuente: elaboración propia

⁶³ Combustión interna: Se refiere a máquinas que obtienen energía mecánica directamente de la energía química del combustible que se quema dentro de la cámara de combustión. Ocurre dentro de la propia máquina

⁶⁴ Combustión externa puntual: Se refiere a máquinas que realizan la conversión de energía calórica a energía mecánica mediante un proceso de combustión que se realiza fuera de la máquina, generalmente para calentar agua que, en forma de vapor, será la que realice el trabajo, o también pueden utilizar gas como fluido de trabajo.

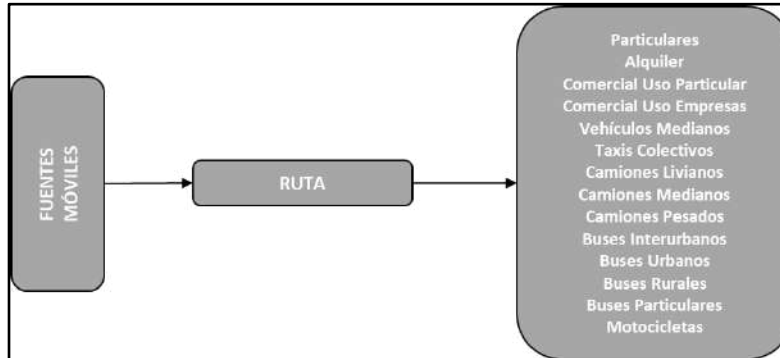
⁶⁵ Procesos sin combustión: Producción de Alimentos, Producción Primaria de Cobre, Fabricación de Hierro y Acero, Fabricación de Molibdeno, Producción Primaria de Oro, Productos de Aluminio, Productos de Cobre y Bronce, Productos de Hierro y Acero, Productos de Plomo, Productos de Magnesio, Productos de Zinc, Productos de Nickel, Fabricación de Asfaltos, Fabricación de Cemento, Fabricación de Cerámicas, Producción de Vidrio, Producción de Yeso, Fabricación de Cal, Refinación de Petróleo, Fabricación de Celulosa y Papel, Fabricación de Productos de Madera, Fabricación de Artículos y Muebles de Madera y Recubrimiento Industrial de Superficies.

⁶⁶ Procesos con combustión: Producción Primaria de Cobre, Fabricación de Hierro y Acero, Productos de Aluminio, Productos de Cobre y Bronce, Productos de Hierro y Acero, Productos de Plomo, Productos de Magnesio, Productos de Zinc, Productos de Nickel, Fabricación de Asfaltos, Fabricación de Cemento, Fabricación de Cerámicas, Producción de Vidrio, Producción de Yeso, Fabricación de Cal, Fabricación de Productos Minerales, Refinación de Petróleo, Fabricación de Celulosa y Papel y Fabricación de Productos de Madera.

5.5.3 Fuentes móviles en ruta

Para el caso de las fuentes móviles en ruta las categorías vehiculares consideradas son las siguientes:

Figura 5-6: Esquema Fuentes Móviles en Ruta

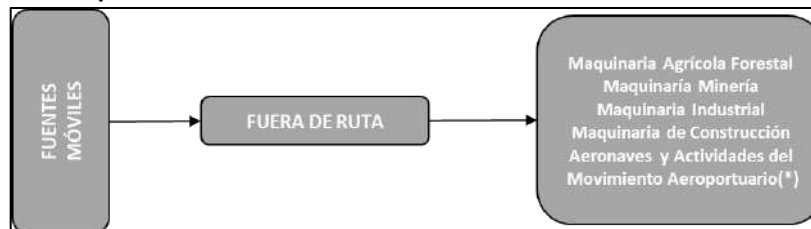


Estas categorías vehiculares corresponden a las consideradas en el estudio: “*Actualización Metodológica MODEM-MODEC para el Gran Santiago*”, año 2010, SECTRA. En este estudio se encuentra una actualización metodológica y de implementación computacional del modelo de cálculo de emisiones vehiculares MODEM y del modelo económico ambiental de planes de desarrollo del Sistema de Transporte Urbano, MODEC.

5.5.4 Fuentes móviles fuera de ruta

En el caso fuentes móviles fuera de ruta los tipos de maquinarias consideradas para la elaboración del inventario de emisiones fueron agrupadas en las siguientes categorías:

Figura 5-7: Esquema Fuentes Móviles fuera de Ruta Actualización de Inventarios



Nota: (*) Fuentes incorporadas sólo en inventario para RM.

Tabla 5.2: Fuentes Móviles inventario

Grupo	Sub-Grupo	Categoría	Sub-Categoría
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles en ruta	Combustión fuentes móviles en ruta	Combustión fuentes móviles en ruta
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Maquinaria vehicular	Maquinaria Agrícola-Forestal, Construcción, Industrial Y Minería.
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Aeropuerto (*)	Aeronaves Flujo Vehicular auxiliar Otras fuentes auxiliares

(*) Aplica a Aeropuerto Arturo Merino Benítez en la RM

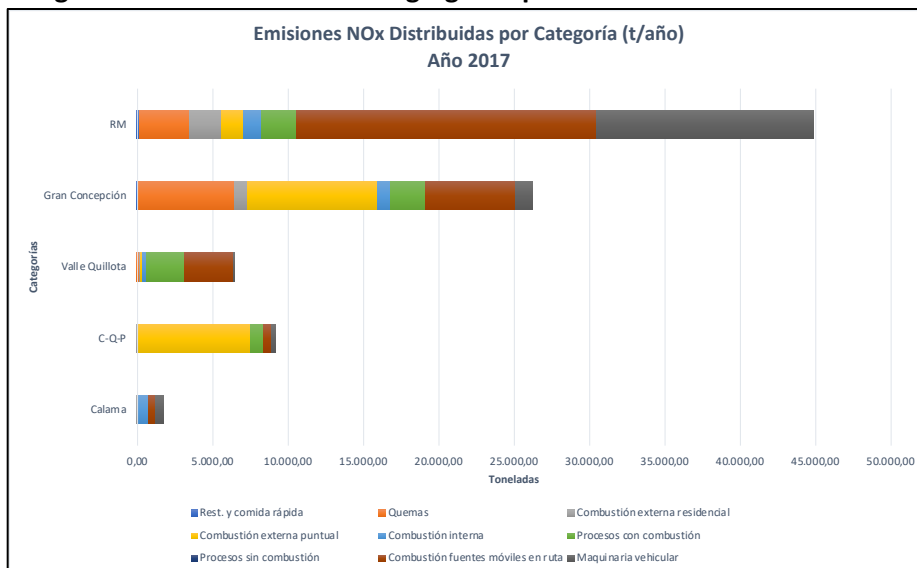
Fuente: elaboración propia

5.6 Resultados de la elaboración de inventarios

Los resultados detallados por fuente y los parámetros específicos de cálculo se adjuntan en planillas en Anexo digital, carpeta “Planillas inventario de emisiones y proyecciones”.

A nivel comparativo entre las zonas analizadas, se observa una estructura muy diversa de las emisiones de NO_x, tanto en términos del volumen anual, como respecto a su distribución entre los distintos sectores, esto último dependiendo fundamentalmente de las actividades económicas, así como de la existencia de grandes fuentes emisoras, tales como la minería o la generación eléctrica. Lo anterior se ilustra en la Figura 5-8.

Figura 5-8: Emisiones de NO_x agregadas para las zonas en análisis. 2017



Fuente: elaboración propia

A continuación, se presenta el resumen de resultados para cada una de las zonas en análisis.

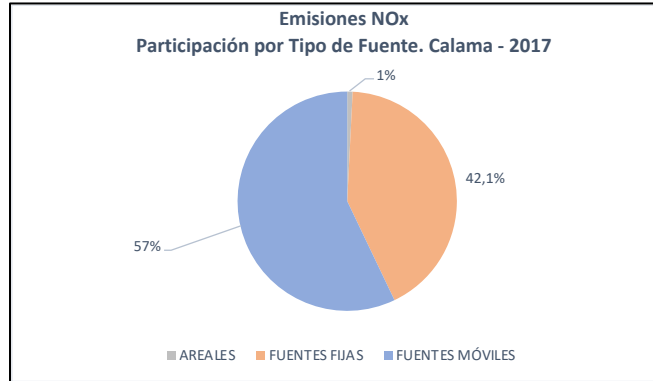
5.6.1 Zona 1: Calama

Tabla 5.3: Síntesis Inventario de emisiones NO_x. Calama (t/año) - 2017.

GRUPO	SUBGRUPO	CATEGORÍA	Ton/año NO _x
AREALES	Comercial	Rest. y comida rápida	1
AREALES	Otras	Quemas	0,18
AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	13
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión externa puntual	63
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión interna	672
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos con combustión	2
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos sin combustión	0
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles en ruta	Móviles en ruta	436
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Maquinaria vehicular	563
Total general			1.749

Fuente: Elaboración propia

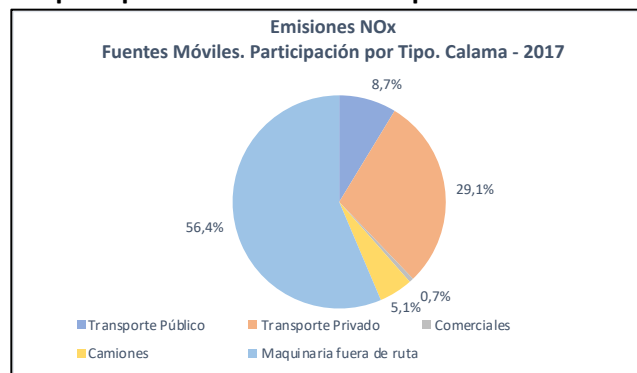
Figura 5-9: Participación por Grupo de Fuentes NO_x. Calama - 2017



Fuente: Elaboración propia

En Calama, el sector transporte es la fuente más relevante de emisiones de NO_x, con un 57% de las emisiones totales, seguido de las fuentes fijas con un 42%. Sin embargo, la mayor relevancia la tiene la actividad fuera de ruta, que corresponde principalmente a la actividad minera, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 5-10: Participación por tipo de fuente en el transporte en emisiones de NO_x Calama - 2017



Fuente: Elaboración propia

En el caso de las fuentes fijas, al no existir grandes emisores, como el caso de las centrales termoeléctricas, son los grupos electrógenos los que tienen una mayor responsabilidad en estas emisiones, con un 91% del total de las fuentes fijas y que corresponde a un 38% de las emisiones totales de la zona, tal como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 5.4: Emisiones de NO_x y participación fuentes fijas. Calama - 2017.

Tipo Fuente Fija	Ton/año NO _x	Participación
Calderas Calefacción	24,88	3,4%
Calderas de generación eléctrica	0,00	0,0%
Calderas industriales	38,34	5,2%
Grupos electrógenos	671,66	91,2%
Procesos con combustión	1,74	0,2%
Procesos sin combustión	0,00	0,0%

Fuente: Elaboración propia

En Calama, en el Anteproyecto de PPDA, con excepción de los límites de emisión de NO_x para calderas nuevas y existentes, no existen medidas específicas de reducción o limitación de las emisiones de éste contaminante.

Un mayor detalle de la composición de estas emisiones se puede obtener de la planilla que se encuentra en Anexo digital, carpeta "Resumen de inventario por zonas/"Resumen emisiones RESTO2017.xlsx".

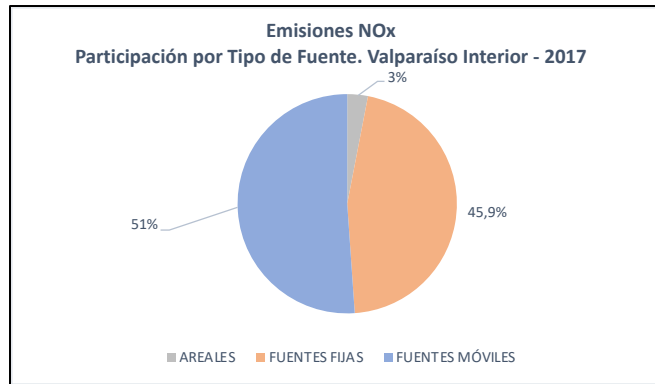
5.6.2 Zona 2: Valparaíso interior

Tabla 5.5: Síntesis Inventario de emisiones NO_x Valparaíso Interior (t/año) - 2017.

GRUPO	SUBGRUPO	CATEGORÍA	Ton/año NO _x
AREALES	Comercial	Rest. y comida rápida	1
AREALES	Otras	Quemas	113,96
AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	81
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión externa puntual	140
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión interna	204
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos con combustión	2.615
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos sin combustión	0
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles en ruta	Móviles en ruta	3.246
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Maquinaria vehicular	50
Total general			6.452

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-11: Participación por Grupo de Fuentes NO_x. Valparaíso Interior - 2017



Fuente: Elaboración propia

En el caso de esta zona, se aprecia la relevancia de las fuentes móviles en particular por las en ruta. Las fuentes areales no son relevantes, pero si las fuentes fijas, de ahí que sea importante su composición para medir el efecto de las centrales de generación eléctrica que se encuentran en Quillota, lo cual se aprecia en el siguiente cuadro.

Tabla 5.6: Emisiones de NO_x y participación fuentes fijas. Valparaíso Interior - 2017.

Tipo Fuente Fija	Ton/año NO _x	Participación
Calderas Calefacción	1,74	0,1%
Calderas de generación eléctrica	0,06	0,0%
Calderas industriales	137,74	4,7%
Grupos electrógenos	204,33	6,9%
Proceso con combustión / Generación eléctrica	1.548,81	52,3%
Otros Procesos con combustión	1.066,52	36,0%
Procesos sin combustión	0,00	0,0%

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia, la generación eléctrica es responsable de parte importante de las emisiones de las fuentes fijas, dada la existencia de las centrales San Isidro y Nehuenco en la Comuna de Quillota, con un 52% de las emisiones de estas fuentes y un 24% del total de las emisiones de NO_x en la zona. Dada la inexistencia a la fecha de un Anteproyecto de PPDA⁶⁷, no es posible hacer una estimación del volumen que cuenta con regulación, con excepción de la generación eléctrica que está sujeta al DS N° 13 del 2011.

Un mayor detalle de la composición de éstas emisiones se puede obtener del la planilla que se encuentra en Anexo digital, carpeta “Resumen de inventario por zonas/“Resumen emisiones RESTO2017.xlsx”.

⁶⁷ A la fecha de elaboración del presente informe, el plazo de elaboración del Anteproyecto se ha ampliado al 30 de abril de 2021. Resolución Exenta 935 del 9/09/2020 del Ministerio de Medio Ambiente.

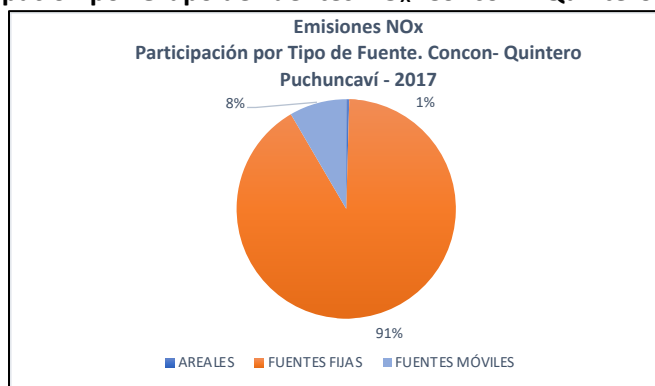
5.6.3 Zona 3: Concón – Quintero - Puchuncaví

Tabla 5.7: Síntesis Inventario de emisiones NO_x Puchuncaví – Quintero – Concón (t/año) - 2017.

GRUPO	SUBGRUPO	CATEGORÍA	Ton/año NO _x
AREALES	Comercial	Rest. y comida rápida	1
AREALES	Otras	Quemas	4
AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	36
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión externa puntual	7.451
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión interna	23
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos con combustión	856
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos sin combustión	1
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles en ruta	Móviles en ruta	521
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Maquinaria vehicular	249
Total general			9.142

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-12: Participación por Grupo de Fuentes NO_x. Concón – Quintero - Puchuncaví - 2017



Fuente: Elaboración propia

En el caso de esta zona, resulta completamente irrelevante el sector transporte a efectos de las emisiones de NO_x, siendo las fuentes fijas las responsables del 91% de las emisiones de NO_x, seguido por el transporte con un 8%.

En este contexto, resulta relevante analizar las emisiones de NO_x de éste sector (fuentes fijas) a efecto de analizar en mayor detalle el origen de las mismas.

Tabla 5.8: Emisiones de NO_x y participación fuentes fijas. Concón – Quintero - Puchuncaví - 2017.

Tipo Fuente Fija	Ton/año NO _x	Participación
Calderas Calefacción	0,13	0,0%
Calderas de generación eléctrica	7.417,91	89,0%
Calderas industriales	33,31	0,4%
Grupos electrógenos	23,47	0,3%
Procesos con combustión	855,16	10,3%
Procesos sin combustión	0,54	0,0%

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia, el 89% de las emisiones de NO_x, de acuerdo a éstos antecedentes provienen de la generación termoeléctrica, y que corresponde al 81% del total de las emisiones de la zona en análisis. De ahí que en este caso, tanto el PPDA como las políticas de descarbonización resultan ser los instrumentos centrales de política pública a efectos de reducir los niveles de emisión de NO_x. Adicionalmente, se debe indicar que las emisiones de la actividad termoeléctrica se encuentra reguladas por el DS N° 13 de 2011 y adicionalmente en ésta zona, el PPDA establece límites a las emisiones anuales de NO_x de ésta actividad, las cuales, de acuerdo a éstos antecedentes, se estarían cumpliendo.

Un mayor detalle de la composición de éstas emisiones se puede obtener del la planilla que se encuentra en Anexo digital, carpeta “Resumen de inventario por zonas/“Resumen emisiones RESTO2017.xlsx”.

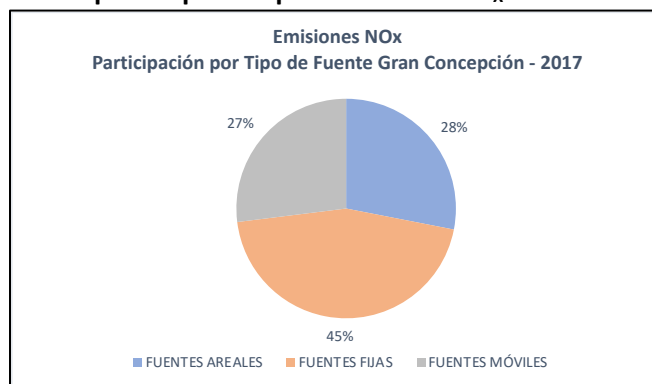
5.6.4 Gran Concepción

Tabla 5.9: Síntesis Inventario de emisiones NO_x Gran Concepción (t/año) - 2017.

GRUPO	SUBGRUPO	CATEGORÍA	Ton/año NO _x
AREALES	Comercial	Rest. y comida rápida	90
AREALES	Otras	Quemas	6.343
AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	911
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión externa puntual	8.599
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión interna	916
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos con combustión	2.212
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos sin combustión	38
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles en ruta	Móviles en ruta	5.931
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Maquinaria vehicular	1.123
Total general			26.163

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-13: Participación por Grupo de Fuentes NO_x. Gran Concepción - 2017



Fuente: Elaboración propia

En este caso, y a diferencia de lo que ocurre en la RM, destaca en hecho que no son las Fuentes Móviles las que participan en una mayor proporción de las emisiones, sino que las Fuentes Fijas, seguido de las Fuentes Areales, por lo que resulta relevante analizar separadamente dichas categorías.

Figura 5-14: Desglose participación emisiones NO_x Fuentes Areales. Gran Concepción – 2017

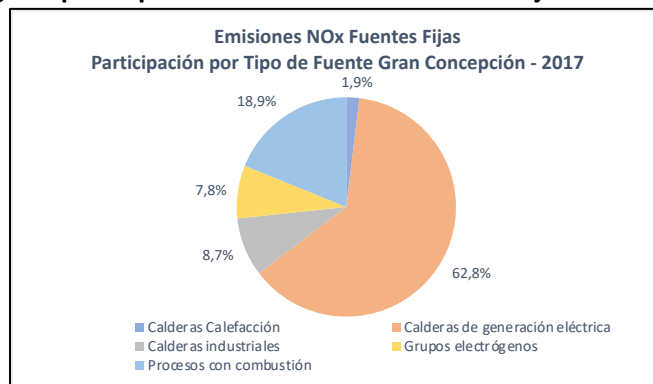


Fuente: Elaboración propia

Como se observa, si bien son las quemas y particularmente los incendios forestales los responsables del 90% de las emisiones de las Fuentes Areales, desde el punto de vista de medidas implementables de reducción directa, es el uso de la leña en el sector residencial la mayor responsable de las emisiones que respecto de las emisiones residenciales representa un 90% y respecto del total de las emisiones de las fuentes areales participa con un 11% (del total de las emisiones es responsable del 3,1%).

En el caso de las Fuentes Fijas, que corresponden a los mayores emisores de la zona con un 45% del total, la situación es más focalizada respecto de las responsabilidades de sectores específicos. En este caso, tal como se aprecia en la siguiente figura, es la generación termoeléctrica la mayor fuente emisora, con un 63% de las emisiones totales de este tipo de fuentes, y un 28% de las emisiones totales de la zona en análisis.

Figura 5-15: Desglose participación emisiones NO_x Fuentes Fijas. Gran Concepción – 2017



Fuente: Elaboración propia

Desde un punto de vista regulatorio, al igual que en el caso de la RM, el Gran Concepción cuenta con normas y metas específicas asociadas a la limitación de las emisiones de NO_x de las fuentes existentes al año 2017, principalmente a través del PPDA del año 2019.

- Uso de leña: Regulada a través de PPDA.
- Calderas: Reguladas a través del PPDA.
- Hornos: Regulados a través del PPDA. Representan aproximadamente un 19% de las emisiones de las Fuentes Fijas.
- Centrales termoeléctricas: Reguladas a través del DS N° 13 de 2011.
- Quemas agrícolas: Regulada a través del PPDA
- Transporte público: Regulada a través del PPDA

Considerando esas medidas y que contienen regulaciones directas a las emisiones de NO_x o indirectas como en el caso de las viculadas a la quema de leña en el sector residencia, y excluyendo el efecto de los incendios forestales, un 27% del total de las emisiones no contiene regulaciones específicas recientes a efectos de la limitación de sus emisiones de NO_x, siendo el sector transporte privado y de carga el más relevante.

Un mayor detalle de la composición de éstas emisiones se puede obtener de la planilla que se encuentra en Anexo digital, carpeta “Resumen de inventario por zonas/“Resumen emisiones RESTO2017.xlsx”.

5.6.5 Región Metropolitana

Tabla 5.10: Síntesis Inventario de emisiones gases y precursores fotoquímicos en RM (t/año) año 2017.

GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	Ton/Año - Año Base 2017					
			CO	COVs	SO2	NOx	NH3	
FUENTES AREALES	Comercial	Evaporativas comercial		36.822				
FUENTES AREALES	Comercial	Restaurantes y comida rápida	44	3	29	101	1	
FUENTES AREALES	Otras	Actividades agrícolas					2.859	
FUENTES AREALES	Otras	Crianza de Animales					14.516	
FUENTES AREALES	Otras	Quemas	71.807	32.210	1.014	3.338	3	
FUENTES AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	70.837	39.412	405	2.144	206	
FUENTES AREALES	Residencial	Evaporativas residencial		44.795				
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión externa puntual	436	94	261	1.482	7	
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión interna	263	88	64	1.150	2	
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos con combustión	5.520	73	628	2.328	1	
FUENTES FIJAS	Procesos	Procesos sin combustión	135	87	0	2	0	
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles en ruta	Móviles en ruta	75.949	655	63	19.992	10.798	
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Maquinaria vehicular	10.254	2.319	40	13.551	3	
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Ciclos LTO Aviones	1.333	201	105	789		
Total general			236.577	156.759	2.609	44.879	28.397	

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-16: Participación de Grupo de Fuentes por contaminante

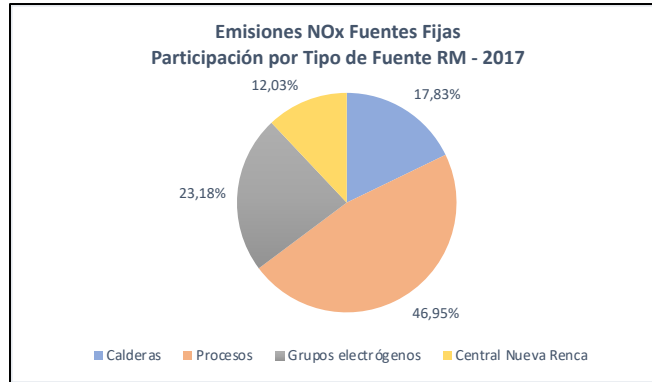


Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la Tabla 5.10, las participaciones relativas de cada uno de los contaminantes es muy variada. Para el caso de los NO_x, la mayor relevancia las tienen las fuentes móviles tanto en ruta como fuera de ruta, que participan con un 76,5% de las emisiones totales. Esto se refleja por cierto en la relevancia que tienen las políticas de transporte en el control de éstas emisiones.

Por otro lado, y siguiendo en el análisis de éste contaminante, el segundo tipo de fuentes lo constituyen las fijas, que participan con un 12,6% de las emisiones totales. En este caso, también existen megafuentes que participan de manera muy relevante en las emisiones totales.

Figura 5-17: Participación por tipo de fuentes fijas en emisiones de NO_x

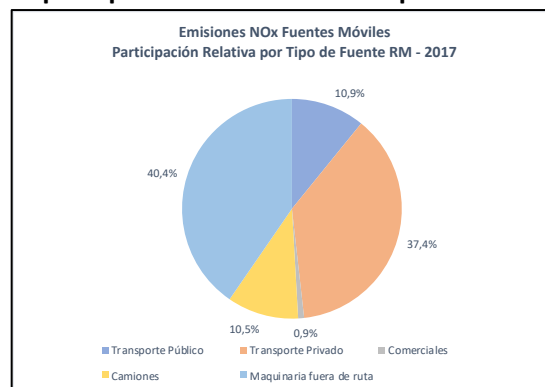


Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la Central Renca participa con un 12% de las emisiones de NO_x de las fuentes fijas, y una parte importante corresponde a “procesos”, que en un 99% corresponde a procesos con combustión. El análisis de la participación de los diferentes tipos de fuentes es relevante pues determina los espacios de regulación a efectos de definir políticas destinadas a reducir las emisiones de éste contaminante en particular.

En el caso de las fuentes móviles, tal como se aprecia en el gráfico siguiente, es relevante la participación del transporte privado, que participa con un 37% del transporte terrestre total y respecto del transporte de personas, contribuye con un 77% de las emisiones totales. Otro tanto contribuye la maquinaria fuera de ruta, que participa con un 40% del transporte terrestre.

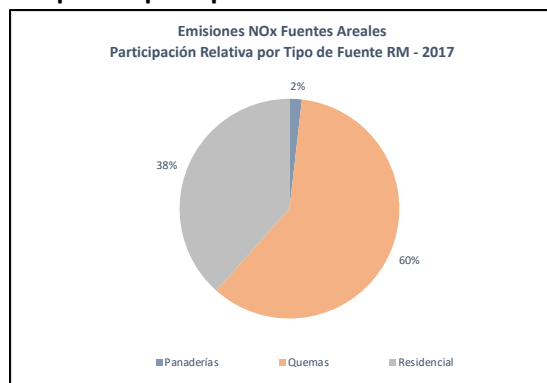
Figura 5-18: Participación por tipo de fuente en el transporte terrestre en emisiones de NO_x



Fuente: Elaboración propia

En el caso de las fuentes areales, las quemas, que corresponde en el análisis realizado a quemas agrícolas e incendios (forestales y urbanos), los que tienen una mayor responsabilidad respecto de los niveles de emisiones de NO_x, lo cual se aprecia en el siguiente gráfico.

Figura 5-19: Participación por tipo de fuentes areales en emisiones de NO_x



Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista de la política pública destinada a reducir emisiones de NO_x, teniendo presente los espacios regulatorios para las fuentes existentes, resulta relevante el análisis de cuales fuentes al año 2017 contaban con regulación y cuales aún no cuentan con una regulación específica. El análisis de los arroja los siguientes resultados respecto a las fuentes existentes al año 2017. Se considerarán medidas específicas destinadas a reducir o mantener el nivel de emisiones.

- Fuentes Móviles Transporte Público: Plan Maestro de Transportes y parcialmente por el PPDA.
- Transporte de carga: Sin regulación específica de reducción
- Transporte privado vehículos livianos y medianos: Regulado en el PPDA
- Maquinaria fuera de ruta: No regulado
- Calderas y proceso con combustión: Regulado por el PPDA a partir del 2020
- Central Renca: Regulada bajo el Decreto 13 que establece límites para emisiones de centrales termoeléctricas.
- Grandes establecimientos industriales: Regulado por el PPDA.
- Grupos electrógenos: Sin regulación directa.
- Areales residencial leña: Regulado por el PPDA.
- Areales residencial otros combustibles: Regulado por el PPDA (calidad de combustibles).
- Quemadas agrícolas: Regulado por el PPDA.

De acuerdo a este análisis, un 24% de las fuentes emisoras existentes al año 2017 no cuentan con una regulación específica tendiente a limitar o reducir sus emisiones. Si bien el porcentaje es alto, si se eliminan las quemadas y las emisiones de los aviones, el porcentaje se reduce tan solo al 12% y que corresponde principalmente a transporte (camiones) y grupos electrógenos (la norma en desarrollo sólo establece requisitos a los equipos nuevos).

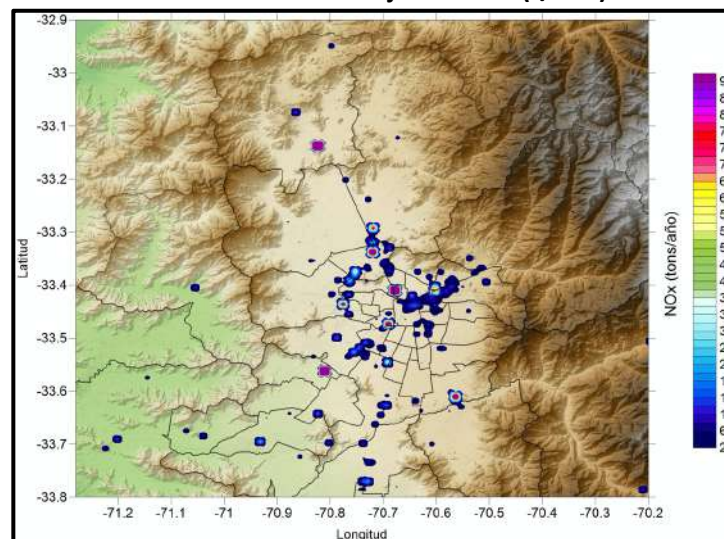
Por tanto, medidas destinadas a reducir las emisiones de NO_x en la RM necesariamente deberán abordar la restricción a fuentes que de una u otra forma tienen una regulación muy reciente para limitación de emisiones de éste contaminante.

Un mayor detalle de la composición de éstas emisiones se puede obtener de la planilla que se encuentra en Anexo digital, carpeta “Resumen de inventario por zonas/“Resumen emisiones RM2017.xlsx”.

En lo que respecta a la distribución a nivel regional de las emisiones en la RM, ellas reflejan de manera muy exacta los resultados que se obtienen del análisis de calidad de aire, tal como se aprecia en las figuras siguientes.

En el caso de las fuentes fijas, ellas se concentran mayoritariamente en el sector centro y norte de la región, lo cual es coincidente con la presencia de establecimientos industriales.

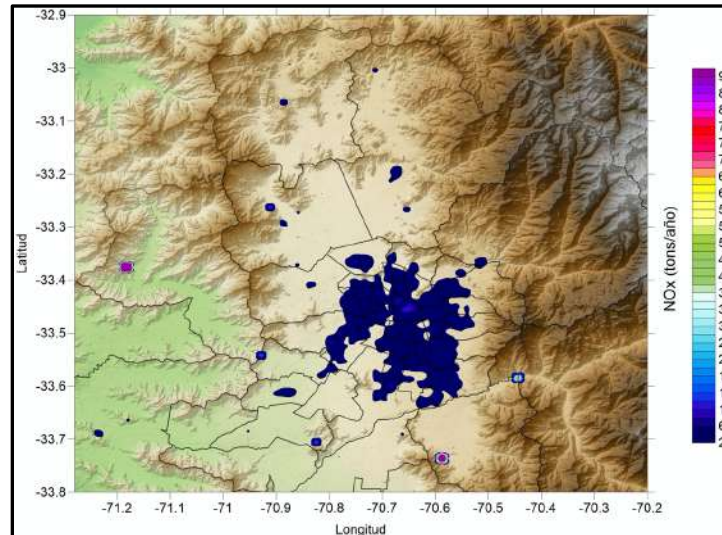
Figura 5-20: Distribución de emisiones de Fuentes Fijas de NO_x (t/año) estimadas en la RM, año 2017.



Fuente: Elaboración propia

En el caso de las fuentes areales, su nivel de distribución refleja que ellas se producen principalmente en los núcleos urbanos, con algunos nucleos de altas emisiones fuera de las zonas urbanas y que deben corresponder a la presencia de grandes incendios forestales.

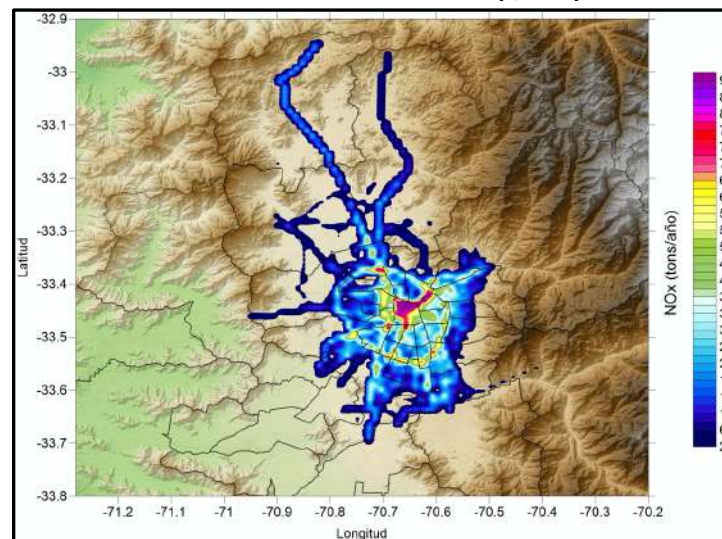
Figura 5-21: Distribución de emisiones Areales de NO_x (t/año) estimadas en la RM, año 2017.



Fuente: Elaboración propia

En materia de emisiones de fuentes móviles, ellas se concentran en la zona centro de la capital, con una proyección hacia el sector poniente como área de mayor emisiones. Lo mismo se observa marcadamente en el anillo Américo Vespucio en el poniente y la proyección hacia las salidas de la capital.

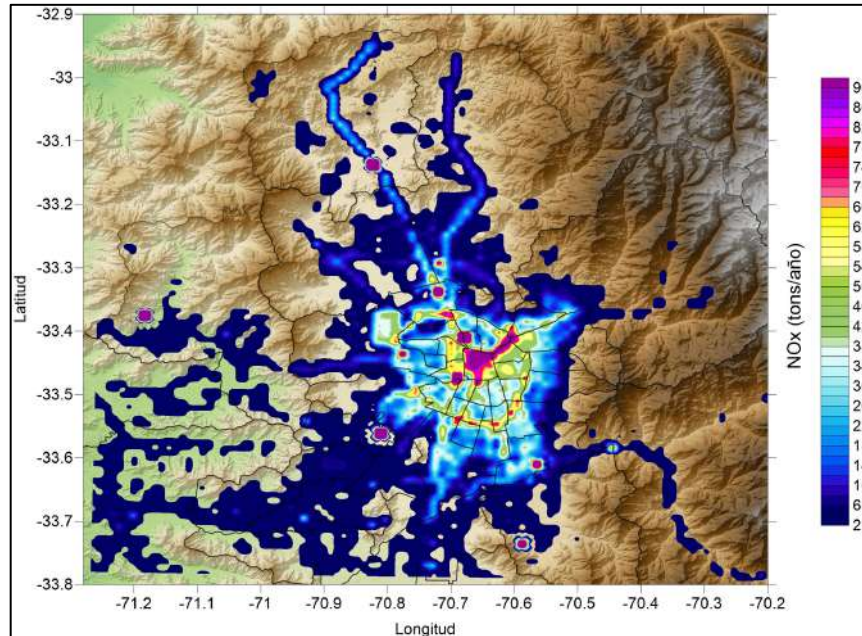
Figura 5-22: Distribución de emisiones de Fuentes Móviles (t/año) estimadas en la RM, año 2017.



Fuente: Elaboración propia

En el análisis del conjunto de las emisiones en la RM, se observa un alto nivel de concentración de las emisiones en la zona central de la región, lo cual es completamente consistente con los niveles de calidad de aire que se observa en las estaciones analizadas previamente.

Figura 5-23: Distribución del total de emisiones de NO_x (t/año) estimadas en la RM año 2017. Incluye Fuentes Estacionarias (Fijas y arerales) y Fuentes Móviles (En ruta y Fuera de ruta).



Fuente: Elaboración propia

5.6.6 Análisis de establecimientos y fuentes relevantes

En el análisis en conjunto de las emisiones de los establecimientos o actividades susceptibles de ser regulados de manera directa, por su calidad de mayores emisores, se observa que ellos representan un universo relativamente pequeño, tan solo el 1,1 % del total de las fuentes a nivel agregado en todas las zonas en análisis y un 57% del total de las emisiones. Gran parte de estos establecimientos ya cuentan con una regulación específica, tal como la generación termoeléctrica o la actividad minera y de refinación de combustible, por lo que en este nivel, el espacio regulatorio se reduce.

La siguiente tabla muestra esta situación, describiendo los grandes emisores, entendiendo por tales aquellos que superan las 5 ton/año de NO_x, con el número de establecimientos y su participación porcentual, tanto respecto del total de establecimientos como del total de emisiones del segmento de fuentes fijas.

Tabla 5.11: Relevancia de los establecimientos emisores superiores a 5 ton/año NO_x

ZONA 1: CALAMA			
Tipo de Fuente	Establecimientos	Emisiones	% Emisiones de Ftes. Fijas
Caldera Calefacción	2	13	1,7%
Grupo Electrógeno	33	520	70,5%
Calderas Industriales	3	32	4,3%
TOTALES	38	564	76,6%
Porcentaje total de fuentes	9%		
ZONA 2: VALPARAÍSO INTERIOR			
Tipo de Fuente	Establecimientos	Emisiones	% Emisiones de Ftes. Fijas
Calderas Industriales	4	118	4,0%
Grupo Electrógeno	6	180	6,1%
Horno Cementero	1	762	25,8%
Proceso. Gen. Eléctrica	3	1.564	52,8%
Otros Procesos con Combustion	1	285	9,6%
TOTALES	15	2.623	88,7%
Porcentaje total de fuentes	12%		
ZONA 3: CONCON - QUINTERO - PUCHUNCAVI			
Tipo de Fuente	Establecimientos	Emisiones	% Emisiones de Ftes. Fijas
Calderas Industriales	8	518	6,2%
Caldera Gen. Eléctrica	4	6.915	83,0%
Hornos	15	260	3,1%
Otros Procesos con Combustion	6	529	6,4%
TOTALES	33	8.222	98,7%
Porcentaje total de fuentes	2%		
ZONA 4: GRAN CONCEPCIÓN			
Tipo de Fuente	Establecimientos	Emisiones	% Emisiones de Ftes. Fijas
Calderas de Calefacción	5	194	1,6%
Grupos Electrógenos	28	725	6,1%
Calderas Industriales	14	245	2,1%
Caldera Gen. Eléctrica	9	7.355	62,0%
Calderas Industriales	35	922	7,8%
Hornos	26	1.420	12,0%
Otros Procesos con Combustion	27	852	7,2%
TOTALES	144	11.713	98,8%
Porcentaje total de fuentes	10%		
ZONA 5: REGION METROPOLITANA			
Tipo de Fuente	Establecimientos	Emisiones	% Emisiones de Ftes. Fijas
Calderas de Calefacción	8	66	1,3%
Grupos Electrógenos	46	381	7,5%
Calderas Industriales	19	288	5,7%
Central Termoelectrica Renca	1	585	11,5%
Hornos Cementera	1	1.050	20,7%
Otros Hornos	11	999	19,7%
Otros Procesos con Combustion	15	230	4,5%
TOTALES	101	3.598	71,0%
Porcentaje total de fuentes	0,36%		

Fuente: Elaboración propia

6 PROYECCION DE INVENTARIOS A 15 AÑOS (2017 – 2032)

Para efectos de la proyección de los inventarios en un horizonte de 15 años, en primer término se requiere definir la línea de base regulatoria que incorpore el conjunto de medidas cuya vigencia es posterior al año 2017, siendo las principales de ellas las siguientes:

- Proyectos de inversión aprobados y en calificación en el SEIA.
- Planes de Descontaminación y Prevención en la zonas de estudio.
- Normas de emisión aprobadas y cuya entrada en vigencia es posterior al año 2017.
- Normas de emisión que se encuentran en estudio.

6.1 Aspectos metodológicos. Proyectos SEIA.

Para proyectar emisiones en cada una de las zonas consideradas para el estudio, se realizó la revisión de los proyectos aprobados y en calificación del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (www.sea.gob.cl) y cuyo proceso de construcción u operación aún no se han iniciado al 2017, de acuerdo a los plazos y cronogramas señalados en los expedientes de evaluación. En esta revisión, se incluyeron todos aquellos proyectos que tenían una emisión anual de NO_x superior de 2 ton/año. En el Anexo digital, carpeta “Memorias Emisiones Proyectos SEIA” se incluyen las memorias de cálculo obtenidas de los expedientes para efectos de la determinación de las emisiones anuales. La fecha de corte de proyectos fue el 30/09/2020 y para efectos de proyección, solo serán considerados los proyectos que se encuentran con una Resolución de Calificación Aprobada.

Los resultados de esta revisión se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 6.1: Proyectos SEIA. Zona 1 Calama

ZONA 1. CALAMA																	
NOMBRE DEL PROYECTO	RCA	Titular	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)														
			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Aumentos Movimientos Mina	235/2020	División Ministro Hales Codelco Chile			289,2	332,7	341,1	351,4	342,0	319,7	319,7	319,7	319,7	319,7	319,7	319,7	319,7
Ajustes Operacionales para MCHS(1)	139/2020	Codelco, División Chuquicamata	17,9	19,7	42,2	43,3	11,6	12,0	11,6	12,0	12,5	11,8	10,6	10,4	8,8		
Estudio Impacto Ambiental Circunvalación Oriente Calama	234/2020	Rutas del Loa Sociedad Concesionaria S.A				50,3	50,9	50,4									
Nueva Línea 2x220 kV S/E Chuquicamata-S/E Calama, tendido primer circuito	212/2019	ENGIE Energía Chile S.A.			85,2												
Subestación Seccionadora Nueva Chuquicamata 220 kv	85/2018	ENGIE Energía Chile S.A.			27,8												
Plan Integral de Sondajes Exploratorios DMH 2019-2029	44/2018	Codelco		0,1	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8			
Optimización Planta Tratamiento Minerales en Pila (PTMP)	66/2019	Codelco Chile, División Chuquicamata		31,1	35,8	35,8	30,7	30,7	30,7	30,7							
Botadero Cerro Turquesa	87/219	Sociedad Contractual Mineral El Abra		63,4	126,5	60,1	126,7	78,7	166,0	82,7	28,3	27,2					
Modificación al proyecto de extracción y movimiento de minerales mina RT(*)	207/2018	Codelco Chile, División Radomiro Tomic	- 3,2	9,4	0,7	2,6	0,9	160,4	169,9	168,3	173,2	177,2	165,3	163,2	168,2	168,2	168,2
Lixiviación de concentrados	276/2017	Ecometales Limited Agencia en Chile	120,0	104,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Explotación Mina Pampita	En. Calif.	Minera del Norte SPA	-	-	-	-	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	123,1	212,1	212,1	211,8	55,1	55,1
Producción de Aridos Eufemia	En. Calif.	Armando Quispe				297,6	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	145,2	220,2	220,2	220,2	85,1	85,1
AUMENTOS DE EMISIONES NUEVOS PROYECTOS CALAMA			134,8	227,6	629,3	844,3	668,7	790,5	827,1	720,2	640,5	826,0	949,8	947,5	930,8	630,1	630,1

Fuente: Elaboración propia en base a información pública de SEIA

Tabla 6.2: Proyectos SEIA. Zona 2. Valparaíso Interior

ZONA 2. VALPARAISO INTERIOR																	
PROYECTO	RCA	Titular	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)														
			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Extracción de áridos río aconcagua	En. Calif.	Sociedad Pétreos					30,7	30,7	30,7	30,7							
Extracción de áridos Santa Elisa, río Aconcagua, Comuna Quillota	031/2018	Aridos Santa Elisa Ltda	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1								
Extracción y procesamiento áridos Maggi	09/2018	Aridos Maggi Ltda	1,4	1,4	1,4												
Ampliación planta de generación eléctrica Biocruz Generacion S.A.	220/2017	Biocruz Generación S.A.	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Continuidad Operativa Tranque de Relaves El Torito Operación Soldado	02/2020	Anglo American Sur S.A.		40,4	115,8	24,2	57,2	17,0	20,8	18,8	19,7						
Proyecto Minero 3H	20/2020	Sociedad Minera 3H Limitada				73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4
Optimización Operacional Planta Catemu	En. Calif.	Compañía Explotadora de Minas SpA					20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	51,0	3,8				
Planta Generadora Tapihue II	27/2018	Tecnored S.A.		7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
AUMENTOS DE EMISIONES NUEVOS PROYECTOS REGION DE VALPARISO INTERIOR			14,0	62,0	137,4	148,5	202,1	161,9	162,7	130,0	130,9	141,6	94,4	90,6	90,6	90,6	17,2

Fuente: Elaboración propia en base a información pública de SEIA

Tabla 6.3: Proyectos SEIA. Zona 3. Concon – Quintero - Puchuncaví

ZONA 3. CONCON - QUINTERO - PUCHUNCAVI																
PROYECTO	RCA	Titular	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)													
			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Tratamiento de gases secundarios del Convertidor Teniente	294/2016	Codelco División Ventanas	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Aumento de Capacidad Fase 2 del Terminal GNLQ	140/2016	GNL Quintero S.A.			3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
PMGD Concon GNL	295/2016	Lipigas S.A.		12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6
AUMENTOS DE EMISIONES PROYECTOS PUCHUNCAVI - QUINTERO - CONCON			4,1	16,7	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2

Fuente: Elaboración propia en base a información pública de SEIA

Tabla 6.4: Proyectos SEIA. Zona 4. Concepción Metropolitano

ZONA 4. CONCEPCION METROPOLITANO																
PROYECTO	RCA	Titular	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)													
			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Terminal de Productos Pacifico	6/2020	COPEC S.A.				2,2	6,5	0,4	8,3	7,5	8,2	8,7	9,8	9,8	9,8	9,8
Planta de Astillado de Madera COMACO S.A. Coronel	140/2019	COMACO S.A.			12,5	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4
Optimización Operacional en Planta Coronel Sur	166/2018	Orizon S.A.				13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9
Planta Peróxido de Hidrógeno - Coronel	310/2018	Solvay Ltda				1,8	3,9	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
Proyecto BioLantánidos	En. Calif.	REE UNO SpA						222,2	222,2	222,2	222,2	222,2	222,2	222,2	222,2	222,2
Planta Bio Energía Los Pinos	65/2018	Bio Energía Los Pinos SpA.	12,7	156,2	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0
Terminal GNL Penco-Lirquen	219/2019	OCTOPUS LNG SpA						803,2	803,2	803,2	803,2	803,2	803,2	803,2	803,2	803,2
Planta elaboradora de peróxido de hidrógeno	268/2020	Eka Chile S.A.						6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
Terminal Marítimo GNL Talcahuano	204/2017	Inversiones GNL Talcahuano SpA		63,4	63,4	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9
Regularización del incremento de capacidad planta refinadora de aceite de pescado	266/2018	Industrial Maule Ltda.				12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
Ampliación planta de congelados, optimización operacionas y sistemas de abatimie	201/2019	Camanchaca Pesca Sur						8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
AUMENTOS DE EMISIONES NUEVOS PROYECTOS GRAN CONCEPCION			12,7	219,6	296,9	391,8	398,1	1.215,8	1.445,9	1.445,2	1.445,9	1.446,3	1.447,4	1.447,4	1.447,4	1.447,4

Fuente: Elaboración propia en base a información pública de SEIA

Tabla 6.5: Proyectos SEIA. Zona 5. Región Metropolitana

ZONA 5. REGION METROPOLITANA																
PROYECTO	RCA	Titular	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)													
			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Centro de Distribución Pudahuel	En. Calif.	Hipermercado Tottus S.A.					25,8	15,3	25,6	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1
Exploraciones Minera Florida	En. Calif.	Minera Florida Ltda					4,2	4,2	4,2	2,3						
Optimización Proceso Productivo Horno 1, Planta Cerro Blanco	680/2019	Cemento Polpaico S.A.			13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
Centro de Producción de Alimentos	1/2019	Hipermercado Tottus S.A.			10,1	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8
Ampliación Planta Fibrocementos	377/2018	Fibrocementos Volcán Ltda				10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Nueva Planta de Cultivo Champiñones Abrantes	325/2019	Champiñones Abrantes S.A.				4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Cogeneración Biogas Mapocho - Trebal	283/2018	Aguas Andina S.A.			5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Nuevas instalaciones en complejo industrial Nos de Empresas Carozzi	49/2018	Empresas Carozzi S.A.			9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Optimización y ampliación de instalaciones Cervecería Chile S.A.	550/2017	Cervecería Chile S.A.			12,3	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9
Planta de reciclaje de aceites, caucho y plásticos fuera de uso	7/2018	Bioenergía SpA	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
Segunda línea de producción y actualización de instalaciones	302/2017	Compañía Industrial El Volcan S.A.			10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Ampliación y reacondicionamiento Laboratorio Sanderson	118/2017	Laboratorio Sanderson S.A.	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Ampliación planta de envases central S.A., Renca	528/2016	Envases Central S.A.		4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Embotelladora CCU Renca	280/2016	Embotelladoras Chilenas Unidas S.A.	44,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3	103,3
AUMENTOS DE EMISIONES NUEVOS PROYECTOS REGIÓN METROPOLITANA			54,6	129,0	180,5	195,8	240,3	229,7	240,1	242,7	240,4	240,4	240,4	240,4	240,4	240,4

Fuente: Elaboración propia en base a información pública de SEIA

6.2 Aspectos metodológicos. Generación Eléctrica.

En el análisis de las fuentes emisoras de NO_x, la generación eléctrica es el sector más relevante en el Gran Concepción, Valparaíso interior y Comunas de Puchuncaví, Quintero y Concón. En estas zonas el retiro programado de las centrales a carbón en el marco de la Política de Descarbonización, es relevante el escenario futuro de emisiones.

A efectos de determinar las emisiones futuras, en primer término, se estableció el nivel de generación de las centrales que se encuentran localizadas en cada una de las zonas en análisis. Para ello, se consideró como una proyección confiable el Escenario A del “Estudio de Operación y Desarrollo del SEN sin centrales a carbón”, año 2019, elaborado por el Coordinador Eléctrico Nacional y sus Bases de Datos. En Anexo digital, carpeta “Estudios de emisiones y calidad de aire analizados”, documento “NAC-07.pdf”, se incluye la última actualización de dicho estudio elaborado el año 2020. Para los años 2018 y 2019 se consideró la generación real de las centrales de generación, puesto que dicha información se encuentra disponible (www.coordinador.cl).

Considerando el retiro programado de las centrales a carbón los resultados fueron los siguientes:

Tabla 6.6: Estimación de generación eléctrica en las zonas seleccionadas

GENERACION ANUAL GW/h																
Central	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
ZONA 2. VALPARAISO INTERIOR																
San Isidro I y II	4.898	3.534	3.626	2.042	927	1.838	2.411	2.397	1.406	1.149	1.418	1.792	2.411	1.760	1.688	1.501
Complejo Nehuenco	4.343	3.873	4.423	120	-	4	1	7	2.818	2.197	2.782	3.381	3.713	3.143	3.164	2.969
TOTAL	9.241	7.407	8.049	2.162	927	1.842	2.412	2.404	4.224	3.346	4.200	5.173	6.124	4.903	4.852	4.470
ZONA 3. CONCON - QUINTERO - PUCHUNCAVI																
Campiche	2.383	1.861	1.595	1.953	1.837	1.810	1.848	1.847	1.893	1.780	1.841	1.842	1.777	1.859	1.818	1.849
Ventanas 1 y 2	2.114	2.010	1.072	2.560	1.699	1.677										
Nueva Ventanas	2.498	2.089	1.693	1.936	1.983	1.733	1.903	1.819	1.818	1.620	1.759	1.749	1.665	1.736	1.790	1.852
TOTAL	6.995	5.960	4.360	6.449	5.519	5.220	3.751	3.666	3.711	3.400	3.600	3.591	3.442	3.595	3.608	3.701
ZONA 4. CONCEPCION METROPOLITANO																
Bocamina	3.281	3.040	2.933	2.830	1.727	934										
Santa María	2.716	2.620	1.934	2.793	2.731	2.503	2.713	2.630	2.725	2.404	2.648	2.643	2.632	2.633	2.650	2.725
Petropower	436	426	392	524	523	513	519	520	480	509	512	513	498	508	509	509
TOTAL	6.433	6.086	5.259	6.147	4.981	3.950	3.228	3.149	3.245	2.884	3.157	3.155	3.145	3.131	3.158	3.234
ZONA 5. REGION METROPOLITANA																
Renca	2.405	848	1.790	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681
TOTAL	2.405	848	1.790	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681	1.681

Nota: En el caso de la central Renca, se optó por proyectar sus emisiones como un promedio de la generación de los últimos tres años (2017 al 2019), puesto que en la proyección del coordinador sus niveles de generación no consideran disponibilidad de gas natural

Fuente: Elaboración propia en base a información pública del Coordinador Eléctrico Nacional

Como se aprecia, y ello se reflejará en las emisiones estimadas, en todas las zonas se produce una reducción muy significativa de la generación esperada, lo cual se debe a múltiples factores, dentro de los cuales los más relevantes lo constituyen el retiro programado de centrales a carbón y la penetración de fuentes renovables en la matriz de generación eléctrica.

Para efectos de la determinación de las emisiones, se efectuó el cálculo para cada una de las fuentes del factor de emisión por MW generado, que se aplicó a la matriz de generación presentada en la tabla anterior (Anexo Digital “Planilla Proyecciones.xlsx”).

6.3 Aspectos Metodológicos. Planes de Descontaminación y Prevención o Anteproyectos.

A efectos de la identificación de medidas de línea de base que tendrán efecto en una reducción o limitación del crecimiento de las emisiones de NO_x en las zonas en análisis, se realizó la revisión de los PPDA (vigentes y anteproyectos), identificando aquellas normas que contemplan una limitación directa y explícita de emisiones de NO_x y que no se encontraban vigente al año 2017. Los PPDA sujetos de revisión fueron los siguientes. En Anexo Digital, carpeta “Normas y planes” se incluyen los textos íntegros obtenidos de <http://planesynormas.mma.gob.cl> a la fecha de la elaboración del presente informe (noviembre 2020).

Tabla 6.7: Planes de Descontaminación y Prevención en las zonas analizadas

Nombre	Contaminante	Cobertura Territorial	Estado
Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitano. D.S. N°6/2018 MMA	Material Particulado MP ₁₀ Material Particulado Fino	Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén, Talcahuano	Vigente Dic. 2019
Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica.	Material Particulado MP ₁₀ .	Provincia de Quillota. Comunas de Catemu, Panquehue, Llaylay	Elaboración
Plan de Descontaminación para la Ciudad de Calama y su área circundante.	Material Particulado MP ₁₀ .	Calama y área circundante	Elaboración
Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica. D.S. N°105/2018 MMA	Material Particulado MP ₁₀ Material Particulado Fino	Concón, Quintero, Puchuncaví	Vigente Dic. 2019
Plan de Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana de Santiago D.S. N°31/2016 MMA.	Material Particulado MP ₁₀ Material Particulado Fino Ozono Monóxido de Carbono	Región Metropolitana	Vigente Nov. 2017

Fuente: Elaboración propia en base a <http://planesynormas.mma.gob.cl>

6.3.1 Zona 1. Calama

Calama y su área circundante cuentan con un anteproyecto de Plan de Descontaminación Atmosférica para dar cumplimiento a los niveles de calidad ambiental establecidos por la norma de calidad ambiental para material particulado respirable MP10 como concentración anual. Dicho anteproyecto ya tiene calidad de Proyecto Definitivo y cuenta con el Pronunciamiento Favorable del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad, por lo que se puede estimar que en los siguientes meses comenzará su vigencia.

El PPDA contempla sólo una medida que se encuentra en la categoría de relación directa, y se trata del establecimiento de límites a las emisiones de calderas nuevas y existentes para los contaminantes MP, SO₂ y NO_x, en todos los rangos de potencia superiores a 1 Mwt.

Los plazos de cumplimiento son los siguientes:

- Calderas nuevas: desde el inicio de su operación
- Calderas existentes: 3 años desde la fecha de publicación del PPDA.

Respecto a este articulado del PPDA y su relación con lo que establecería la norma de calderas en elaboración, ambas regulaciones imponen los mismos límites para las emisiones de NO_x en calderas nuevas. El siguiente cuadro ilustra la comparación entre ambas normas.

Tabla 6.8: Comparación límites emisiones NO_x en calderas. PPDA Calama v/s norma en elaboración.

Potencia Térmica (PT)	Estado Combustible	Calderas Nuevas	
		PPDA	Norma
1MWt>=PT>3MWt	Gaseoso	100	100
	Líquido	200	200
	Sólido	300	300
3MWt>=PT>20MWt	Gaseoso	100	100
	Líquido	200	200
	Sólido	300	300
>=20MWt	Gaseoso	100	100
	Líquido	200	200
	Sólido	300	300

Fuente: Elaboración propia

En términos de la proyección de la Línea de Base de emisiones, considerando que los límites impuestos a las emisiones son los mismos que la norma de calderas, se utilizarán las proyecciones del AGIES, anticipando su inicio de vigencia al año 2021, dado el mayor nivel de avance que presenta el PPDA en su tramitación.

6.3.2 Zona 2. Valparaíso Interior

Valparaíso Interior, provincia de Quillota y Comunas de Catemu, Panquehue, LayLlay de la Provincia de San Felipe de Aconcagua, fue declarada zona saturada por material particulado MP10 como concentración anual, y latente por MP10 como concentración diaria, de acuerdo al D.S. 107 de diciembre de 2018.

Con fecha septiembre de 2019 se dio inicio a la elaboración del PPDA para toda la zona declarada como saturada y latente. A la fecha, no se cuenta con un Anteproyecto de PPDA a efectos de identificar medidas de reducción o limitación directa de emisiones de NO_x como consecuencia de la aplicación del PPDA.

6.3.3 Zona 3. Concón – Quintero – Puchuncaví

Estas comunas cuentan con un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosféricas, para evitar la superación de la norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP₁₀ como concentración anual y de la norma primaria de calidad ambiental para material particulado

fino respirable PM_{2,5} como concentración de 24 horas y recuperar los niveles señalados en la última norma mencionada como concentración anual, en un plazo de 5 años. Este Plan se encuentra vigente desde el 30 de marzo de 2019. Las medidas establecidas en Plan son las siguientes:

- a. Calderas existentes y nuevas con potencia térmica nominal mayor o igual a 1 MWT deben cumplir con lo siguiente límites de a partir de 3 años después de la publicación de proyecto definitivo, es decir a contar de marzo de 2022:

Tabla 6.9: Límites de emisión calderas nuevas y existentes

Potencia Térmica Nominal de la Caldera	Límite máximo MP (mg/m ³ N)		Límite máximo SO ₂ (mg/m ³ N)		Límite máximo NO _x (ppmv)	
	Existente	Nueva	Existente	Nueva	Existente	Nueva
> 300 kWt y < 1 MWT	NA	50	NA	100	NA	200
> 1 MWT y < 20 MWT	50	30	200	50	200	100
>20 MWT	30	30	200	20	100	30

Fuente: PPDA para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví

La excepción a la norma señalada está dada por las siguientes instalaciones:

- Aquellas reguladas por la Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas, D.S. N° 13 de 2011, del Ministerio de Medio Ambiente.
- Las que acrediten un funcionamiento menor al 30% de las horas en base anual, considerando las horas de encendido y apagado, ante la Superintendencia del Medio Ambiente, conforme al procedimiento que este organismo en el plazo de 6 meses contado desde la publicación del decreto.
- Las calderas nuevas y existentes, de potencia menor a 20 MWT, que cogeneran, siempre y cuando el titular demuestre una eficiencia térmica superior al 80%. En estos casos deben cumplir con el límite máximo de emisión de MP de 60 mg/m³N.
- Se eximen del límite máximo de emisión de SO₂, las calderas de potencia mayor o igual a 300 kWt y menor a 20 MWT, que demuestren utilizar combustible en estado líquido o gaseoso con un contenido de azufre menor o igual a 50 ppm o ppmv.

En su comparación con la norma que se encuentra en evaluación, los valores son similares, con la excepción que esta limitación incluida en el PPDA también regula a las fuentes existentes en el contaminante NO_x. Sin embargo, al no estar incluidas las calderas de generación eléctrica, como tampoco Refinería Aconcagua, solo afecta al 0,44% de las emisiones totales de las fuentes fijas o al 0,4% de las emisiones totales. A efectos de su aplicación, se utilizarán los valores de reducción/limitación de la norma de calderas, manteniendo el inicio de vigencia al año 2022.

- b. Emisiones máximas permitidas

- Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES GENER, conformado por las centrales termoeléctricas Ventanas 1, Ventanas 2, Central Campiche.

Tabla 6.10: Emisiones máximas permitidas Complejo Ventanas

Emisiones Máximas Permitidas	MP (t/año)	SO ₂ (t/año)	NO _x (t/año)
Desde la publicación (marzo 2019)	212	5.579	7.523
A contar de 3 años de publicación (marzo 2022)	212	5.326	7.523

Fuente: PPDA para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví

Esta restricción en la proyección de emisiones no aplica. Esto se debe a que los estudios del Coordinador Eléctrico Nacional, en su proyección de generación para las centrales termoeléctricas de AES-GENER reportan la salida de algunas centrales y la disminución del despacho, lo que implica que las emisiones totales anuales de NO_x serán muy menores a lo establecido por esta restricción

- ENAP Refinerías Aconcagua

Tabla 6.11: Emisiones máximas permitidas Refinerías Aconcagua

Emisiones Máximas Permitidas	MP (t/año)	SO ₂ (t/año)	NO _x (t/año)
Desde la publicación (marzo 2019)	918	1.492	1.169
A contar de 3 años de publicación (marzo 2022)	230	1.492	935

Fuente: PPDA para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví

Esta restricción se aplica a partir del año 2019 a todo el complejo. Esto implica que en otras categorías de fuentes fijas (procesos, calderas, grupos electrógenos) que forman parte de la operación de Refinería Aconcagua serán excluidas de la aplicación de las normas de línea de base en desarrollo.

c. Compensación de emisiones

Desde la entrada en vigencia del Plan (2019), todos aquellos proyectos o actividades nuevas y la modificación de los existentes que se sometan o deban someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), deberán compensar sus emisiones totales anuales, directas o indirectas, que impliquen un aumento sobre la situación base

Tabla 6.12: Compensación de emisiones

Contaminante	Emisión (t/año)
MP ₁₀	5
MP _{2,5}	2,5
NO _x	20
SO ₂	10

Fuente: PPDA para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví

Se podrán utilizar factores de conversión entre gases y material particulado a efectos de compensación, los que son los siguientes.

Tabla 6.13: Compensación de emisiones. Equivalencias

Contaminante	Emisión Equivalente MP _{2,5} (t/año)
1 ton/año NO _x	0,035
1 ton/año SO ₂	0,029

Fuente: PPDA para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví

El supuesto de aplicación de esta medida es que las fuentes que superen estos límites compensarán en MP_{2,5} y no en NO_x, por lo que el efecto es nulo respecto de las emisiones total de las nuevas fuentes. En cualquier caso, de acuerdo a la revisión de los proyectos del SEIA de la zona en análisis no existe ningún proyecto que genere emisiones de NO_x superiores a 20 t/año.

6.3.4 Zona 4. Concepción Metropolitano

Las comunas de Concepción Metropolitano cuentan con un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosféricas, con el objetivo de dar cumplimiento a la norma primaria de calidad ambiental por PM_{2,5}, en un plazo de 10 años y no sobrepasar los límites de latencia de la norma primaria de calidad ambiental por PM₁₀. Este Plan se encuentra vigente desde diciembre de 2019 y las medidas de reducción o limitación directa de emisiones de NO_x se detallan a continuación.

a. Control de emisiones de NO_x para fuentes estacionarias

Tabla 6.14: Límites de emisiones fuentes estacionarias

Tipo de Fuente Estacionaria	Potencia Térmica	Límite máximo de emisión de NO _x (ppmv)	
		Fuentes Existentes	Fuentes Nuevas
Calderas	Mayor a 75 kWt y menor o igual a 1 MWt	NA	100
	Mayor a 1 MWt	300	100
Hornos	Vidrio, cemento y cal mayor a 20 MWt	600	200

Fuente: PPDA para las Comunas de Concepción Metropolitano

Los plazos de cumplimiento son los siguientes:

- Calderas nuevas: Desde el inicio de la operación.
- Calderas existentes: 36 meses desde la entrada en vigencia del Plan (diciembre 2022).
- Hornos nuevos: Desde el inicio de la operación.
- Hornos existentes: 60 meses desde la entrada en vigencia del Plan (diciembre 2024).

En comparación con la norma de calderas en elaboración, la restricción establecida en el PPDA presenta las siguientes principales diferencias:

- No hace una distinción de límites en base a los combustibles utilizados por las calderas.
- Los niveles de potencia para establecer categorías, también presentan diferencias.
- En el caso de NO_x, establece limitaciones para las fuentes existentes.

Se excluyen de estos límites la generación termoeléctrica regulada por el D.S. 13 de 2011 del MMA que establece la Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas.

A efectos del análisis de la reducción/limitación de emisiones, de las fuentes fijas calderas, a efectos de simplificación del análisis, se considerarán los efectos en reducción de emisiones de la aplicación de la norma de calderas a partir del año 2022, considerando lo establecido en el PPDA en relación a horas de funcionamiento (superior al 30% en base anual), calderas que serán definidas en base al contenido de las bases de datos utilizada para la elaboración del inventario.

En el caso de los hornos, se disponen de escasos antecedentes a efectos de evaluar el impacto de la medida, por lo que se utilizará un estimado del 35%⁶⁸ de reducción de las emisiones totales al momento de la vigencia de la norma, es decir al año 2025.

b. Compensación de emisiones

Desde la entrada en vigencia del Plan (dic. 2019), todos aquellos proyectos o actividades nuevas y la modificación de los existentes que se sometan o deban someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), deberán compensar sus emisiones totales anuales, directas o indirectas, que impliquen un aumento sobre la situación base

Tabla 6.15: Compensación de emisiones

Contaminante	Emisión (t/año)
MP ₁₀	5
MP _{2,5}	2,5
NO _x	20
SO ₂	10

Fuente: PPDA para las Comunas de Concepción Metropolitana

El supuesto de aplicación de esta medida (para proyecciones) es que las fuentes que superen estos límites compensarán en MP_{2,5} y no en NO_x, por lo que el efecto es nulo respecto de las emisiones total de las nuevas fuentes. En cualquier caso, de acuerdo a la revisión de los proyectos del SEIA de la zona en análisis no existe ningún proyecto que genere emisiones de NO_x superiores a 20 t/año.

c. Control de emisiones de grupos electrógenos nuevos

La norma establecida para el control de las emisiones de grupos electrógenos nuevos establece limitaciones a emisiones de NO_x, debiendo cumplir en dos etapas:

- Límites al 1 de enero del 2023.
- Límites al 1 de enero de 2026.

⁶⁸ Basado en revisión de estudios de la norma de calderas

Los valores del PPD son similares a los que indica la norma de grupos electrógenos y asimismo se establece que dichos valores se deberán cumplir en los plazos señalados, salvo que una norma de emisión de alcance similar sea publicada con anterioridad a dichos plazos, en cuyo caso se estará a lo dispuesto en la norma.

En consideración que el supuesto de entrada en vigencia de la norma de grupos electrógenos es el año 2022, para efectos de proyección se estará a lo dispuesto en la misma a efectos de la proyección de las emisiones de NO_x.

6.3.5 Zona 5. Región Metropolitana

La Región Metropolitana de Santiago cuenta con un Plan de Prevención y Descontaminación atmosférica que rige a partir del mes de noviembre de 2017, que tiene por objetivo dar cumplimiento a las normas primarias de calidad ambiental del aire vigentes, asociadas a los contaminantes, Material Particulado Respirable (MP10), Material Particulado Fino Respirable (MP_{2,5}), Ozono (O₃) y Monóxido de Carbono (CO), en un plazo de 10 años. Dicho Plan establece de manera explícita que respecto de la norma anual y horaria de NO₂, existe cumplimiento.

a. Transporte público

- Los buses destinados a la prestación de servicios de locomoción colectiva urbana en la Provincia de Santiago y en las comunas de San Bernardo y Puente Alto, que soliciten su primera inscripción en el Registro de Servicios de Transporte de Pasajeros de Santiago, a partir de 24 meses desde la entrada en vigencia del Plan (noviembre 2019), deberán contar con un motor cuyas emisiones contaminantes no superen los niveles máximos siguientes de NO_x:

- Motores encendidos por compresión: Emisiones provenientes del sistema de escape en gramos/caballos de fuerza al freno-hora (g/bHp-h)

CO (g/bHp-h)	HCNM (g/bHp-h)	NO _x (g/bHp-h)	MP (g/bHp-h)
15,5	0,14	0,2	0,01

Fuente: PPDA para la Región Metropolitana.

- Motores Ciclo Otto: Emisiones provenientes del sistema de escape en gramos/caballos de fuerza al freno-hora (g/bHp-h)

HC (g/bHp-h)	HCNM (g/bHp-h)	NO _x (g/bHp-h)	CO (g/bHp-h)
1,9	1,7	1,0*	37,1

* 5,0 (g/bHp-h), para motores con gas natural

Fuente: PPDA para la Región Metropolitana.

- Emisiones provenientes del sistema de escape, en miligramos/kilo Watt-hora (mg/kWh)

Ciclo	CO (mg/kWh)	HCT (mg/kWh)	HCNM (mg/kWh)	CH ₄ (mg/kWh)	NO ₂ (mg/kWh)	NH ₃ (ppm)	Masa Particulas (mg/kWh)	Número Partículas (#/kWh)
WHSC	1500	130			400	10	10	8,0x10 ¹¹
WHTC (CI)	4000	160			460	10	10	6,0x10 ¹¹
WHTC (PI)	4000		160	500	460	10	10	6,0x10 ¹¹

PI: Encendido por chispa

CI: Encendido por compresión

Fuente: PPDA para la Región Metropolitana.

Esta medida fue evaluada en el AGIES y sobre la base del GEASUR 2015, arrojó una reducción de un 69% de las emisiones totales en el sistema de transporte público. Para efectos del análisis, considerando las diferencias por líneas de base diferentes (el análisis de GEASUR es 2017 y el presente estudio es 2017), se considerarán las tasas de reducción de emisiones anuales obtenidas de GEASUR 2017, desde el año de inicio de vigencia de la norma, es decir, noviembre 2019. Las tasas de reducción son las siguientes para los años que se indican.

Año	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
% Reducc.		0,3%	0,4%	-23,1%	-11,1%	-18,3%	-9,6%	-34,1%	-12,3%	0,8%	0,8%	0,8%

Fuente: Elaboración propia en base a GEASUR 2015.

Estas tasas de reducción de emisiones serán las consideradas en la línea de base a efectos de la proyección de las emisiones del sector.

- b. Vehículos livianos y medianos: A contar de 12 meses desde la entrada en vigencia del Plan (noviembre 2018), se fijan nuevos límites máximos de emisión permitidos en la RM para vehículos livianos y medianos con sello verde y amarillo para distintos años de fabricación.

En complemento a los nuevos límites de emisión se establece que se iniciará la revisión de las normas de ingreso de vehículos livianos y medianos para establecer la norma EURO VI para los vehículos que ingresen al parque a mas tardar en septiembre de 2020.

Esta medida, en términos de la reducción de emisiones de NO_x no se encuentra evaluada en el AGIES del PPDA. Asimismo, las emisiones proyectadas para este sector en el estudio GEASUR 2015 considera que la renovación del parque de vehículos livianos y medianos es con niveles de emisión EURO V.

En consideración a lo anterior, y a efectos de proyectar las emisiones de línea de base, ellas se estimarán a partir de los antecedentes que se incluyen en el AGIES de la revisión de las normas de emisión para vehículos livianos y medianos, anticipando al 2021 el efecto de la norma, en consideración a lo indicado en el PPDA.

c. Maquinaria móvil fuera de ruta

El PPDA establece límites de emisión para la maquinaria móvil fuera de ruta nueva en niveles iguales a los establecidos en la norma de emisión que se encuentra en elaboración, en los mismos plazos y etapas, es decir, 2019 y 2022.

Para efectos de la proyección, en consideración a lo anterior, se aplicarán las tasas de reducción/limitación de emisiones de NO_x que se encuentran contenidas en el AGIES de la norma indicada.

d. Zona de baja emisión

Se establece que, a contar de 12 meses a contar de la entrada en vigencia del PPDA se deberá implementar una zona de baja emisión en la RM que considere una restricción al ingreso de vehículos pesados con una antigüedad superior a 12 años.

Esta medida se encuentra evaluada en el AGIES, en base a la información de GEOSUR 2015, y considera una reducción al año 2026 del orden de un 37% de las emisiones de la línea de base al año 12 de aplicación de la medida. Para efectos de la proyección en el presente estudio, se utilizarán las tasas de reducción/limitación anual indicadas por GEASUR desde el año de inicio de la medida, 2019.

Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
% Reducc.		-12,73%	-12,36%	-2,94%	-2,88%	-4,79%	-1,88%	-1,90%	-1,78%	-1,71%	-1,42%	0,16%

Fuente: Elaboración propia en base a GEASUR 2015.

e. Fuentes estacionarias

En el caso de calderas nuevas y existentes, el PPDA establece límites de emisiones, las que, comparadas con la norma de calderas, resultan valores diferentes y sin diferenciación por combustibles, como se indica en la siguiente tabla

Tabla 6.16: Comparación límites de emisiones PPDA versus norma

Potencia Térmica (P)	Combustible	Calderas Nuevas (mg/m ³ N)		Calderas Existentes (mg/m ³ N)	
		Norma	PPDA	Norma	PPDA
1MWt >= P < 3MWt	Gaseoso	100	188	No aplica	376
	Líquido	200		No aplica	
	Sólido	300		No aplica	
3MWt >= P < 20MWt	Gaseoso	30		No aplica	
	Líquido	200		No aplica	
	Sólido	300		No aplica	
P >= 20MWt	Gaseoso	30	56	No aplica	188
	Líquido	200		No aplica	
	Sólido	300		No aplica	

Fuente: Elaboración propia en base a PPDA y Anteproyecto de norma para calderas

Respecto a los plazos de cumplimiento, el PPDA establece para las fuentes nuevas desde el inicio de su operación y para las fuentes existentes desde diciembre de 2020.

A efectos de la simplificación de la proyección y la falta de información de reducción de emisiones de esta medida tanto en el AGIES como en el expediente del PPDA, se utilizarán como tasas de reducción/limitación los contenidos en el AGIES del Anteproyecto de norma para calderas, considerando la entrada en vigencia desde el año 2021.

En el caso de los procesos con combustión, se establece un límite máximo de emisión de NO_x de 300 ppmv para proceso nuevos y existentes. Se disponen de escasos antecedentes a efectos de evaluar el impacto de la medida, por lo que se utilizará un estimado del 35%⁶⁹ de reducción de las emisiones totales al momento de la vigencia de la norma, es decir al año 2021.

f. Proyectos que ingresan al SEIA posterior a la entrada en vigencia del Plan.

Deberán compensar sus emisiones totales anuales, directas e indirectas, aquellos proyectos o actividades nuevas y las modificaciones de los proyectos existentes, que en cualquiera de sus etapas generen aumentos sobre la situación base, en valores iguales o superiores a los que se indican a continuación.

Tabla 6.17: Compensación de emisiones

Contaminante	Emisión máxima (t/año)
MP ₁₀	2,5
MP _{2,5}	2,0
NO _x	8,0
SO ₂	10,0

Fuente: PPDA para la Región Metropolitana.

El supuesto de aplicación de esta medida (para proyecciones) es que las fuentes que superen estos límites compensarán en MP_{2,5} y no en NO_x, por lo que el efecto es nulo respecto de las emisiones totales de las nuevas fuentes.

g. Grupos electrógenos nuevos

Para el caso de los grupos electrógenos nuevos, se establecen límites máximos de emisión de cumplimiento en dos etapas, similares a las que se aplican en la norma en elaboración.

- Límites a contar de enero de 2020.
- Límites a contar de enero de 2024.

Para el caso de las emisiones de NO_x, los límites máximos de emisión son los mismos que se establecen en la norma que se encuentra en elaboración, y no se indican exclusiones como resultado de las horas de operación. Teniendo presente lo anterior, a efectos de la proyección

⁶⁹ Basado en revisión de estudios de la norma de calderas

de sus emisiones, se utilizarán las tasas de crecimiento/limitación derivadas del AGIES de la norma en elaboración, aplicadas desde el año 2020.

6.4 Aspectos Metodológicos. Normas de emisión en elaboración o vigentes.

La revisión de las normas de emisión consideró todas las normas tanto vigentes como las que se encuentran en elaboración que incluyen alguna restricción de emisiones a los NO_x. La siguiente tabla muestra todas aquellas normas que cumplen con esta condición.

Tabla 6.18: Normas de emisión en elaboración o vigentes

Norma	Estado Actual
Revisión de la norma aplicable a vehículos motorizados pesados	
Norma de emisión para grupos electrógenos	Elaboración proyecto definitivo
Revisión de la norma de emisión para centrales termoeléctricas	
Norma de emisión para calderas y procesos de combustión	Elaboración proyecto definitivo
Norma de emisión de contaminantes aplicables a maquinaria fuera de ruta	Elaboración proyecto definitivo
Norma de emisión de vehículos motorizados medianos (revisión D.S. N° 54/94, MTT)	Publicada Septiembre 2020
Norma de emisión de vehículos motorizados livianos (revisión D.S. N° 211/91, MTT)	Publicada Septiembre 2020
Norma de emisión para motocicletas. (revisión D.S. N° 104/2000)	Publicada Marzo 2018

Fuente: Elaboración propia en base a <http://planesynormas.mma.gob.cl>

6.4.1 Análisis de normas vigentes.

La revisión consideró todas aquellas normas cuya entrada en vigencia es posterior a la línea de base 2017 o cuya aplicación es posterior, las que se detallan a continuación. En el análisis, se han definido algunas variables de impacto normativo, principalmente a través de establecer al menos el número de fuentes estimado que serán reguladas por la norma. En Anexo Digital, carpeta “Normas y planes” se incluyen los textos íntegros obtenidos de <http://planesynormas.mma.gob.cl> a la fecha de la elaboración del presente informe (noviembre 2020).

6.4.1.1 Norma de emisión para motocicletas. (revisión D.S. N° 104/2000)

Esta norma fue publicada en marzo del 2018 y establece nuevos límites de emisión para motocicletas de dos, tres y cuatro ruedas. Estos nuevos requerimientos normativos son exigibles a todos los vehículos de esta naturaleza, cuya primera inscripción en el Registro de Vehículos Motorizados se realice a contar del 1 de agosto de 2018 en adelante.

Para efectos del análisis del impacto cuantitativo de la norma, se utilizó la información de la Asociación Nacional de Importadores de Motos (ANIM), que representa un 73% de las ventas de unidades nuevas. En su Informe de Ventas de junio de 2020 (se adjunta en Anexo), indica que el número de unidades vendidas en los años 2018 y 2019 fue de 32.155 y 31.031 unidades respectivamente. Considerando un promedio de 30.000 unidades, que representan un 73% del mercado, un total de 41.000 vehículos se incorporaron en promedio al parque en dichos años.

En relación a lo señalado en el AGIES⁷⁰ de esta norma, estos valores son más bajos, debido a que la información utilizada para proyección es más reciente (2020) que en el AGIES que uso datos del 2013, aunque la fuente es la misma. A manera de estimación, se puede indicar que un total acumulado de 615.000 motos deberán dar cumplimiento a esta normativa entre el año 2018 y 2032.

Respecto a la reducción de emisiones, el AGIES estima que dicha reducción tendrá el comportamiento que se indica en la tabla siguiente a nivel nacional.

Tabla 6.19: Estimación de reducción de contaminantes como resultado de aplicación de modificación de la norma de emisión motocicletas (D.S. 104/2000)

Contaminante	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
CO	3.100	5.900	8.300	10.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000
CO ₂	3.600	6.900	9.800	12.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
COV	250	480	690	850	960	1.000	1.000	1.000	1.000
MP _{2.5}	4,7	9,0	13,0	16,0	18,0	19,0	19,0	19,0	19,0
NO _X	38	73	100	130	150	150	150	150	150
SO _X	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Fuente: Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto de revisión de la norma de emisión aplicable a motocicletas. Departamento de Economía Ambiental – Ministerio de Medio Ambiente. Junio 2016

Para efectos de asignar estas reducciones de emisiones (NO_x) a las zonas en análisis, se utilizará distribución de ventas de motos nuevas que se incorporan en el AGIES⁷¹, y que se indica a continuación.

Figura 6-1: Distribución de ventas de motocicletas nuevas a nivel nacional



Fuente: Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto de revisión de la norma de emisión aplicable a motocicletas. Departamento de Economía Ambiental – Ministerio de Medio Ambiente. Junio 2016

⁷⁰ El AGIES esta disponible en:

http://planesynormas.mma.gob.cl/normas/expediente/index.php?tipo=busqueda&id_expediente=929780

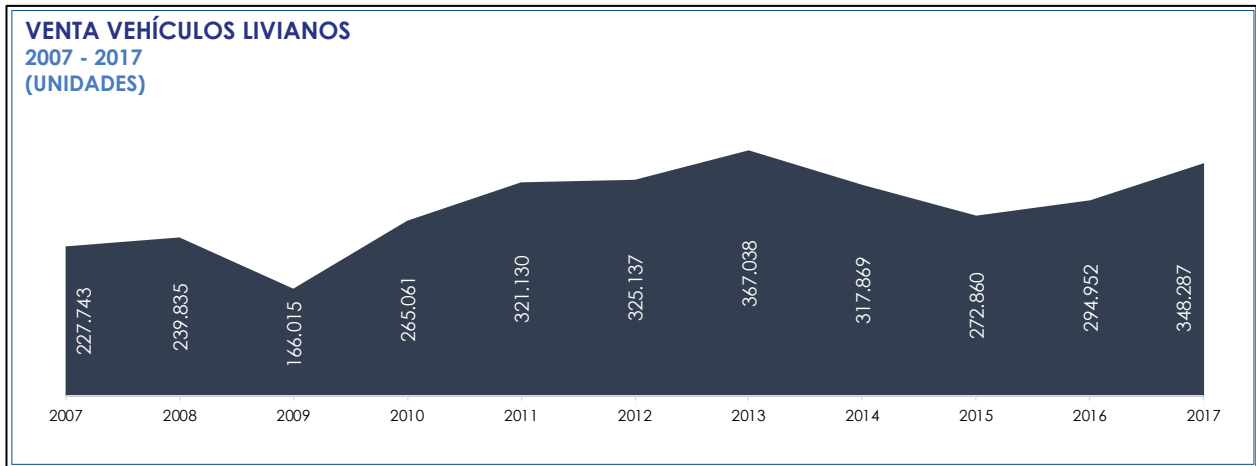
⁷¹ Se realizarán ajustes para el caso de Concon-Quintero-Puchuncaví, Calama y Valparaíso Interior

6.4.1.2 Norma de emisión de vehículos motorizados livianos (revisión D.S. N° 211/91, MTT)

La norma establece nuevos requisitos de emisiones que deberán cumplir los vehículos motorizados livianos nuevos al momento de su homologación, tanto para aquellos con encendido por chispa o encendidos por compresión. Los límites a cumplir, a partir del año 2022, son equivalentes al estándar europeo EURO VIb (Fase I) y a partir del año 2023 límites equivalentes al estándar EURO VIc (Fase II). Esta última fase está supeditada a la disponibilidad de diésel y gasolina a nivel nacional con un contenido de azufre de 10ppm como máximo.

En términos del impacto cuantitativo de esta revisión de las normas de emisión, en los siguientes 15 años, la información utilizada se obtuvo del Anuario Automotor 2017 de la Cámara de Comercio Automotriz de Chile (se adjunta en Anexo), las ventas del período 2007 - 2017 se ilustran en el siguiente gráfico

Figura 6-2: Venta de vehículos livianos nuevos período 2007 - 2017



Fuente: Anuario Automotor 2017. Cámara Nacional de Comercio Automotriz de Chile.

Para efectos del análisis estadístico se consideró vehículos livianos, de acuerdo a las estadísticas de la CAVEM, a los vehículos de pasajeros, camionetas y SUV, cuya desagregación en ventas anuales para el período 2007 – 2017 se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6.20: Desagregación de ventas vehículos livianos CAVEM. 2007 – 2017.

CATEGORÍA	AÑO										
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
VEHÍCULOS LIVIANOS	227.743	239.835	166.015	265.061	321.130	325.137	367.038	317.869	272.860	294.952	348.287
PASAJEROS	139.372	140.334	87.599	139.426	170.845	171.471	186.425	157.430	128.646	132.156	144.797
CAMIONETAS	39.771	44.142	30.702	52.357	62.123	60.970	69.000	53.389	50.290	55.290	66.931
COMERCIALES	14.935	14.170	9.695	14.970	19.194	17.967	22.541	18.679	16.359	17.554	20.350
SUV	33.665	41.189	38.019	58.308	68.968	74.729	89.072	88.371	77.565	89.952	116.209

Fuente: Anuario Automotor 2017. Cámara Nacional de Comercio Automotriz de Chile.

Considerando estos antecedentes se obtiene una tasa de crecimiento promedio anual para el parque de vehículos livianos nuevos del 4,42%. En términos del impacto cuantitativo de la norma, si se proyecta el número de nuevos vehículos que ingresan al parque desde al año 2032, considerando una entrada de vigencia completa (completando la Fase I y II) de la norma a partir del año 2025, el número total acumulado de vehículos al 2032 que deberán ser sujetos de esta norma es de 4.334.938 de vehículos livianos nuevos.

De acuerdo a lo que indica el AGIES⁷² desarrollado para la evaluación de la norma, se estima una fuerte reducción de las emisiones a nivel regional, las que se muestran en la siguiente tabla para las regiones relevantes del presente estudio. Años de aplicación corresponde al cálculo del año a partir del cual entra en vigencia la norma, dado que el AGIES fue realizado con anterioridad. Para efectos de análisis se asumen los mismos porcentajes aplicados a los años correspondientes a la vigencia.

Tabla 6.21: Reducción de emisiones NO_x vehículos medianos y livianos a nivel regional con la aplicación de la revisión de la norma.

Región		Años AGIES													
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
		Años Aplicación													
		2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Metropolitana	Ton/año	17.127	16.136	15.260	14.495	13.835	12.851	11.945	11.114	10.357	9.676	9.071	8.539	8.078	7.682
	% Reducción(*)		5,8%	5,4%	5,0%	4,6%	7,1%	7,1%	7,0%	6,8%	6,6%	6,3%	5,9%	5,4%	4,9%
Antofagasta	Ton/año	1.372	1.338	1.305	1.276	1.247	1.199	1.153	1.108	1.065	1.024	985	948	913	880
	% Reducción(*)		2,5%	2,5%	2,2%	2,3%	3,8%	3,8%	3,9%	3,9%	3,8%	3,8%	3,8%	3,7%	3,6%
Valparaíso	Ton/año	13.951	13.173	12.452	11.785	11.173	10.455	9.784	9.160	8.580	8.044	7.552	7.102	6.694	6.325
	% Reducción(*)		5,6%	5,5%	5,4%	5,2%	6,4%	6,4%	6,4%	6,3%	6,2%	6,1%	6,0%	5,7%	5,5%
Bío Bío	Ton/año	7.431	7.060	6.695	6.342	6.005	5.615	5.242	4.888	4.553	4.239	3.948	3.681	3.437	3.217
	% Reducción(*)		5,0%	5,2%	5,3%	5,3%	6,5%	6,6%	6,8%	6,9%	6,9%	6,9%	6,8%	6,6%	6,4%

(*) % Reducción calculado respecto al año anterior

Fuente: Elaboración propia en base a información del Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto norma de emisión para vehículos livianos y medianos. Departamento de Economía Ambiental – Ministerio de Medio Ambiente. Agosto 2019

Se debe indicar que, los resultados de estas reducciones de emisiones, tanto en términos absolutos como porcentuales corresponden al impacto conjunto de la revisión de la norma para vehículos motorizados livianos y medianos. Para efectos de proyectar las emisiones se utilizarán las variaciones porcentuales, en consideración a las diferencias que pudieran existir en los inventarios de línea de base. Asimismo, en la proyección, las tasas se aplicarán a partir del año 2022, que corresponde al inicio de la vigencia de la norma, tanto para livianos como medianos.

6.4.1.3 Norma de emisión de vehículos motorizados medianos (revisión D.S. N° 54/94, MTT)

La norma establece los requisitos de emisiones que deberán cumplir los vehículos motorizados medianos al momento de su homologación, tanto para aquellos con encendido por chispa o encendidos por compresión. Los plazos de cumplimiento completo de esta nueva normativa a efectos de simplificación para el análisis será 48 meses (la norma establece cumplimientos intermedios a los 24 y 30 meses).

⁷² El AGIES esta disponible en:

http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2018/proyectos/1ba_Agies_Euro_VI_anteproyecto_v4.pdf

Considerando la aplicación de los mismos criterios utilizados para los vehículos livianos, se puede estimar el impacto de la norma en términos del número de vehículos nuevos que deberán estar sujetos a la misma. En este caso, la tasa de crecimiento promedio anual es del 3,14%, lo cual proyectado al 2032 y considerando una entrada de vigencia plena al 2025 da un total acumulado de 232.947 vehículos medianos nuevos.

En relación al impacto en emisiones, ello se encuentra descrito en el numeral anterior relativo a vehículos livianos, dado que como se indicó el AGIES desarrollado muestra el impacto de ambas revisiones normativas.

6.4.2 Análisis de normas en elaboración.

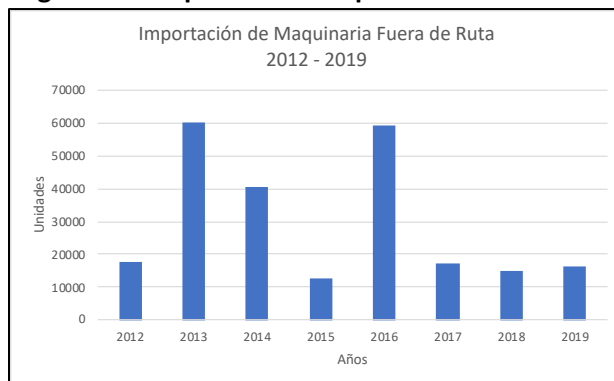
6.4.2.1 Norma de emisión de contaminantes aplicables a maquinaria fuera de ruta

Esta norma regula las emisiones de la maquinaria fuera de ruta, entendiéndose por tal cualquier maquinaria móvil o equipo industrial portátil o vehículo con o sin carrocería, no destinados al transporte de pasajeros o mercancía por carretera con una potencia instalada igual o superior a 15 kW e inferior a 560 kW.

El Anteproyecto fue publicado el 26 de octubre de 2016 en el Diario Oficial y a la fecha de elaboración del presente informe se encuentra en etapa de respuesta al consolidado de observaciones. La entrada en vigencia de la norma establecida en el Anteproyecto fue el año 2019 y 2022, no obstante, se debe indicar que el primero de los plazos se encuentra vencido, por lo que es probable la postergación de su aplicación al menos uno o dos años.

Para efectos del impacto cuantitativo que pudiera tener esta normativa cuando entre en vigencia, se revisaron las estadísticas de importación de palas mecánicas, excavadoras, cargadoras, palas cargadoras y tractores del Servicio de Aduanas, a efecto de determinar el crecimiento promedio del parque en los últimos años (en Anexo panilla Excel de importaciones Servicio de Aduanas). Los antecedentes de ingreso de nuevas unidades se muestran en la siguiente figura.

Figura 6-3: Importación maquinaria fuera de ruta



Fuente: Elaboración propia con información del Servicio de Aduanas

Si se considera el promedio anual de ingreso de nuevas unidades de 29.857 (período 2012-2019) y se establece como año de inicio de la vigencia el año 2026⁷³, el número de unidades acumuladas que deberán cumplir esta regulación al año 2032 es de 208.996.

Para efectos de calcular el impacto en emisiones es necesario remitirse al AGIES⁷⁴, el cual, si bien proyecta reducciones a partir de un escenario de emisiones 2013, es posible aplicar el mismo criterio porcentual de reducción/limitación que se utilizará para efectos de la norma de vehículos livianos y medianos. En relación al inicio de la aplicación la norma, en el Anteproyecto se establece el año 2019, por lo que, para efectos de su entrada en vigencia en el presente ejercicio, se utilizará el supuesto que inicia en el año 2022.

Tabla 6.22: Reducción de emisiones NO_x maquinaria fuera de ruta a nivel regional con la aplicación de la revisión de la norma.

Región		Años AGIES													
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
		Años Aplicación													
		2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Metropolitana	Ton/año	9.671	9.317	9.718	9.959	10.178	10.327	10.370	10.445	10.519	9.636	8.753	8.071	7.415	6.781
	% Reducción(*)		3,7%	-4,3%	-2,5%	-2,2%	-1,5%	-0,4%	-0,7%	-0,7%	8,4%	9,2%	7,8%	8,1%	8,6%
Antofagasta	Ton/año	5.191	4.947	5.192	5.295	5.478	5.586	5.605	5.690	5.777	5.324	4.860	4.479	4.102	3.730
	% Reducción(*)		4,7%	-5,0%	-2,0%	-3,5%	-2,0%	-0,3%	-1,5%	-1,5%	7,8%	8,7%	7,8%	8,4%	9,1%
Valparaíso	Ton/año	2.030	1.952	2.050	2.088	2.140	2.173	2.182	2.202	2.221	2.039	1.856	1.713	1.575	1.440
	% Reducción(*)		3,8%	-5,0%	-1,9%	-2,5%	-1,5%	-0,4%	-0,9%	-0,9%	8,2%	9,0%	7,7%	8,1%	8,6%
Bío Bío	Ton/año	4.142	4.086	4.307	4.454	4.588	4.711	4.733	4.754	4.766	4.463	4.160	3.934	3.707	3.525
	% Reducción(*)		1,4%	-5,4%	-3,4%	-3,0%	-2,7%	-0,5%	-0,4%	-0,3%	6,4%	6,8%	5,4%	5,8%	4,9%

(*) % Reducción calculado respecto al año anterior

Fuente: Elaboración propia en base a información del Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto norma de emisión maquinaria fuera de ruta. Departamento de Economía Ambiental – Ministerio de Medio Ambiente. Octubre 2016

6.4.2.2 Norma de emisión para grupos electrógenos

La norma tiene por objetivo controlar las emisiones provenientes de los grupos electrógenos nuevos accionados con motores de combustión interna con encendido por compresión, de potencia máxima igual o superior a 19 kW. Se excluyen los grupos electrógenos estacionarios nuevos de potencia mayor a 19 kW y menores a 560 kW, así como aquellos que operan en zonas sin acceso al Sistema Eléctrico Nacional.

A la fecha de elaboración del presente informe, el proyecto se encuentra en proceso de elaboración de las respuestas a las observaciones ciudadana, plazo que se ha extendido hasta el 3 de noviembre de 2020. Bajo el supuesto que apruebe y publique el proyecto definitivo durante el año 2021, su entrada en vigencia es inmediata para grupos electrógenos nuevos por lo que se puede aplicar el supuesto que su inicio formal es a contar del año 2022.

⁷³ Asumiendo la misma proporcionalidad en los plazos de entrada en vigencia que establece el Anteproyecto y que la norma se aprueba en el año 2021.

⁷⁴ El AGIES esta disponible en: http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/Agies_OffRoad_27_Oct.pdf

En relación a las reducciones esperadas de emisiones de NO_x, ellas se encuentran contenidas en el AGIES⁷⁵ del proyecto y es posible en este caso utilizar el mismo criterio analizado previamente. A efectos de la determinación de la línea de base a partir de la cual se aplican los factores de reducción, se considerará las emisiones provenientes de todos los grupos electrógenos que tienen la potencia y requisitos de horas operación establecida en la norma y que se encuentran en las bases de datos utilizadas para la elaboración de los inventarios de emisiones del presente estudio.

Tabla 6.23: Reducción de emisiones NO_x grupos electrógenos con la aplicación de la norma.

Región		Años AGIES																	
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028				
		Años Aplicación												2027	2028	2029	2030	2031	2032
Metropolitana	Ton/año	14.001	14.144	13.949	14.249	14.563	14.869	15.223	15.114	15.031	15.114	15.317	15.140	15.025	15.043				
	% Reducción(*)		-1,0%	1,4%	-2,2%	-2,2%	-2,1%	-2,4%	0,7%	0,5%	-0,6%	-1,3%	1,2%	0,8%	-0,1%				
Antofagasta	Ton/año	2.960	2.985	2.959	3.022	3.088	3.152	3.226	3.179	3.141	3.145	3.174	3.085	3.012	2.981				
	% Reducción(*)		-0,8%	0,9%	-2,1%	-2,2%	-2,1%	-2,3%	1,5%	1,2%	-0,1%	-0,9%	2,8%	2,4%	1,0%				
Valparaíso	Ton/año	2.289	2.311	2.283	2.332	2.383	2.491	2.469	2.452	2.463	2.495	2.456	2.429	2.427	2.441				
	% Reducción(*)		-1,0%	1,2%	-2,1%	-2,2%	-4,5%	0,9%	0,7%	-0,4%	-1,3%	1,6%	1,1%	0,1%	-0,6%				
Bío Bío	Ton/año	2.692	2.719	2.683	2.740	2.800	2.858	2.926	2.902	2.884	2.895	2.930	2.883	2.848	2.840				
	% Reducción(*)		-1,0%	1,3%	-2,1%	-2,2%	-2,1%	-2,4%	0,8%	0,6%	-0,4%	-1,2%	1,6%	1,2%	0,3%				

(*) % Reducción calculado respecto al año anterior

Fuente: Elaboración propia en base a información del Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto norma de emisión grupos electrógenos. Departamento de Economía Ambiental – Ministerio de Medio Ambiente. Octubre 2019

6.4.2.3 Norma de emisión para calderas

En el Anteproyecto de la norma, se establecen límites de emisión para las calderas nuevas y existentes con una potencia superior a 1 MWt. Asimismo, para las calderas con potencia superior a 20 MWt que utilicen carbón o petcoke establece límites a las emisiones de mercurio. Para las calderas nuevas de potencia mayor a 300 kWt o inferior a 1 MWt, establece límites para sus emisiones de material particulado y monóxido de carbono.

Las excepciones a la norma son las siguientes:

- Calderas reguladas por la norma de emisión para centrales termoeléctricas (D.S. 13).
- Calderas de locomotoras y embarcaciones.
- Calderas de calefacción de uso domiciliario.
- Calderas sujetas a la norma de incineración, coincineración y coprocesamiento.
- Contaminantes de calderas que se encuentre regulados por PPDA aplicables a los mismos rangos de potencia.

El AGIES del proyecto de norma, a diferencia de los analizados previamente, establece niveles de reducción no desagregados a nivel regional, a partir del año 2017. En este caso, se aplicará el mismo criterio anterior utilizando para todas las zonas los porcentajes de reducción nacionales, los cuales se indican en la siguiente tabla. Para efectos de su aplicación se establecerá el supuesto que la norma entra en vigencia en el año 2022.

⁷⁵ El AGIES esta disponible en: http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2020/proyectos/174._AGIES.pdf

Tabla 6.24: Reducción de emisiones NO_x calderas con la aplicación de la norma.

Nacional		Años AGIES													
		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
		Años Aplicación													
		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Nacional	Ton/año	10.244	10.385	10.229	10.296	10.342	10.418	10.526	10.620	10.704	10.865	11.018	11.877	11.910	11.942
	% Reducción(*)		-1,4%	1,5%	-0,7%	-0,4%	-0,7%	-1,0%	-0,9%	-0,8%	-1,5%	-1,4%	-7,8%	-0,3%	-0,3%

(*) % Reducción calculado respecto al año anterior

Fuente: Elaboración propia en base a información del Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto norma de emisión para calderas. Departamento de Economía Ambiental – Ministerio de Medio Ambiente. Mayo 2017

6.5 Resultados de Proyecciones de Línea de Base

A continuación, se presenta el resumen de la proyección a 15 años de la línea de base de emisiones para las zonas en análisis, considerando las regulaciones actualmente vigentes y aquellas que se activarán en el corto plazo producto de planes o normas existentes o prontas a publicarse.

6.5.1 Zona 1. Calama

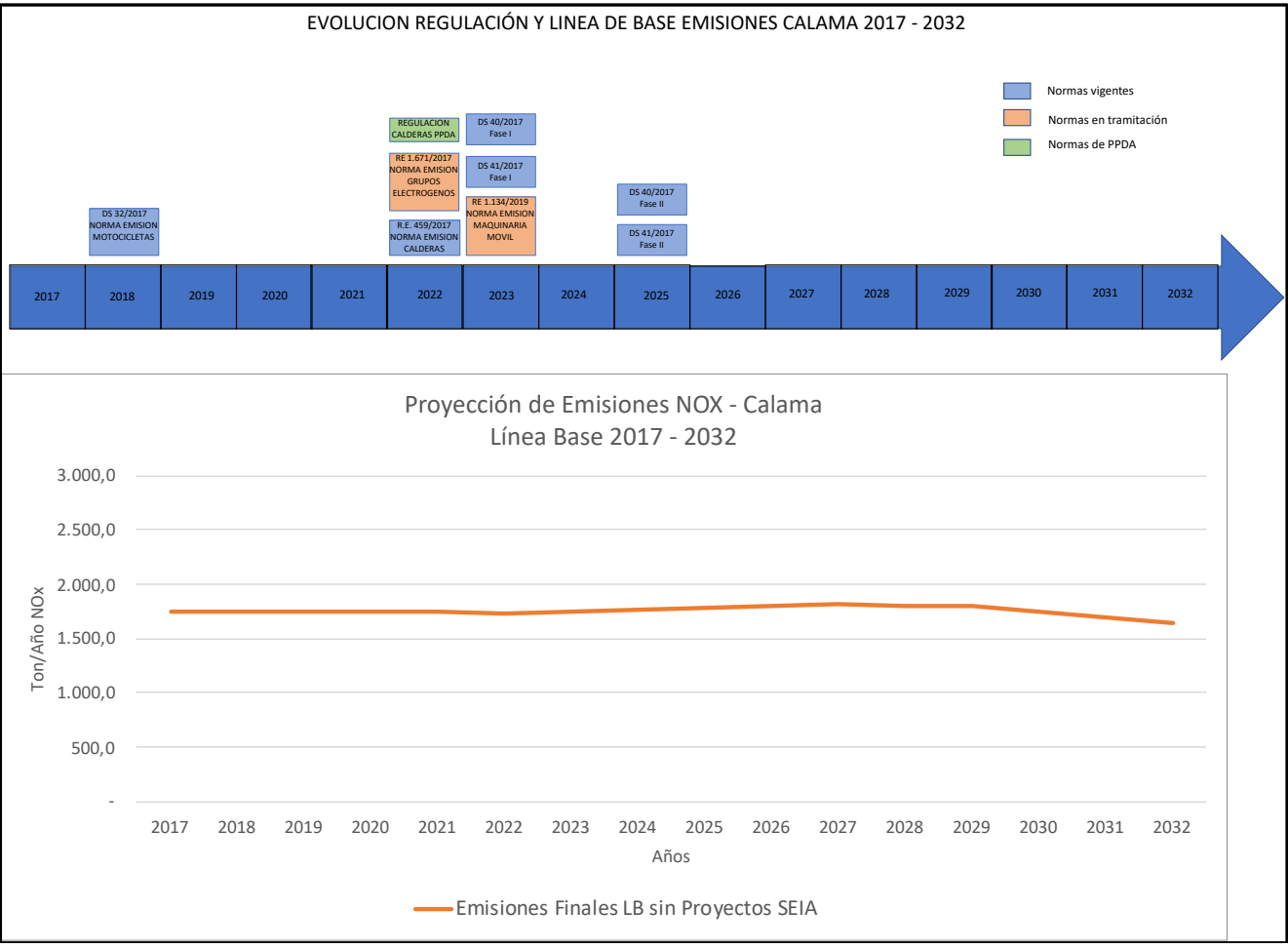
a. Resumen de medidas de línea de base y cronograma de activación

Tabla 6.25: Medidas de Línea de Base. Zona 1. Calama

Regulación	Activación (año)	Fuente Reducción Emisiones
D.S. 32/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 104, de 2000, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para motocicletas". Ministerio del Medio Ambiente.	2018	AGIES
D.S. 40/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 54, de 1994, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos medianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
D.S. 41/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 211, de 1991, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos livianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
R.E. 459/2017 "Anteproyecto de la norma de emisión para calderas". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.671/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para grupos electrógenos". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.134/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para maquinaria móvil fuera de ruta". Ministerio del Medio Ambiente	2023 Estimado	AGIES
D.S. s/numero. "Establece plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Calama y su área circundante". Aprobado por CMS. Acuerdo 5/2020		
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo III. Numeral 1. Regulación de Calderas. 	2021 Estimado	AGIES
Proyectos del SEIA no iniciados con RCA Aprobada	Por proyecto	Expediente SEIA

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-4: Evolución regulación y línea de base. Zona 1. Calama.

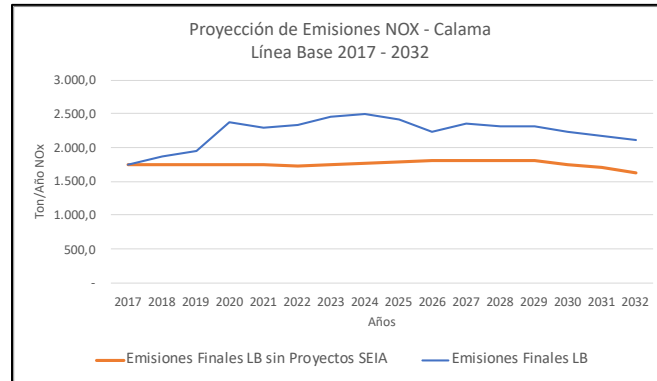


Fuente: Elaboración propia

b. Resultados de la proyección de emisiones

La evolución de las emisiones depende muy fuertemente de los nuevos proyectos que se incorporan en la zona, y que corresponden principalmente a iniciativas del sector minero vinculadas a explotaciones existentes.

Figura 6-5: Proyección Emisiones NO_x. Zona 1. Calama

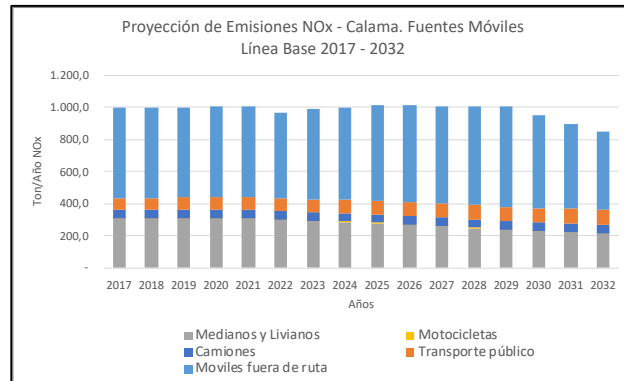


Fuente: Elaboración propia

Cuando se analiza el conjunto de las emisiones sin considerar las iniciativas del SEIA, se observa un patrón relativamente uniforme de las emisiones, sin un aumento significativo, pero con una reducción al final del período del orden del 6,5% respecto de las emisiones del 2017. Lo anterior se debe principalmente a la aplicación de las nuevas normas de emisión de vehículos livianos y medianos en el 2021 y la norma de maquinaria fuera de ruta. De esta forma, las emisiones totales del sector fuentes móviles se reducen un 15,6% y las emisiones del sector medianos y livianos lo hacen en un 31%.

Otras normas que se aplican en la línea de base como la norma de calderas o la norma de grupos electrógenos no tienen un impacto significativo.

Figura 6-6: Proyección Emisiones NO_x. Zona 1. Calama. Fuentes Móviles



Fuente: Elaboración propia

En Anexo digital, “Planilla Proyecciones.xlsx” se encuentra el detalle de las emisiones consideradas para los distintos sectores y años y en el informe se adjunta en Anexo los cuadros de resultados.

c. Áreas regulatorias

A efectos del estudio de nuevas medidas regulatorias que se pudieran aplicar considerando lo existente en la línea de base 2017, el siguiente cuadro ilustra los sectores que se encuentran o encontrarán regulados (recientemente) por normas específicas de limitación de emisiones de NO_x.

Para efectos del análisis, si bien algunas normas, en particular, las normas de emisión para vehículos livianos y medianos, la norma de calderas, la normas para vehículos fuera de ruta y la norma para grupos electrógenos no se aplican a lo existente, la proyección de emisiones de los AGIES se realizó considerando una tasa de reemplazo, y para efectos del presente análisis se considerarán sectores con regulación reciente, puesto que es una adecuada decisión de política regulatoria el no establecer limitaciones a lo existente cuando, considerando tasas de reemplazo, se produce el efecto deseado desde la perspectiva del regulador.

Tabla 6.26: Espacios Regulatorios. Zona 1. Calama

Fuente	% del Total	Condición
Fuentes Fijas		
Grupos electrogenos	38,38%	Regulado
Calderas	3,61%	Regulado
Procesos sin combustión		
Procesos con combustión	0,10%	No Regulado
Panaderías	0,05%	No Regulado
Fuentes Móviles		
Medianos y Livianos	17,60%	Regulado
Motocicletas	0,14%	Regulado
Camiones	2,92%	No Regulado
Transporte público	4,24%	No Regulado
Fuentes móviles fuera de ruta	32,16%	Regulado
Emisiones Areales		
Residencial y comercial	0,78%	No Regulado
Quemas	0,01%	No Regulado

Fuente: Elaboración propia

Como se desprende de la tabla, tan solo el 8,1% de las fuentes emisoras no cuentan con una regulación vigente o que entrará en vigencia en el corto plazo. Por ello, la única forma de avanzar hacia una reducción más agresiva de emisiones de NO_x en esta zona es en las fuentes actualmente existentes y que no son cubiertas por la regulación específica ya analizada.

6.5.2 Zona 2. Concón – Quintero - Puchuncaví

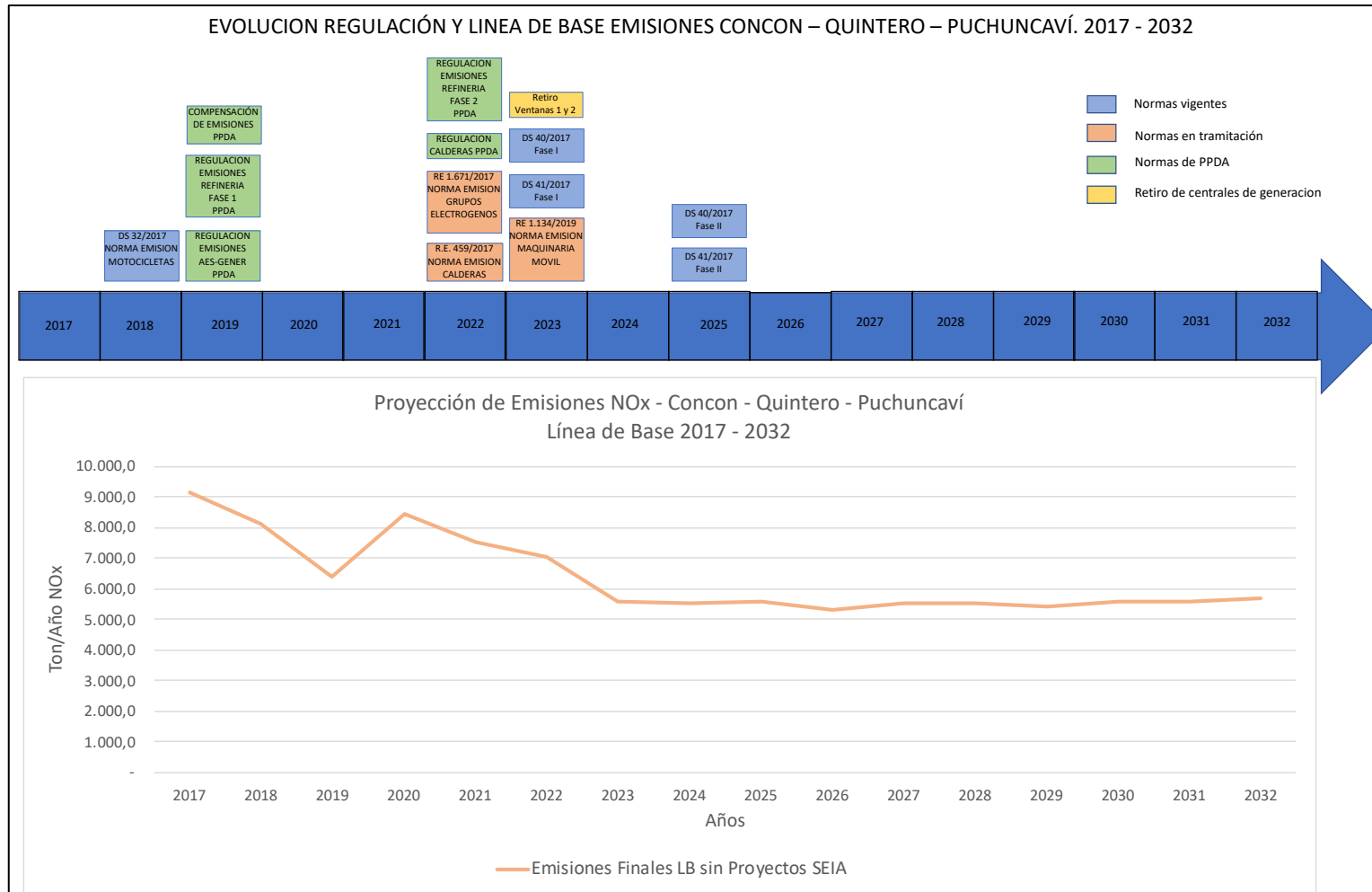
a. Resumen de medidas de línea de base y cronograma de activación

Tabla 6.27: Medidas de Línea de Base. Zona 1. Calama

Regulación	Activación (año)	Fuente Reducción Emisiones
D.S. 32/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 104, de 2000, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para motocicletas". Ministerio del Medio Ambiente.	2018	AGIES
D.S. 40/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 54, de 1994, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos medianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
D.S. 41/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 211, de 1991, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos livianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
R.E. 459/2017 "Anteproyecto de la norma de emisión para calderas". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.671/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para grupos electrógenos". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.134/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para maquinaria móvil fuera de ruta". Ministerio del Medio Ambiente	2023 Estimado	AGIES
D.S. N°105/2018 MMA Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica.		
<ul style="list-style-type: none"> • Capítulo 1. Numeral 1. Regulación de Calderas. 	2022	AGIES
<ul style="list-style-type: none"> • Capítulo 1. Numeral 3. Regulación AES GENER. 	2019	
<ul style="list-style-type: none"> • Capítulo 1. Numeral 4. Regulación Refinerías Aconcagua 	2019 2022	
<ul style="list-style-type: none"> • Capítulo VII. Compensación de emisiones 	2019	
Proyectos del SEIA no iniciados con RCA Aprobada	Por proyecto	Expediente SEIA

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-7: Evolución regulación y línea de base. Zona 2. Concón – Quintero – Puchuncaví.



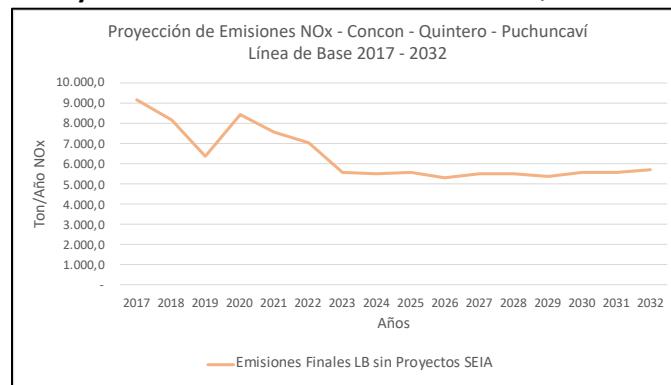
Fuente: Elaboración propia

b. Resultados de la proyección de emisiones

Las emisiones de NO_x en esta zona en particular, están determinadas fundamentalmente por los niveles de generación eléctrica asociada al complejo AES GENER. De esta forma, el retiro total de las centrales Ventanas 1 y 2 al año 2023 determinan una caída del orden del 16% respecto de las emisiones totales de la situación base del año 2017.

Otra reducción importante que se presenta en la proyección son las limitaciones a las emisiones de Refinería Aconcagua incluidas en el PPDA y que se presentan producen en el año 2019 y el 2022. En el caso de AES GENER, la limitación del PPDA es muy mayor respecto a los niveles del 2017 y por cierto aún más menores considerando la salida de las centrales Ventanas 1 y 2.

Figura 6-8: Proyección de emisiones NO_x. Concón – Quintero - Puchuncaví

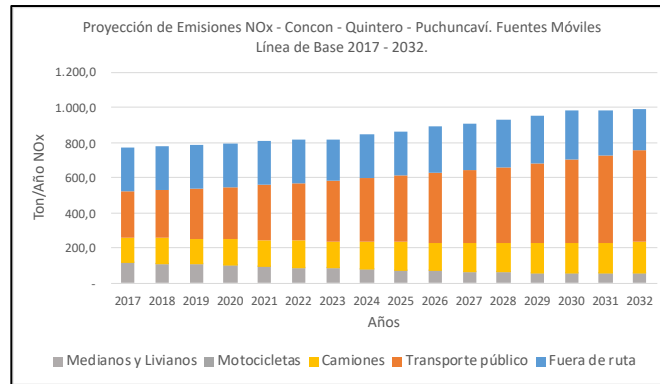


Fuente: Elaboración propia

Las restantes fuentes fijas, en el escenario de proyección son irrelevantes, representando en promedio un 1,15% de las emisiones totales provenientes de las fuentes fijas.

En el caso de las fuentes móviles, el siguiente gráfico ilustra la proyección para los distintos medios evaluados. Se puede apreciar la reducción de las emisiones en vehículos livianos y medianos, lo cual es el resultado de la modificación de los límites de emisión definidos en el D.S. 40 y D.S. 41. No obstante lo anterior, el crecimiento calculado para las emisiones en el transporte público es responsables del aumento del total de las emisiones del sector. Lo destacable es que, como consecuencia de las reducciones de las emisiones de las fuentes fijas, el sector transporte pasa de representar un 8,4% de las emisiones totales en 2017 a un 17,45 en el 2032.

Figura 6-9: Proyección de emisiones Fuentes Móviles. Concón – Quintero - Puchuncaví



Fuente: Elaboración propia

En Anexo digital, “Planilla Proyecciones.xlsx” se encuentra el detalle de las emisiones consideradas para los distintos sectores y años y en el informe se adjunta en Anexo los cuadros de resultados.

c. Áreas regulatorias

Aplicando el mismo criterio utilizado para la Zona 1. Calama, que se aprecia en la siguiente tabla, se observa que tan solo el 4,95 de las emisiones totales del año 2017 no se encontrará bajo limitaciones específicas de sus emisiones de NO_x.

Tabla 6.28: Espacios Regulatorios. Zona 2. Concón – Quintero - Puchuncaví

Fuente	% del Total	Condición
Fuentes Fijas		
Grupos electrogenos afectos a norma	0,2%	Regulado
Grupos electrógenos no afectos	0,1%	No Regulado
Calderas de generación eléctrica	75,6%	Regulado
Calderas sin ENAP	0,4%	Regulado
Procesos sin combustión	0,0%	No Regulado
Procesos con combustión	0,0%	No Regulado
Panaderías	0,0%	No Regulado
ENAP Refinería	14,8%	Regulado
Fuentes Móviles		
Medianos y Livianos	1,3%	Regulado
Motocicletas	0,0%	Regulado
Camiones	1,5%	No Regulado
Transporte público	2,8%	No Regulado
Fuentes móviles fuera de ruta	2,7%	Regulado
Emisiones Areales		
Residencial y comercial	0,4%	No Regulado
Quemas	0,0%	No Regulado

Fuente: Elaboración propia

6.5.3 Zona 3. Valparaíso Interior.

a. Resumen de medidas de línea de base y cronograma de activación

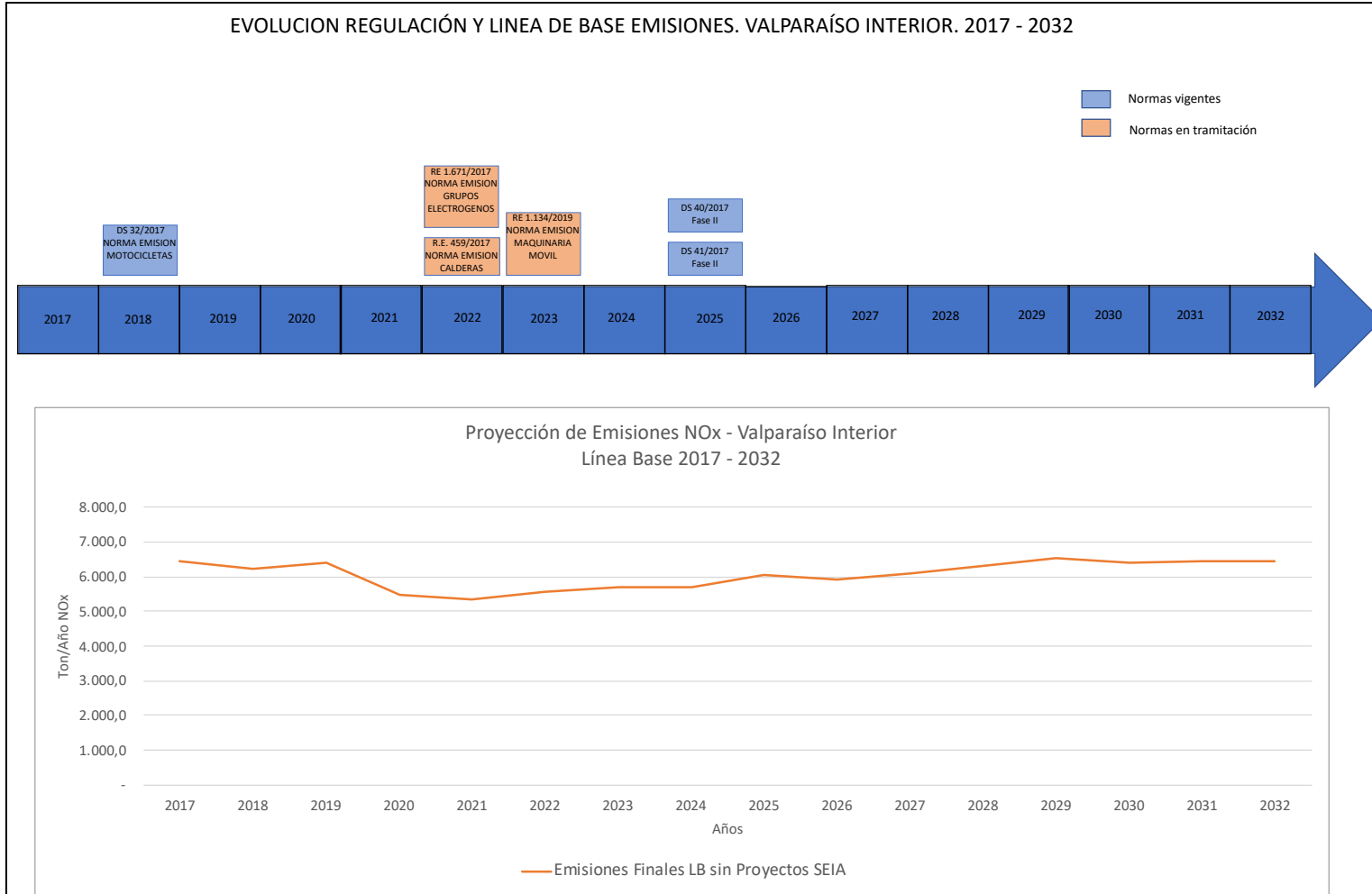
Como se señaló previamente en este informe, aún no se encuentra publicado el Anteproyecto del PPDA para la zona, por lo que sólo aplicarán para efectos de proyección de las emisiones, las medidas contempladas en las normas que se encuentran vigentes a partir del año 2017 y que se señalan en la siguiente tabla. Adicionalmente se considera la proyección de las emisiones de las fuentes de generación eléctrica y algunos factores de crecimiento para emisiones areales y de transporte en aquellos casos que corresponde.

Tabla 6.29: Medidas de Línea de Base. Zona 2. Valparaíso Interior

Regulación	Activación (año)	Fuente Reducción Emisiones
D.S. 32/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 104, de 2000, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para motocicletas". Ministerio del Medio Ambiente.	2018	AGIES
D.S. 40/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 54, de 1994, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos medianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
D.S. 41/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 211, de 1991, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos livianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
R.E. 459/2017 "Anteproyecto de la norma de emisión para calderas". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.671/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para grupos electrógenos". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.134/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para maquinaria móvil fuera de ruta". Ministerio del Medio Ambiente	2023 Estimado	AGIES

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-10: Evolución regulación y línea de base. Zona 3. Valparaíso Interior.



Fuente: Elaboración propia

b. Resultados de la proyección de emisiones

En esta zona, respecto del año base 2017, no se observan variaciones relevantes en la proyección al año 2032, aún cuando hay una disminución en la proyección de generación eléctrica y se observa un efecto en la aplicación de los nuevos estándares de emisión para vehículos livianos y medianos. Lo anterior se debe principalmente a las mayores emisiones proyectadas para camiones y transporte público.

Figura 6-11: Evolución emisiones totales. Zona 3. Valparaíso Interior.

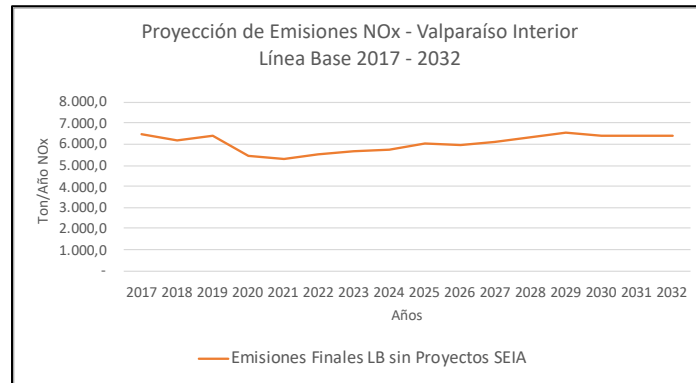
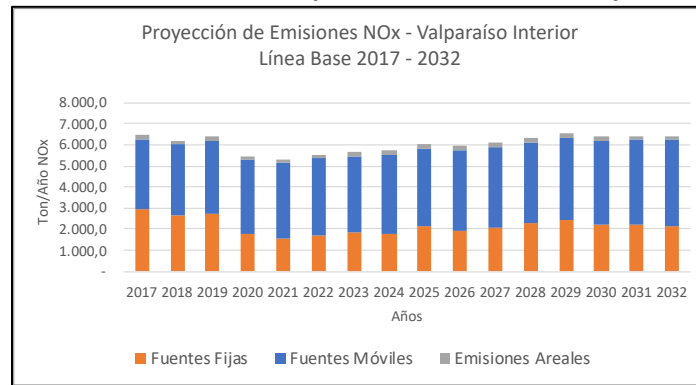


Figura 6-12: Evolución emisiones por sectores. Zona 3. Valparaíso Interior.



No obstante en este caso, se debe subrayar el hecho que aún no existe un anteproyecto de PPDA, el cual, dependiendo de las medidas que se adopten, debiera tener impacto hacia la baja en las emisiones de NO_x, en particular aquellas que se vinculan a la actividad cementera.

En Anexo digital, "Planilla Proyecciones.xlsx" se encuentra el detalle de las emisiones consideradas para los distintos sectores y años y en el informe se adjunta en Anexo los cuadros de resultados.

6.5.4 Zona 4. Concepción Metropolitano

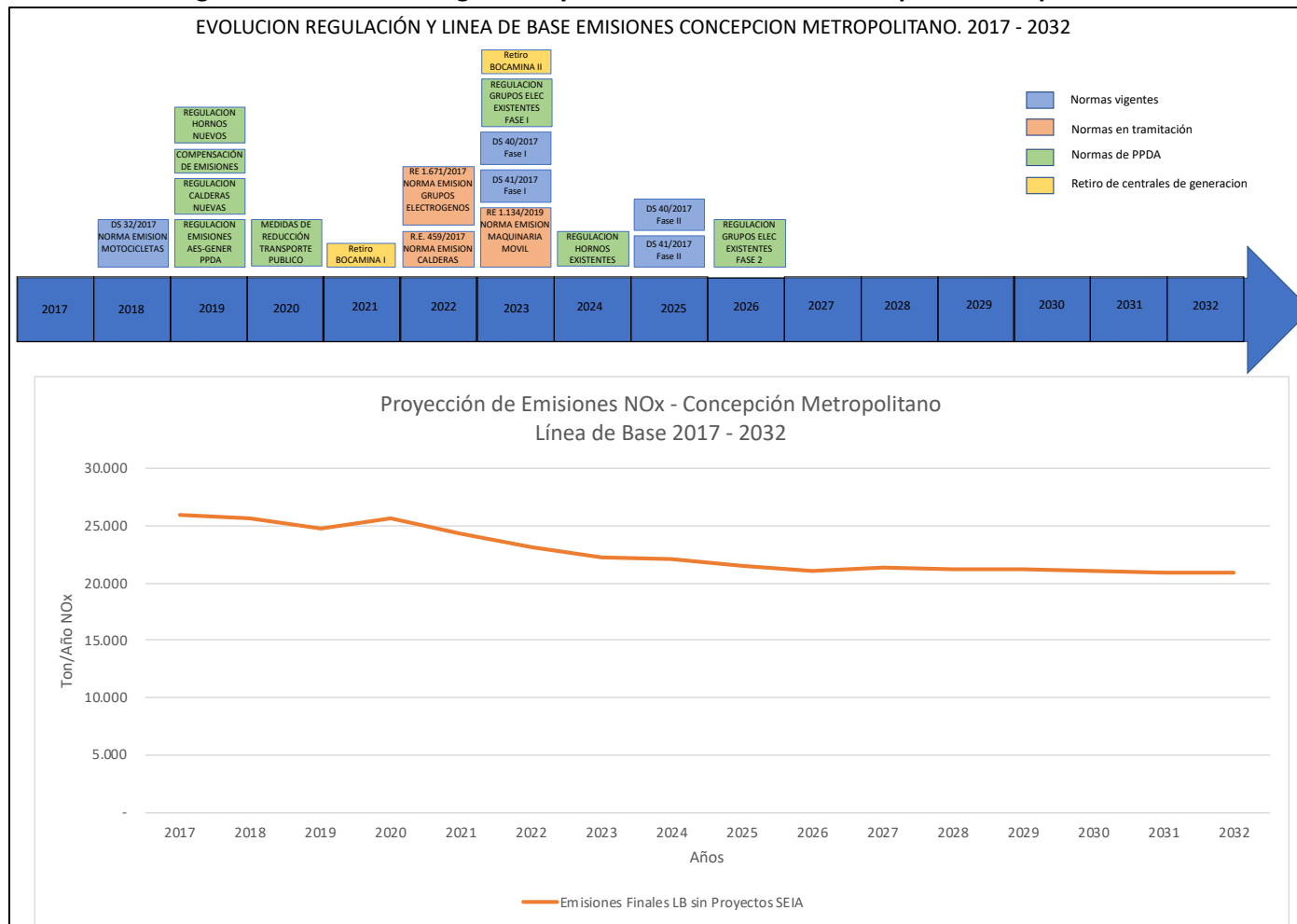
a. Resumen de medidas de línea de base y cronograma de activación

Tabla 6.30: Medidas de Línea de Base. Zona 1. Concepción Metropolitano.

Regulación	Activación (año)	Fuente Reducción Emisiones
D.S. 32/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 104, de 2000, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para motocicletas". Ministerio del Medio Ambiente.	2018	AGIES
D.S. 40/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 54, de 1994, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos medianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
D.S. 41/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 211, de 1991, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos livianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
R.E. 459/2017 "Anteproyecto de la norma de emisión para calderas". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.671/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para grupos electrógenos". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.134/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para maquinaria móvil fuera de ruta". Ministerio del Medio Ambiente	2023 Estimado	AGIES
D.S. N°6/2018 MMA. Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concepción Metropolitano.		
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo IV. Artículo 31. Límites máximos de emisión de NO_x para fuentes estacionarias 	2022 2025	AGIES PPDA
<ul style="list-style-type: none"> Capitulo IV. Numeral 6.2 Compensación de emisiones 	2019	
<ul style="list-style-type: none"> Capitulo IV. Numeral 7. Control emisiones grupos electrógenos 	2022	AGIES
Proyectos del SEIA no iniciados con RCA Aprobada	Por proyecto	Expediente SEIA

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-13: Evolución regulación y línea de base. Zona 4. Concepción Metropolitano.

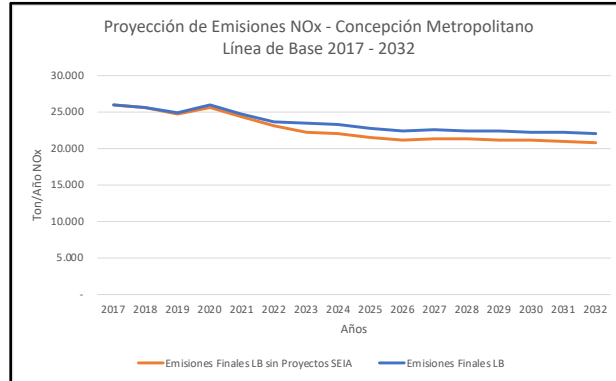


Fuente: Elaboración propia

b. Resultados de la proyección de emisiones

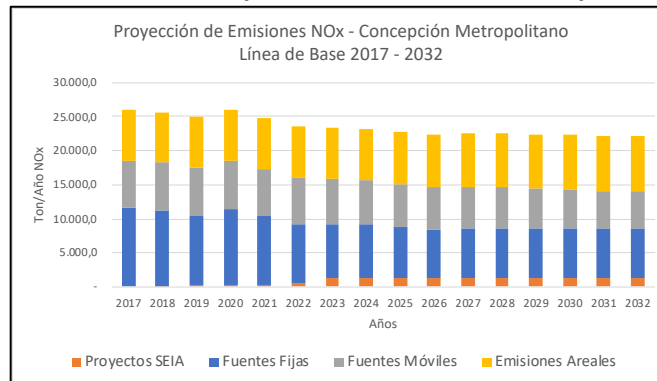
En esta zona, se observa una reducción de las emisiones totales del NO_x hasta el año 2026 y a partir de ese año y hasta el 2032, de acuerdo a esta proyección se mantiene relativamente constante, como se aprecia en la siguiente figura

Figura 6-14: Evolución emisiones totales. Zona 4. Concepción Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia

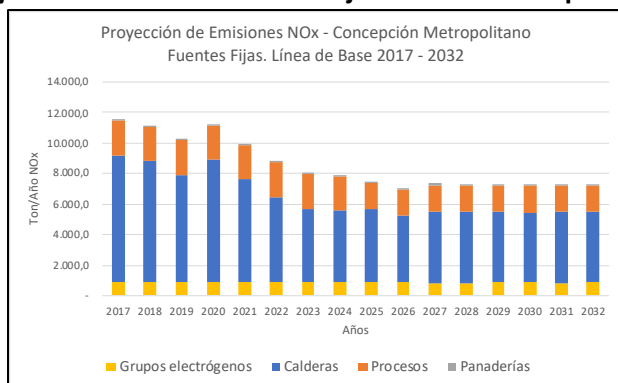
Figura 6-15: Evolución emisiones por sectores. Zona 4. Concepción Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia

En el análisis por tipo de fuentes, se aprecia una reducción importante en las fuentes fijas con una 36,6 que se produce principalmente debido a la salida del sistema de las centrales termoeléctricas Bocamina.

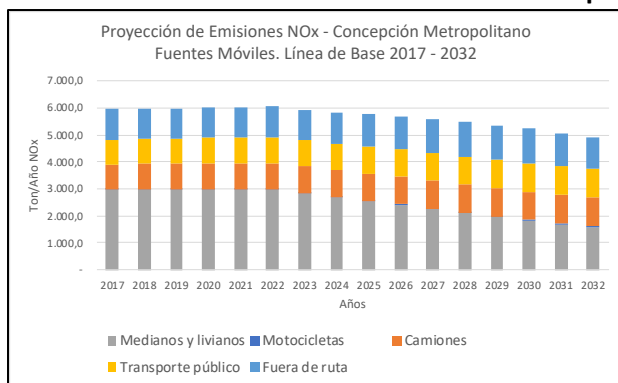
Figura 6-16: Proyección emisiones Fuentes Fijas. Zona 4. Concepción Metropolitano.



Fuente: Elaboración propia

En el caso de las fuentes móviles, el efecto más relevante tiene relación con la reducción de las emisiones producto de la aplicación de las nuevas normas de emisión para vehículos medianos y livianos, reduciendo las emisiones en un 46,9%. En el caso del transporte público la disminución es del 20% tal como lo indica el PPDA, aún cuando no se definen las medidas específicas que serán aplicadas para lograr este objetivo.

Figura 6-17: Proyección emisiones Fuentes Móviles. Zona 4. Concepción Metropolitano.



Fuente: Elaboración propia

En Anexo digital, “Planilla Proyecciones.xlsx” se encuentra el detalle de las emisiones consideradas para los distintos sectores y años y en el informe se adjunta en Anexo los cuadros de resultados.

c. Áreas regulatorias

A efectos del estudio de nuevas medidas regulatorias que se pudieran aplicar considerando lo existente en la línea de base 2017, el siguiente cuadro ilustra los sectores que se encuentran o encontrarán regulados (recientemente) por normas específicas de limitación de emisiones de NO_x.

Tabla 6.31: Espacios Regulatorios. Zona 4. Concepción Metropolitano

Fuente	% del Total	Condición
Fuentes Fijas		
Grupos electrogenos afectos a norma	3,5%	Regulado
Grupos electrógenos no afectos	0,1%	No Regulado
Calderas de generación eléctrica	27,2%	Regulado
Calderas afectas a norma	3,9%	Regulado
Calderas no afectas	0,9%	No Regulado
Procesos sin combustión	0,1%	No Regulado
Hornos	5,6%	Regulado
Otros procesos con combustion	2,9%	No Regulado
Panaderías	0,3%	No Regulado
Fuentes Móviles		
Medianos y Livianos	11,4%	Regulado
Motocicletas	0,1%	Regulado
Camiones	3,5%	No Regulado
Transporte público	7,8%	Regulado
Fuentes moviles fuera de ruta	4,3%	Regulado
Emisiones Areales		
Residencial y comercial	3,9%	No Regulado
Quemas	24,5%	No Regulado

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la zona de Concepción Metropolitano, un 36,2% de las emisiones de NO_x no tiene medidas de control directo, sin embargo, si se excluyen las quemas, ellas tan sólo llegan al 11,8%, siendo las más relevantes los camiones y el sector residencial y comercial. Este último cuenta ya con medidas para reducir emisiones de PM_{2,5}, las cuales sin lugar a dudas tendrán efectos en la reducción de emisiones de NO_x.

6.5.5 Zona 5. Región Metropolitana

a. Resumen de medidas de línea de base y cronograma de activación

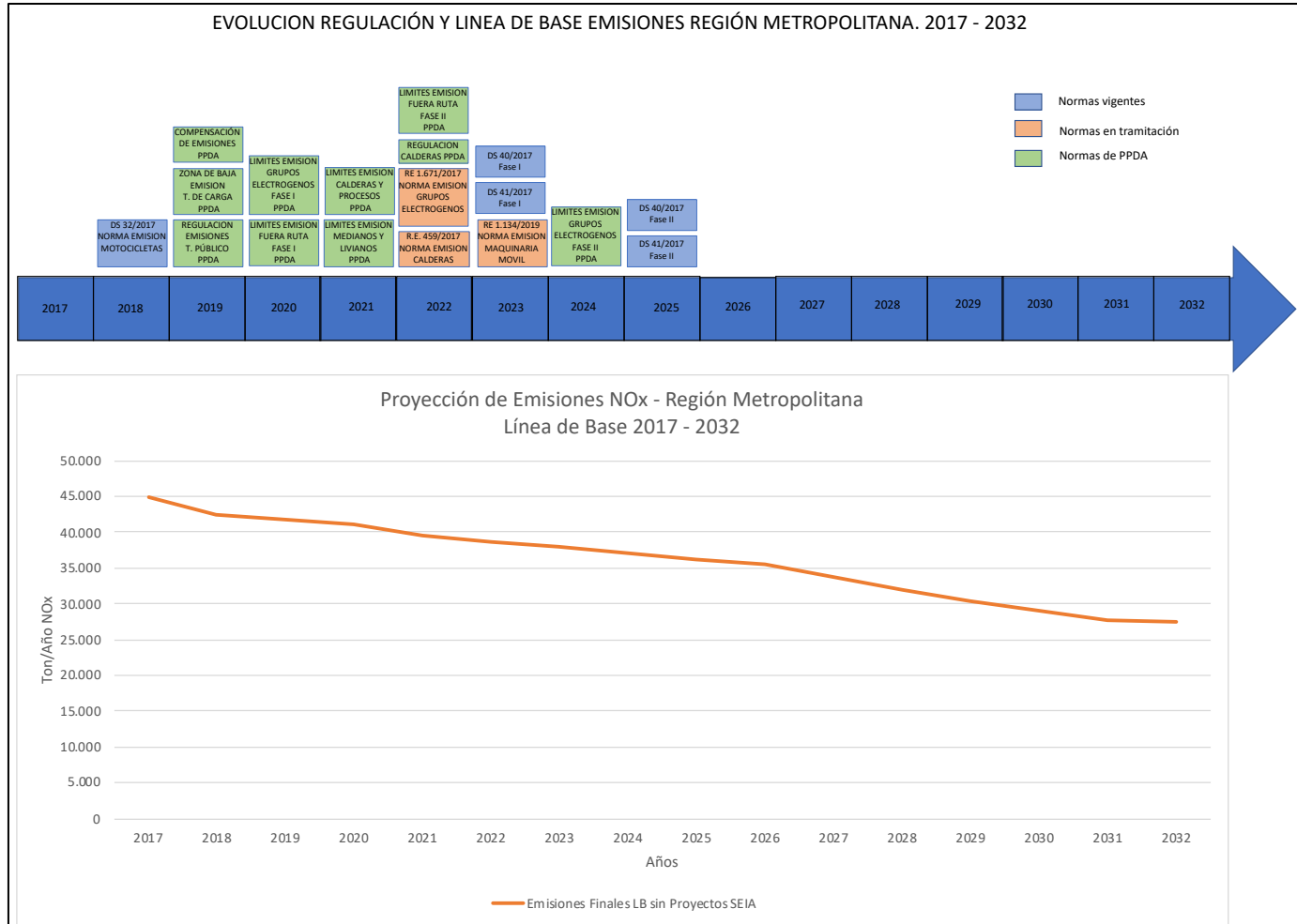
Tabla 6.32: Medidas de Línea de Base. Zona 5. Región Metropolitana

Regulación	Activación (año)	Fuente Reducción Emisiones
D.S. 32/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 104, de 2000, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para motocicletas". Ministerio del Medio Ambiente.	2018	AGIES
D.S. 40/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 54, de 1994, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos medianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
D.S. 41/2017. "Modifica Decreto Supremo N° 211, de 1991, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones que establece la norma de emisión para vehículos livianos". Ministerio del Medio Ambiente.	2023	AGIES
R.E. 459/2017 "Anteproyecto de la norma de emisión para calderas". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES
R.E. 1.671/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para grupos electrógenos". Ministerio del Medio Ambiente.	2022 Estimado	AGIES

R.E. 1.134/2019 "Anteproyecto de norma de emisión para maquinaria móvil fuera de ruta". Ministerio del Medio Ambiente	2023 Estimado	AGIES
D.S. N°31/2018 MMA. Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago.		
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo III. Numeral III.1. Transporte público 	2019	AGIES GEASUR 2015
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo III. Numeral III.2. Transporte de carga. Zona baja emisión 	2019	AGIES GEASUR 2015
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo III. Numeral III.3. Límites emisión livianos y medianos 	2021	AGIES
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo III. Numeral III.5. Maquinaria fuera de ruta 	2020 2022	AGIES
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo VI. Numeral VI.4. Control emisiones NO_x fuentes estacionarias. 	2021	AGIES El. Prop.
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo VI. Numeral VI.6.2. Compensación de emisiones SEIA. 	2019	
<ul style="list-style-type: none"> Capítulo VI. Numeral VI.8. Control emisiones grupos electrógenos. 	2020 2024	AGIES
Proyectos del SEIA no iniciados con RCA Aprobada	Por proyecto	Expediente SEIA

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-18: Evolución regulación y línea de base. Zona 5. Región Metropolitana.

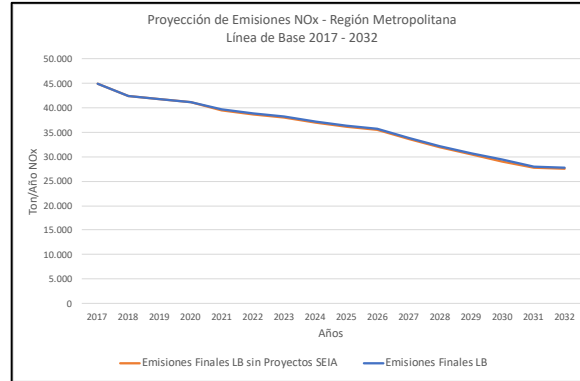


Fuente: Elaboración propia

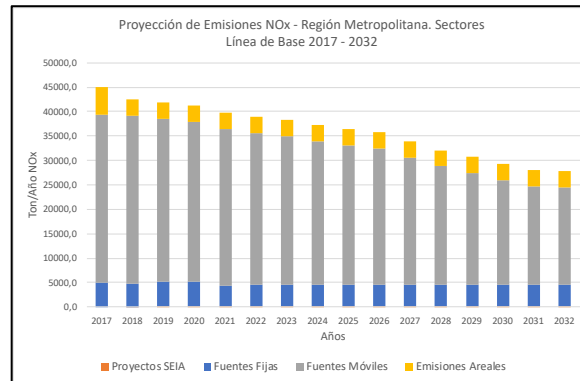
b. Resultados de la proyección de emisiones

En la Región Metropolitana, se observa un claro impacto en la proyección de las emisiones de NO_x de todas las medidas regulatorias vigentes, tanto las normas que se encuentran pronto a entrar en vigencia como el conjunto de limitaciones que establece el PPDA en materia de emisiones de NO_x.

Figura 6-19: Proyección de emisiones totales y por sectores. Zona 5. Región Metropolitana.



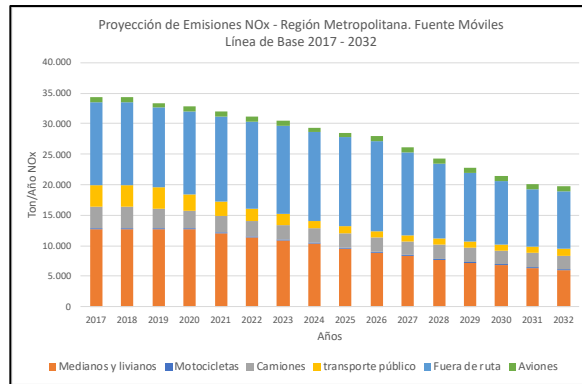
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

La reducción más importante se produce en el sector transporte, en el cual, la aplicación de nuevas normas de emisión en vehículos medianos, es la que genera la mayor reducción de emisiones en términos absolutos, seguido por la reducción que se generaría como resultado de la entrada en vigencia de la norma de que regula emisiones en fuentes móviles fuera de ruta. La siguiente figura y la Tabla ilustran esta situación.

Figura 6-20: Proyección de emisiones Fuentes Móviles. Zona 5. Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.33: Reducción emisiones Fuentes Móviles. Zona 5. Región Metropolitana

Tipo	Reducción Emisiones NO _x . Ton/año	% Reducción
Medianos y livianos	6.744	53%
Camiones	1.304	37%
Transporte público	2.453	70%
Fuera de ruta	4.050	30%
Total	14.551	42%

Fuente: Elaboración propia

7 ANALISIS DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN ADICIONALES A LINEA DE BASE 2017 – 2032

De acuerdo al análisis previo, en las zonas analizadas en el presente estudio entrarán en vigencia un conjunto de medidas de control que tienen un efecto directo en la reducción y limitación de las emisiones de NO_x, algunas de ellas que forman parte de normas de alcance nacional y otras específicas relacionadas con PPDA. La siguiente tabla y figura presenta un resumen dichas medidas y su cronograma de aplicación estimado considerando las 5 zonas.

Tabla 7.1: Medidas de limitación de emisiones en línea de base

Medida Limitación Emisiones NO _x	Tipo	Alcance por Zona					
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Resto del País
Fuentes Fijas							
Norma emisión grupos electrógenos nuevos	Norma Nacional	X	X	X	X	X	X
Límites emisión grupos electrógenos nuevos	PPDA				X	X	
Norma de emisión calderas	Norma Nacional	X	X	X	X	X	X
límites emisión calderas existentes	PPDA	X	X		X	X	
Límites emisión hornos nuevos	PPDA				X		
Límites emisión hornos existentes	PPDA				X		
Limitación emisiones complejos industriales	PPDA	X	X			X	
Norma de emisión centrales termoeléctricas	Norma Nacional		X	X	X	X	X
Compensación de emisiones	PPDA	X	X		X	X	
Cierre centrales generación termoeléctricas	Otra		X		X		X
Fuentes Móviles							
Norma emisión vehículos livianos	Norma Nacional	X	X	X	X	X	X
Norma emisión vehículos medianos	Norma Nacional	X	X	X	X	X	X
Norma emisión maquinaria fuera ruta	Norma Nacional	X	X	X	X	X	X
Norma emisión motocicletas	Norma Nacional	X	X	X	X	X	X
Límites de emisión buses transporte público	PPDA					X	
Zona baja emisión	PPDA					X	
Límites emisión vehiculos livianos y medianos	PPDA					X	
Límites de emisión maquinaria fuera de ruta	PPDA					X	

Se debe hacer notar que, considerando las regulaciones vigentes y las proyectadas en el escenario de línea de base, los espacios de reducción de emisiones para las distintas categorías de fuentes son limitadas dado que hay un cronograma de cumplimiento que aplica a las principales fuentes emisoras de NO_x.

7.1 Opciones de reducción adicionales de emisiones de NO_x.

7.1.1 Reducción de emisiones en grupos electrógenos existentes

El anteproyecto de norma de emisión para los grupos electrógenos considera solamente el equipamiento nuevo, mientras que para efectos de evaluar dicha norma se incluye una tasa de recambio. En consideración a lo anterior, es factible evaluar cual sería el efecto en las emisiones totales de los grupos electrógenos existente considerando la instalación de tecnologías de control en los mayores emisores.

Las tecnologías específicas de post-tratamiento de gases a efectos de reducir las emisiones de NO_x (entre otros gases) son las siguientes:

- Catalizador de oxidación diesel
- Filtro de partículas diesel
- Reducción catalítica selectiva

A continuación se resumen los costos y las eficiencias alcanzadas para cada uno de los sistemas⁷⁶.

Tabla 7.2: Sistema de reducción catalítica selectiva (SCR)

Rango de potencia [HP] (kWh)	Normativa	Emisiones no controladas de NO _x [(Ton/año)]	Costo promedio del capital [USD\$]	Costo promedio anualizado [\$/año]	Costo por Ton de NO _x removida [USD\$/Ton]
50 – 100 (37,285 – 74,57, promedio: 55,928)	Tier 0 (pre 1998)	0,570	7.350	3.000	5.848
	Tier 1 (1998-2003)	0,463			7.199
	Tier 2 (2004 – 2007)	0,389			8.569
	Tier 3 (2008 – 2011)	0,248			13.441
175 – 300 (130,497 – 223,71, promedio: 177,477)	Tier 0 (pre 1996)	2,20	23.324	9.520	4.808
	Tier 1 (1996 - 2002)	1,46			7.245
	Tier 2 (2003 – 2005)	1,05			10.074
	Tier 3 (2006 – 2010)	0,656			16.125
600 – 750 (447,42 – 559,275, promedio: 503,347)	Tier 0 (pre 1996)	6,24	66.150	27.000	4.808
	Tier 1 (1996 - 2001)	4,33			6.928
	Tier 2 (2002 – 2005)	3,05			9.836
	Tier 3 (2006 – 2010)	1,86			16.129
>750 (559,275, promedio: 745,7)	Tier 0 (pre 1996)	9,25	98.000	40.000	4.805
	Tier 1 (1996 - 2001)	6,40			6.944
	Tier 2 (2002 – 2005)	4,52			9.833
	Tier 3 (2006 – 2010)	2,76			16.103

Fuente: Estudio “Antecedentes para Elaborar una Norma Nacional de Emisión para Grupos Electrógenos”. Informe Final. Consultora EBP para Ministerio de Medio Ambiente.

⁷⁶ Tomado del Estudio “Antecedentes para Elaborar una Norma Nacional de Emisión para Grupos Electrógenos”. Informe Final. Consultora EBP para Ministerio de Medio Ambiente. El informe completo se encuentra disponible en https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2017/proyectos/53._Antecedentes_para_Elaborar_una_norma_Nacional_de_emision_para_GE_-_EBP.pdf

Tabla 7.3: Filtro de partículas (DPF)

Rango de potencia [HP] (kWh)	Normativa	Emisiones no controladas de NOX ([Ton/año])	Costo promedio del capital [USD\$]	Costo promedio anualizado [\$/año]	Costo por Ton de NOx removida [USD\$/Ton]
50 – 100 (37,285 – 74,57, promedio: 55,928)	Tier 0 (pre 1998)	0,0597	10.454	2.284	42.509
	Tier 1 (1998-2003)	0,0391			64.905
	Tier 2 (2004 – 2007)	0,0198			128.171
	Tier 3 (2008 – 2011)	0,0248			102.330
175 – 300 (130,497 – 223,71, promedio: 177,477)	Tier 0 (pre 1996)	0,105	20.788	4.175	44.180
	Tier 1 (1996 - 2002)	0,0661			70.180
	Tier 2 (2003 – 2005)	0,0345			134.461
	Tier 3 (2006 – 2010)	0,0394			117.738
600 – 750 (447,42 – 559,275, promedio: 503,347)	Tier 0 (pre 1996)	0,299	48.494	9.244	34.352
	Tier 1 (1996 - 2001)	0,164			62.629
	Tier 2 (2002 – 2005)	0,0979			104.914
	Tier 3 (2006 – 2010)	0,112			91.706
>750 (559,275, promedio: 745,7)	Tier 0 (pre 1996)	0,443	69.099	13.014	32.641
	Tier 1 (1996 - 2001)	0,243			59.506
	Tier 2 (2002 – 2005)	0,145			99.724
	Tier 3 (2006 – 2010)	0,166			87.108

Fuente: Estudio “Antecedentes para Elaborar una Norma Nacional de Emisión para Grupos Electrógenos”. Informe Final. Consultora EBP para Ministerio de Medio Ambiente.

Tabla 7.4: Catalizador de oxidación (DOC)

Rango de potencia [HP] (kWh)	Normativa	Emisiones no controladas de NOX ([Ton/año])	Costo promedio del capital [USD\$]	Costo promedio anualizado [\$/año]	Costo por Ton de NOx removida [USD\$/Ton]
50 – 100 (37,285 – 74,57, promedio: 55,928)	Tier 0 (pre 1998)	0,289	1.116	854	3.283
	Tier 1 (1998-2003)	0,196			4.841
	Tier 2 (2004 – 2007)	0,196			4.841
	Tier 3 (2008 – 2011)	0,196			4.841
175 – 300 (130,497 – 223,71, promedio: 177,477)	Tier 0 (pre 1996)	0,708	5.582	1.668	2.618
	Tier 1 (1996 - 2002)	0,196			9.456
	Tier 2 (2003 – 2005)	0,196			9.456
	Tier 3 (2006 – 2010)	0,196			9.456
600 – 750 (447,42 – 559,275, promedio: 503,347)	Tier 0 (pre 1996)	2,01	17.556	3.848	2.127
	Tier 1 (1996 - 2001)	0,988			4.327
	Tier 2 (2002 – 2005)	0,988			4.327
	Tier 3 (2006 – 2010)	0,988			4.327
>750 (559,275, promedio: 745,7)	Tier 0 (pre 1996)	2,98	26.461	5.470	2.040
	Tier 1 (1996 - 2001)	1,47			4.135
	Tier 2 (2002 – 2005)	1,47			4.135
	Tier 3 (2006 – 2010)	1,47			4.135

Fuente: Estudio “Antecedentes para Elaborar una Norma Nacional de Emisión para Grupos Electrógenos”. Informe Final. Consultora EBP para Ministerio de Medio Ambiente.

A efectos de proyectar el efecto de esta tecnología, se considerará que producto de la revisión de la norma se requiere que aquellos grupos generadores con emisiones superiores a 3 toneladas años deban reducir sus emisiones utilizando alguna o combinación de estas tecnologías, lo cual entrega eficiencias del orden del 90% en promedio. El plazo de cumplimiento, a efectos de adaptación

debiera ser de 3 años a partir del año 2022 (considerando este año como inicio de la vigencia de la revisión de la norma de calidad).

7.1.2 Reducción de emisiones en hornos existentes

La emisión generada por hornos existentes es relativamente alta en las zonas analizadas. En la Zona 4 Concepción Metropolitano y Zona 5 Región Metropolitana, existen limitaciones específicas de limitación de emisiones de NO_x en el marco del PPD.

En ese contexto, la reducción en hornos existentes se debe considerar como una alternativa viable en el marco de las opciones de los mayores emisores, cuya meta de reducción podría alcanzar del orden del 50% de las emisiones de NO_x⁷⁷. La siguiente tabla resume las emisiones de hornos con emisiones superiores a 3 ton/año en las distintas zonas.

Tabla 7.5: Emisiones totales hornos. Fuentes sobre 3 ton/año.

Zona	Ton/año NO _x
Zona 1	marginal
Zona 2	291,6
Zona 3	1.066,5
Zona 4	1.443,2
Zona 5	2.060,9

Fuente: Elaboración propia

Estas reducción se podrían alcanzar en la Zona 2 y Zona 3, dado que en 4 y 5 ya cuentan con limitaciones específicas que han sido incorporadas en la proyección de la línea de base. Los plazos de implementación estimados que se utilizarán serán los mismos utilizados para grupos electrógenos, 3 años a contar del año 2022.

Los costos promedios de las tecnologías asociadas se presentan en la siguiente tabla.

⁷⁷ Estudio "Generación de antecedentes técnicos y económicos para la elaboración de medidas para la reducción de emisiones en los procesos del sector industrial y de sectores emisores de compuestos orgánicos volátiles, en el marco del Plan de Prevención y Descontaminación". Centro Mario Molina Chile, para Ministerio de Medio Ambiente. 2016.

Tabla 7.6: Costos promedio tecnologías reducción emisiones NO_x. Hornos

Nivel de Emisión (Ton/año)	Sistema de Control	Costos Promedio			
		Inversión	VPN Variables	Total	Ton Reducida
900	Reducción Catalítica Selectiva	860.000	30.693.435	31.553.435	43.270
75		860.000	2.522.396	3.382.396	56.331
73		860.000	2.489.336	3.349.446	56.631
20		860.000	669.959	1.528.959	92.601
17		860.000	555.776	1.415.776	107.220
14		860.000	447.716	1.307.716	122.940
6		860.000	66.078	926.078	184.286
85	Quemadores Low NO _x	280.000	488.572	768.572	18.080
54		280.000	737.878	1.017.878	47.460
20		130.000	463.818	593.318	57.237
10		280.000	225.545	505.545	100.184
7		130.000	285.489	415.489	65.049
6		280.000	174.567	454.567	151.858
480	Recirculación de gases + Low NO _x	280.000	3.618.538	3.898.538	23.634
17		878.000	115.084	993.084	94.911
15		878.000	25.705	903.705	291.637
8		878.000	53.482	931.482	191.564
6		878.000	48.175	926.175	211.455

Fuente: Adaptado del Estudio "Antecedentes para Elaborar una Norma Nacional de Emisión para Grupos Electrógenos". Informe Final. Consultora EBP para Ministerio de Medio Ambiente.

7.1.3 Aplicación de revisión de norma de emisión camiones

Si bien no existen antecedentes detallados del efecto de esta revisión que se encuentra en desarrollo, esta corresponde a una medida adicional que impacta en las emisiones de NO_x en el horizonte 2017-2032.

A efectos de proyectar la reducción de emisiones esperadas, se aplicarán las tasas de reducción esperadas consideradas en el AGIES de la norma de fuentes móviles fuera de ruta. La medida aplicaría a partir del año 2022.

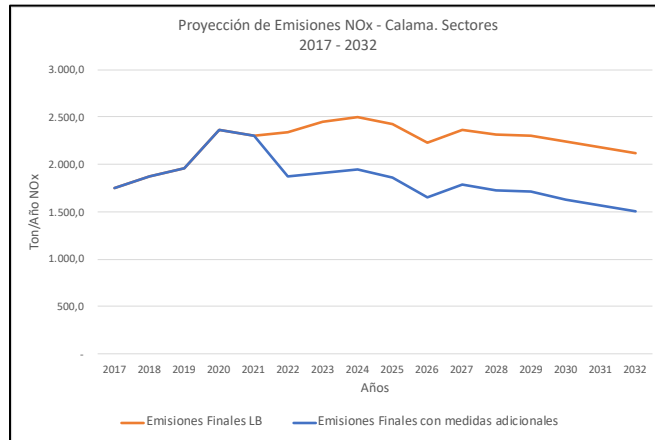
7.1.4 Aplicación de políticas de transporte similares a la RM en el resto de las zonas

En materia de políticas y/o medidas aplicadas al sector transporte público, sólo las Zona 4 Concepción Metropolitana y Zona 5 Región Metropolitana cuentan con medidas específicas de limitación de emisiones de NO_x.

Para efectos de evaluar esta medida, se considerará la aplicación de límites máximos de emisiones de NO_x a los vehículos que soliciten su primera inscripción en el Registro de Servicio de Transporte de Pasajeros. Para efectos del cálculo de las emisiones en el horizonte de 15 años, se utilizarán los factores de reducción aplicados a la Región Metropolitana, evaluados en el estudio GEASUR.

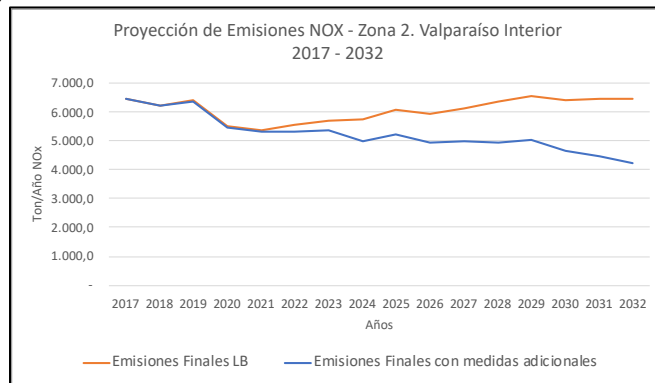
7.2 Resultados de la aplicación de nuevas medidas.

Figura 7-1: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 1. Calama



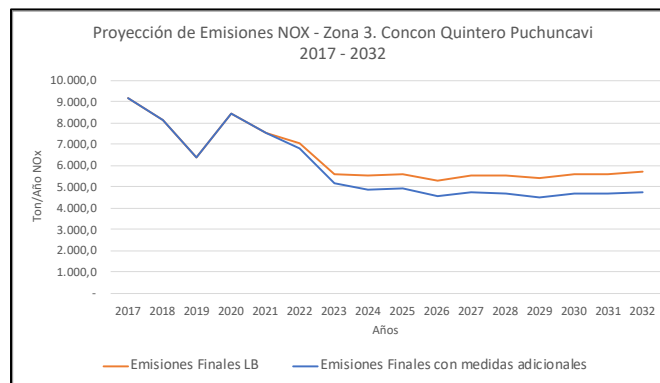
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-2: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 2. Valparaíso Interior



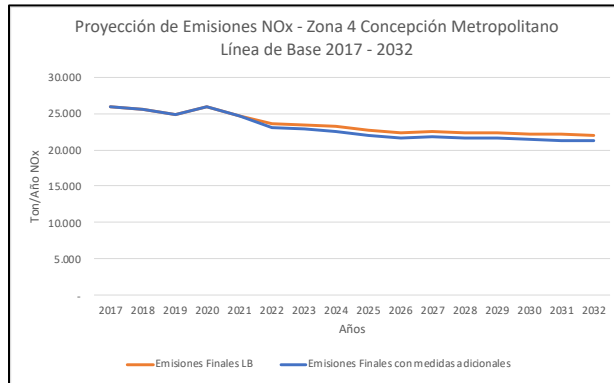
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-3: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 3. Concon – Quintero - Puchuncavi



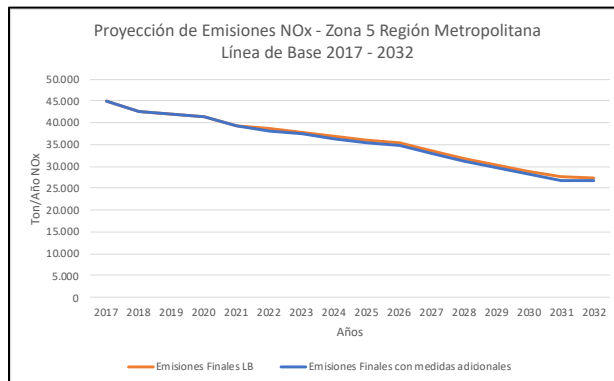
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-4: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 4. Concepción Metropolitano



Fuente: Elaboración propia

Figura 7-5: Proyección emisiones con medidas adicionales. Zona 5. Región Metropolitana



Fuente: Elaboración propia

8 MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA DEL NO₂

8.1 Antecedentes generales del dióxido de nitrógeno en la atmósfera

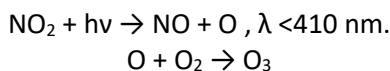
En el ámbito de la contaminación atmosférica los óxidos de nitrógeno (NO_x) juegan un rol importante en la calidad del aire, pues son precursores de reacciones fotoquímicas secundarias que resultan en la formación de ozono y aerosoles, entre otras especies.

La mayor parte de los NO_x, son emitidos como resultado de la quema de combustibles fósiles a altas temperaturas. También son emitidos, pero en menor medida en la quema de biomasa, en descargas eléctricas en la atmósfera y en procesos biológicos asociados a actividad microbiana en suelos fertilizados para agricultura.

Las emisiones de NO_x se componen de una mezcla de dos especies, óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), en general con una proporción mayor de NO, que posteriormente se convierte a NO₂ por oxidación en la atmósfera en escalas de tiempo del orden de minutos⁷⁸.

En relación con la proporción que representa el NO₂ en el total del NO_x emitido primariamente por las fuentes, es decir, en la “boca” de la chimenea o tubo de escape, tiene un amplio rango de valores, los que dependen de varios factores: la tecnología de combustión, los niveles de carga y los dispositivos de control de emisiones presentes. En el caso de las plantas generadoras de energía, la proporción NO₂/NO_x es del orden de 2% en calderas a carbón, cerca de 8% en motores de petróleo pesado, 20% en turbinas de ciclo abierto a petróleo diésel y 17% con gas natural, mientras que en ciclos combinados representa un 50%. En el caso de fuentes móviles, la proporción varía entre 5% hasta 50% en vehículos diésel y es del orden del 30% en vehículos a gasolina. En el caso de la quema de biomasa la proporción se estima en menos del 10%.

El NO₂ es oxidado principalmente en fase gaseosa a través de OH a ácido nítrico (HNO₃). Este también da lugar a aerosoles y núcleos de condensación. Sin embargo, el principal rol de los óxidos de nitrógeno es su carácter de precursor de ozono (O₃). En la tropósfera el O₃ se produce a partir de la fotólisis del NO₂:



El NO₂ es químicamente reactivo, es un precursor de sustancias ácidas y dependiendo de las condiciones atmosféricas, es removido por deposición seca, con tasas del orden de unos pocos milímetros por segundo. Su tiempo de recambio troposférico se estima, a nivel global, en el orden de algunos días. Por lo tanto, su dispersión puede ocurrir a escalas local y regional⁷⁹.

⁷⁸ Human health risk assessment for ambient nitrogen dioxide, Mayo 2016, Health Canada.

⁷⁹ “Contaminación por aerosoles en la Ciudad de Santiago. Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en la Ciudad de Santiago”, 2006, capítulo “Trazas Atmosféricas y su Modelación”, Laura Gallardo. (pp 89-120), Santiago, Chile, Editorial Universitaria y Centro de Química Ambiental, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. Disponible en http://www.dim.uchile.cl/~lgallard/publications_lgk/Capitulo_4.pdf

Como se ha mencionado previamente, el NO₂ juega un rol central en la formación de ozono y aerosoles secundarios, y estos últimos constituyen una parte significativa del MP_{2.5}. En efecto, una compleja cadena de reacciones, gobernadas por la disponibilidad de precursores, compuestos orgánicos volátiles (VOC) y NO_x, en la presencia de luz solar dan lugar a la formación de ozono y material particulado fino.

Dos publicaciones recientes (2020) sobre la contaminación fotoquímica en la Región Metropolitana, demuestran la importancia de la capacidad oxidativa en la atmósfera (NO₂+O₃) y relación NO_x/VOC para la formación de ozono y material particulado fino. Por una parte, se demuestra la mayor participación de aerosoles secundarios en el MP_{2,5} en la zona oriente respecto de las localizadas al sur de la RM⁸⁰, y por otra, se explica la aparente paradoja del aumento significativo de la formación de ozono en la zona oriente⁸¹ durante los fines de semana, cuando hay menor disponibilidad de NO_x respecto a los días laborales.

Luego, cualquier enfoque regulatorio para NO₂ debe tener presente las consecuencias sistémicas sobre el O₃ y el MP_{2.5} a nivel regional, especialmente para las zonas viento abajo de las urbes donde las condiciones son favorables para la contaminación fotoquímica.

A continuación, se presentan los aspectos metodológicos del enfoque utilizado en este estudio para el análisis de las relaciones entre emisión y concentración para NO₂ y sus acompañantes, O₃ y MP_{2.5}.

8.2 Aspectos metodológicos para estimar la relación emisión-concentración

De acuerdo a la información proporcionada por las estaciones de medición de NO₂ a lo largo del país, la zona que actualmente tiene los niveles más altos de este contaminante es la Región Metropolitana (RM), con niveles cercanos al 50% de la norma vigente, tanto para promedios de una hora como para promedios anuales. Las otras zonas definidas para el estudio tienen niveles comparativamente más bajos, todos inferiores al 30% tanto para la norma anual como norma horaria.

Sin embargo, en un escenario de norma con niveles más estrictos, como por ejemplo los de la OMS, la RM se encontraría en situación de latencia para norma horaria y en saturación para norma anual, mientras que las otras zonas se encontrarían aproximadamente en el 50% para esos niveles de referencia anual como horaria.

La modelación de contaminantes como NO₂, Ozono y MP_{2,5} secundario requiere la aplicación de modelos fotoquímicos. Los modelos fotoquímicos que cumplen los criterios generales establecidos en la “Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA” del SEA y que además han sido usados con éxito en Chile son los modelos: WRF-Chem, CAMx y CMAQ.

⁸⁰ Camilo Menares , Laura Gallardo , Maria Kanakidou , Rodrigo Seguel & Nicolás Huneeus (2020) Increasing trends (2001–2018) in photochemical activity and secondary aerosols in Santiago, Chile , *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 72:1, 1-18, DOI: 10.1080/16000889.2020.1821512, <https://doi.org/10.1080/16000889.2020.1821512>

⁸¹ Seguel, R. J., Gallardo, L., Fleming, Z. L. and Landeros, S. 2020. Two decades of ozone standard exceedances in Santiago de Chile. *Air Qual. Atmos. Health* 13, 593–605. doi:10.1007/ s11869-020-00822-w

Los modelos regionales de química atmosférica simulan la emisión, el transporte, la evolución química y la eliminación de constituyentes atmosféricos en un dominio determinado. Estos modelos son muy útiles para los pronósticos de la calidad del aire, para la evaluación del impacto asociado con las actividades contaminantes y para la validación de la teoría mediante comparaciones con las observaciones⁸². Sin embargo, exigen la elaboración de detallados inventarios de emisiones, con una descripción fina de la especiación de compuestos y ciclos de emisión de las fuentes que para el caso de este estudio, fue realizado para la Región Metropolitana.

La RM es la zona más expuesta a la contaminación fotoquímica y por ello la con mayores requerimientos de estudio para escenarios normativos. Para efectuar este análisis se realizó una modelación fotoquímica de la RM para el escenario de línea base. Con estos resultados se analizan los niveles resultantes de NO₂, O₃ y MP_{2.5} secundario, con el fin de establecer los patrones de exposición de la población a nivel regional a las concentraciones ambientales de NO₂, O₃ y MP_{2.5}. Junto con la modelación fotoquímica se ha aplicado un enfoque empírico relacionando los inventarios elaborados para las emisiones de NO_x del escenario 2017 y las proyecciones de línea de base de emisiones de NO_x, con las concentraciones ambientales medidas de NO₂, O₃ y MP_{2.5}, y con ello se han estimado los escenarios futuros de calidad de aire para NO₂, O₃ y MP_{2.5} en función de las proyecciones del inventario de NO_x.

El análisis empírico también se ha aplicado para el resto de las zonas, mas no modelación fotoquímica, ello considerando que los niveles actuales de NO₂ ambiental están muy por debajo de la norma vigente y también de los niveles de referencia OMS, y que la elaboración de inventarios de emisiones para esas zonas en este estudio se limitan a emisiones de NO_x.

8.3 Región Metropolitana: Modelación fotoquímica

Para el estudio de la RM se utilizará el sistema de modelación WRF/CAMx, el cual considera como información meteorológica de entrada los resultados del modelo meteorológico de mesoescala WRF, que es adecuado para simular los fenómenos atmosféricos en condiciones complejas de topografía y circulación de vientos como es en la zona de la Región Metropolitana (RM).

Se decidió usar el modelo CAMx, considerando las condiciones técnicas para una zona compleja como la RM en base a la información disponible en relación a condiciones de borde e iniciales, la calidad de los archivos de entrada meteorológicos y de las emisiones provenientes del inventario de emisiones.

Los resultados del modelo CAMx, se comparan con los datos de NO₂ y O₃ registrados por las estaciones monitoras ubicadas en la RM para el análisis de sus diferencias y deficiencias.

En las siguientes secciones se presenta una descripción de los modelos usados en este estudio.

⁸² WRF-GC (v1.0): online coupling of WRF (v3.9.1.1) and GEOS-Chem (v12.2.1) for regional atmospheric chemistry modeling – Part 1: Description of the one-way model, Haipeng Lin et al. (Jul 2020).

8.3.1 Descripción general del modelo meteorológico WRF

El modelo meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting Model). WRF es uno de los modelos meteorológicos de pronóstico más avanzados y completos. Cuenta con un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software que facilita los cálculos computacionales del sistema. El modelo ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorológicas a través de escalas de decenas de metros a miles de kilómetros.

WRF es un modelo tipo no-hidrostático que resuelve las ecuaciones primitivas que representan la circulación atmosférica. El modelo representa el estado de la atmósfera en una grilla tridimensional en términos de alrededor de diez variables fundamentales (las tres componentes de viento u-v-w, la temperatura, presión atmosférica, razón de mezcla y varias variables microfísicas que representan las diferentes fases del agua líquida).

El modelo obtiene sus condiciones de borde de datos históricos globales del clima, que son mantenidos por centros operacionales de pronóstico del tiempo. Estos datos globales representan el estado completo de la atmósfera en todo el planeta y son resultado de análisis informáticos sofisticados de datos superficiales disponibles y de observaciones a niveles más altos. Cada período de análisis combina decenas de miles de mediciones individuales tomadas en todo el globo terrestre.

WRF es diseñado para resolver fenómenos de la meso y micro-escala y, por lo tanto, sus grillas pueden alcanzar altas resoluciones hasta unos cientos de metros. Sin embargo, la cantidad de cálculo requerido para grillas de resolución tan alta obliga que el dominio computacional sea relativamente pequeño. Para poder incorporar la gama completa de fenómenos meteorológicos que ocurren en la atmósfera real el modelo utiliza una configuración de grillas anidadas.

El alcance de la grilla más gruesa es seleccionado para capturar el efecto de los fenómenos de la escala sinóptica dentro de la región de interés, mientras que la grilla más fina permite que el modelo desarrolle circulaciones regionales relacionadas con la interacción de la atmósfera con la topografía.

8.3.2 Descripción general del modelo fotoquímico CAMx

El modelo fotoquímico CAMx es un modelo euleriano de dispersión que permite la modelación integrada de los distintos mecanismos de dispersión fotoquímica y transporte de los contaminantes en fase gaseosa y particulado, y evalúa el incremento en los niveles de contaminantes secundarios, tales como, Ozono (O₃), MP2,5 Secundario y NO₂, debido a emisiones de precursores de estos contaminantes, en un área de interés.

El Modelo Integral de Calidad del Aire con extensiones (**C**omprehensive **A**ir quality **M**odel with **e**xtensions **CAMx**) es un modelo de cuadrícula fotoquímica de última generación que comprende un tratamiento de "una atmósfera" de la contaminación del aire troposférico (ozono, partículas, tóxicos del aire) en escalas espaciales que van desde vecindarios hasta continentes. Es un sistema de código abierto que es computacionalmente eficiente y flexible. El código fuente de Fortran del modelo es modular y está bien documentado. Los archivos de entrada / salida predeterminados

están estructurados en un formato binario consistente con Fortran. Alternativamente, los archivos de salida se pueden escribir opcionalmente en el formulario de datos comunes de red (netCDF).

CAMx comprende el componente central de un sistema de modelado de la calidad del aire. Las entradas de CAMx se desarrollan utilizando modelos independientes de terceros y herramientas de procesamiento que caracterizan la meteorología, las emisiones y otras condiciones ambientales como la cobertura terrestre, las propiedades radiativas y las condiciones de contorno. Se necesitan programas de interfaz para traducir los productos de cada uno de estos modelos / procesadores en los campos de entrada y formatos específicos requeridos por CAMx. Una vez que se completa la simulación de calidad de aire, se utilizan programas adicionales para post-procesar los campos de concentración, desarrollar estadísticas y medidas de rendimiento del modelo, manipular la salida de la herramienta de sondeo en varios formatos informables y traducir los resultados sin procesar en formularios necesarios para fines regulatorios. Se pueden utilizar softwares gráficos comúnmente disponibles para ver archivos de salida binarios de CAMx nativos; algunos como PAVE y VERDI pueden leer archivos CAMx directamente, otros requieren que los datos CAMx existan en formatos de datos comunes como netCDF⁸³.

Desde 1996, CAMx ha sido empleado extensamente por agencias gubernamentales locales, estatales, regionales y federales, instituciones académicas y de investigación y consultores privados para evaluaciones regulatorias e investigación general en USA y el mundo. Esto debido a la capacidad del modelo de realizar lo siguiente:

- Simular la calidad del aire para muchas escalas geográficas
- Tratar una gran variedad de contaminantes inertes y químicamente activos, tales como: gases fotoquímicos, partículas, mercurio y tóxicos.
- Realizar análisis de atribución, sensibilidad y proceso de la fuente
- Aplicar paralelización de memoria distribuida y compartida

Además, CAMx tiene ventajas con respecto a un tratamiento más realista, completo y explícito de muchos procesos como:

- Numerosos tipos / fuentes de emisión
- Meteorología compleja
- Química no lineal compleja
- Eliminación de contaminantes por vías múltiples
- Amplia gama de escalas y aplicabilidad
- Urbano a global

8.3.3 Información ambiental de la Región Metropolitana

En esta sección se presenta una descripción de la Región Metropolitana, considerando aspectos tales como: clima, características topográficas y meteorología.

⁸³ Manual de usuario de CAMx.

8.3.3.1 Descripción climatológica de la Región Metropolitana

La Región Metropolitana (33,5° S, 70,6° W, 550 m sobre el nivel del mar (m.s.n.m)) tiene una población de 7.112.808 habitantes correspondiente al 62,4% del total del país, de los cuales un 87,8% corresponde a población urbana y un 12,2% a rural (INE, 2017). Se encuentra confinada entre la Cordillera de los Andes al este con alturas sobre 4000 m, la cordillera de la costa al oeste con alturas sobre 1000 m y cadenas montañosas al norte y al sur que limitan el ingreso de masas de aire al valle de la región (Muñoz and Corral, 2017).

El clima de la región Metropolitana corresponde al tipo “mediterráneo”, de estación seca prolongada con un invierno lluvioso. La temperatura media anual es de 13,9 °C, el mes más cálido es el mes de enero, con una temperatura de 22,1 °C, mientras que el mes más frío corresponde a julio con 7,7 °C. Las precipitaciones alcanzan un promedio anual de 356,2 mm., distribuyéndose de forma heterogénea desde el punto de vista transversal, disminuyendo desde la costa hacia la depresión intermedia, para aumentar nuevamente en la cordillera de los Andes (BCN, 2020).

Desde el punto de vista sinóptico, la ubicación subtropical de la Región Metropolitana hace que el clima regional sea dominado de forma semi-permanente por el anticiclón del pacífico y su inversión de subsidencia proveyendo de condiciones de alta estabilidad en la tropósfera baja de la Región Metropolitana (Rutllant and Garreaud, 1995). Esto se traduce en cielos despejados con una variabilidad sinóptica limitada, principalmente en los meses de invierno, cuando los sistemas frontales de latitudes medias atraviesan la región. Perturbaciones sinópticas llamadas bajas costeras se propagan hacia la región ocasionalmente fortaleciendo la inversión de subsidencia y la estabilidad de la parte inferior de la tropósfera, lo que resulta en días despejados en invierno (Muñoz and Undurraga, 2010), alta estabilidad atmosférica, y malas condiciones de ventilación.

8.3.3.2 Descripción topográfica de la Región Metropolitana y dominio de modelación

El relieve de la Región Metropolitana presenta tres unidades que son de oriente a poniente, la Cordillera de los Andes, la Cuenca de Santiago y la Cordillera de la Costa. La descripción de estas unidades es la siguiente:

- **Cordillera de los Andes:** Se presenta alta y maciza. Es en esta región donde la actividad volcánica vuelve a aparecer con los conos volcánicos que dan las mayores alturas a esta cordillera. Entre estos podemos nombrar el Tupungato de 6.570 metros, San José de 5.856 metros y Maipo de 5.264, Nevado de los Piuquenes de 6010, cerro Juncal de 6.060 y el cerro Plomo de 5.430 metros.

La Cordillera de los Andes, con su imponente altura que permite la presencia de nieves permanentes, proporciona a esta región grandes recursos hídricos, mineros y turísticos.

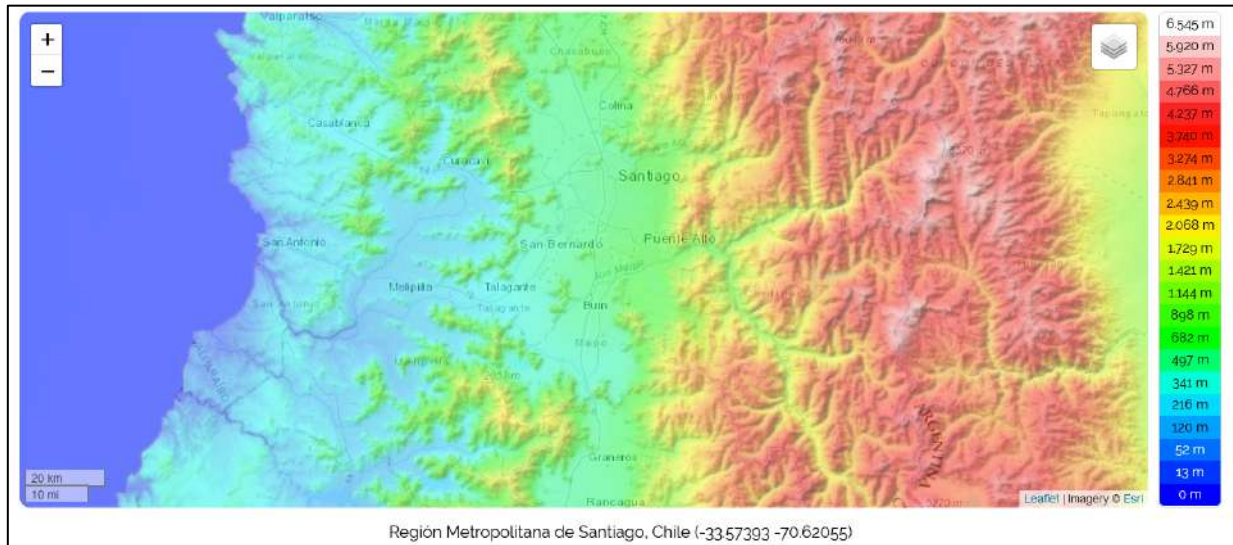
- **La Cuenca de Santiago:** Tiene una longitud de 80 km. en dirección Norte-Sur y 35 km. de ancho Este-Oeste, se ubica entre la Cordillera de la Costa y las primeras estribaciones de la Precordillera Andina, delimitada por el norte por el cordón montañoso de Chacabuco y por el

sur por los cerros de Paine, constituye una unidad orográfica de gran importancia. El suelo de la Cuenca de Santiago se encuentra ocupada por el área urbana de esta ciudad, a una altitud de 520 msnm. Los españoles a su llegada se asentaron en lo que es hoy el área céntrica de la ciudad de Santiago.

- **Cordillera de la Costa:** En esta región, la Cordillera de la Costa es el límite con la Región de Valparaíso y su fisonomía se presenta como un cordón compacto Sur- Norte que delimita por el poniente a la Cuenca de Santiago con alturas sobre los 2.000 metros. El cordón de los cerros del Roble (2.222 msnm), la Campana (1.828 msnm), Vizcachas (2.046 msnm), el Roble Alto (2.185 msnm) y los altos de Chicauma y Lipangue que dan forma a la cuenca de Santiago por el oeste, detienen las comunicaciones entre Santiago y la costa⁸⁴.

La topografía de la Región Metropolitana de Santiago de Chile se muestra en Figura 8-1.

Figura 8-1: Topografía Región Metropolitana.



Fuente: <https://es-uy.topographic-map.com/>.

En cuanto a los recursos hídricos, se dividen en superficiales y subterráneos. Los recursos superficiales en el caso de la Región Metropolitana están constituidos por el río Maipo y sus tributarios, entre los cuales se incluye el río Mapocho cuya cuenca andina es independiente.

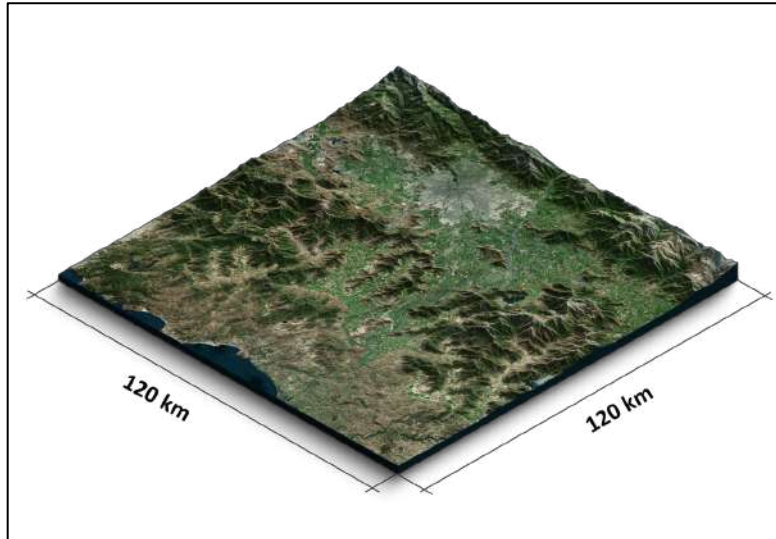
El principal sistema colector de aguas superficiales es la cuenca del Maipo, cuya vertiente de captación coincide por el este con el límite de Argentina; drena una superficie de 15.000 kilómetros cuadrados, y su cauce principal presenta un recorrido de 250 kilómetros desde su nacimiento hasta las laderas del volcán Maipo hasta su desembocadura en el Océano Pacífico⁸⁵.

⁸⁴ Información territorial obtenida de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/relieve.htm>

⁸⁵ Información territorial obtenida de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/hidrografia.htm>

Para este estudio se consideró un área de estudio de 120 x 120 km² para la implementación del sistema de modelación fotoquímico CAMx. Esta área se muestra en Figura 8-2 y su descripción más detallada se presenta más adelante en sección 8.3.5

Figura 8-2: Área de la Región Metropolitana considerada en este estudio.



Fuente: Elaboración propia.

8.3.3.3 Información meteorológica de la Región Metropolitana año 2017

La red meteorológica de la Región Metropolitana perteneciente a la red del Sistema de Información de Calidad del Aire (SINCA), está compuesta por 11 estaciones, las cuales cubren gran parte de la Región Metropolitana. Sin embargo, en el presente informe se utilizaron 9, debido a que eran las únicas que presentaban datos válidos para el año 2017 en estudio. Estas 9 estaciones son: Cerro Navia, Independencia, La Florida, Las Condes, Pudahuel, Parque O'Higgins, Puente Alto, El Bosque y Talagante. Sin embargo, Las Condes sólo es presentada, ya que sus datos no fueron utilizados para la presentación de la línea base y comparación con el modelo debido a presentar 0% de disponibilidad de datos de velocidad y dirección de viento (Tabla 8.1).

En Tabla 8.1 se presenta la información acerca de la ubicación y porcentaje de datos válidos de las variables meteorológicas velocidad y dirección del viento, humedad relativa y temperatura registradas por cada una de las estaciones de monitoreo mencionadas anteriormente, durante el periodo enero - diciembre del año 2017.

Los datos de las estaciones fueron validados siguiendo los lineamientos de la EPA, en relación a registros incoherentes, y datos sin variación en una cierta cantidad de horas. Esto significa que fueron descartados registros negativos en la velocidad y dirección de viento y humedad relativa y datos sin variación por más de dos horas en las cuatro variables analizadas.

Tabla 8.1: Características de las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana, obtenidas de red SINCA para el año 2017.

Estación	Abreviatura	Latitud	longitud	Variables Medidas (%)			
				VV	DV	HR	T
Cerro Navia	CN	-33,4331	-70,7321	99,7	99,7	99,1	99,7
Independencia	IN	-33,4223	-70,6511	99,8	99,8	99,3	98,4
La Florida	LF	-33,5167	-70,5882	98,6	98,6	98,1	54,1
Las Condes	LC	-33,3768	-70,5233	0,0	0,0	79,6	85,3
Pudahuel	PU	-33,4378	-70,7501	95,9	95,1	97,6	94,8
Parque O'Higgins	PO	-33,4642	-70,6607	95,9	95,9	94,1	95,1
Puente Alto	PA	-33,5914	-70,5944	99,7	99,7	0,0	99,6
El Bosque	EB	-33,5470	-70,6662	85,0	85,0	98,3	99,0
Talagante	TA	-33,6738	-70,9530	97,3	97,3	96,3	97,0

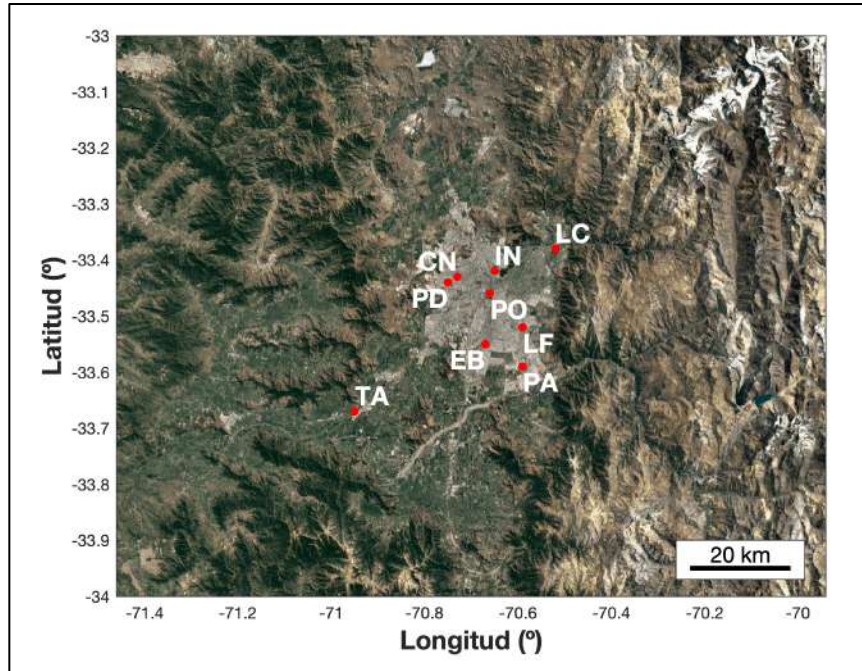
VV: velocidad de viento DV: dirección de viento HR: humedad relativa T: temperatura del aire.

Fuente: Elaboración propia con información de SINCA.

Tomando como criterios la disponibilidad de datos y la localización geográfica, se optó por mostrar en el presente capítulo la meteorología del año 2017 mediante las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante. La ubicación de las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana se muestra en Figura 8-3.

Dado lo anterior en la presente sección se muestra la caracterización meteorológica de las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins y El Bosque, todas localizadas en la ciudad de Santiago en un suelo de tipo urbano, y estación Talagante localizada a unos 30 km al Suroeste del centro de la ciudad, de suelo de características más bien rurales. Esta última, como una forma de diferenciación entre el detalle meteorológico de suelo urbano respecto a uno de tipo rural y revisión de respuesta del modelo meteorológico en ambos tipos de sistemas (Ver 8.3.4).

Figura 8-3: Ubicación Estaciones Meteorológicas de la Región Metropolitana.



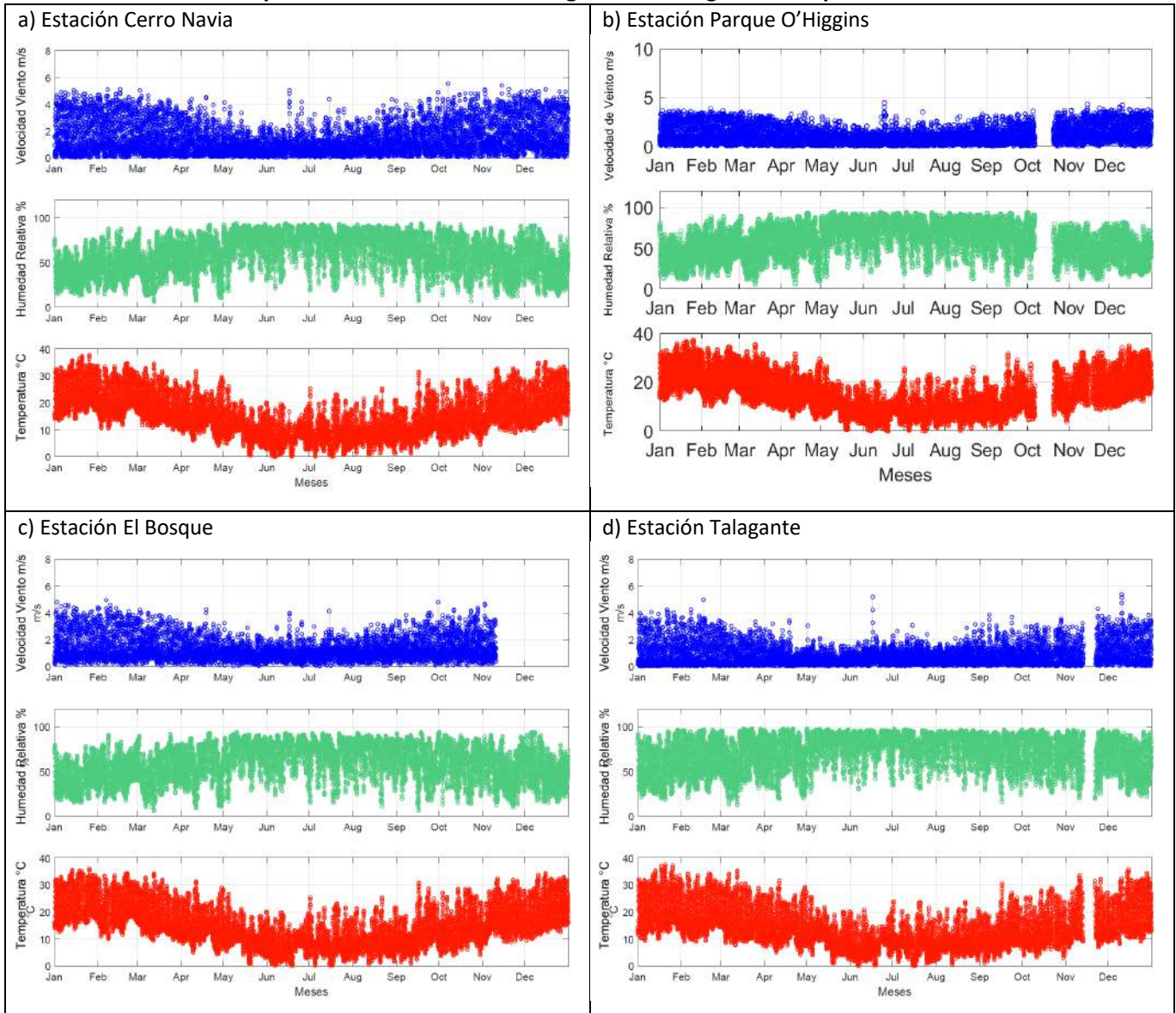
Fuente: Elaboración propia.

Series de tiempo de variables meteorológicas del año 2017

Las series de tiempo de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura del año 2017 de las estaciones de la Región Metropolitana analizadas Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante se presentan en la Figura 8-4. De estas series de tiempo se desprende la integridad de los datos en las estaciones, excepcionalmente se presentan divergencias en algunas variables respecto a datos anómalos y falta de datos. Sin embargo, es posible obtener una muestra representativa de la estacionalidad del año con fines de análisis y representatividad de la meteorología local.

En términos generales, las variables velocidad de viento y temperatura presentan sus máximos de magnitud en el periodo de verano, mientras que los mínimos son en invierno. Lo contrario ocurre con la humedad relativa, donde los registros son máximos en invierno y mínimos en verano.

Figura 8-4: Series de tiempo de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura registradas por las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8-5 se presentan los gráficos de diagramas de caja y bigotes de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura observados en las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante durante el año 2017.

Los registros de velocidad de viento en estación Cerro Navia indican que el 50% de las muestras se encuentran entre 1 y 3 m/s en los meses de verano, mientras que en el invierno la caja se reduce indicando que el 50% de las muestras son prácticamente vientos que oscilan como máximo en el valor de 1 m/s. Los valores atípicos máximos son cercanos a los 5 m/s observados en los meses de

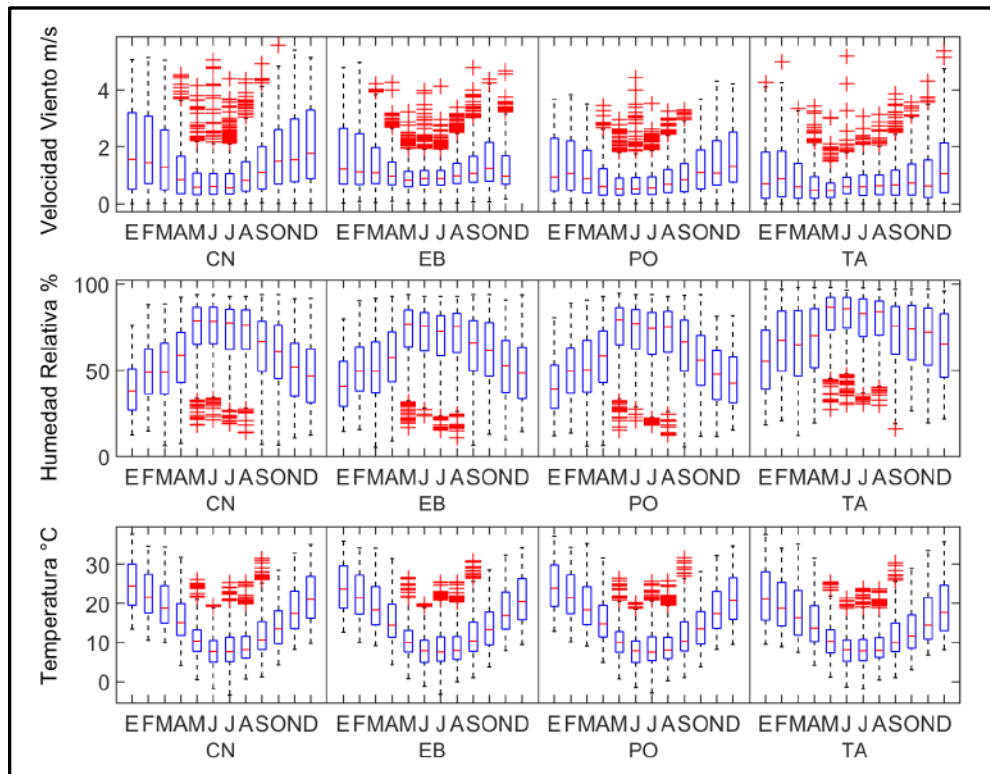
invierno, los cuales podrían estar asociados a inestabilidad atmosférica por el respectivo paso de sistemas frontales en la Región Metropolitana. El resto de las estaciones indican un patrón similar.

Respecto a la humedad relativa, también se observan cambios en los periodos de invierno y verano en las cuatro estaciones analizadas. En verano, el 50% de las muestras de humedad relativa se concentran entre 30% y 50%, observando una atmósfera relativamente seca, mientras que en invierno el rango intercuartílico aumenta entre un 70% y un 80% de valores registrados de humedad.

Entre las estaciones se registra una leve diferencia entre las que se localizan en la ciudad de Santiago y en Talagante, donde las primeras presentan un cuartil 1 cercano al 30% en los meses más secos, mientras que en Talagante cercano al 50%. La diferencia se mantiene aparentemente en los meses de invierno.

Los registros de temperatura muestran cambios en los periodos de invierno y verano al igual que las otras variables presentadas. Una de las principales diferencias corresponde a la disminución de la variabilidad en invierno respecto al verano expresado en el rango intercuartil mostrado en la caja, además de la disminución de la magnitud en el periodo de invierno. Los máximos se presentan en verano con valores registrados cercanos a los 35 °C y mínimas bajo cero en invierno. Los valores atípicos se presentan en invierno con temperaturas que bordean los 28 °C.

Figura 8-5: Diagramas de Caja y Bigotes de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia

Ciclos diarios y estacionales de variables meteorológicas del año 2017

Los ciclos diarios son construidos en base a los registros promedios de cada hora del día, con el fin de mostrar un comportamiento patrón de una variable, en este caso meteorológica. El área sombreada corresponde al área delimitada por los percentiles 5 y 95, el cual tiene como objetivo mostrar la amplitud de cada variable. En la Figura 8-6 a Figura 8-10 se muestran los ciclos diarios de velocidad y dirección de viento, humedad relativa y temperatura, respectivamente, observados en las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante durante el 2017.

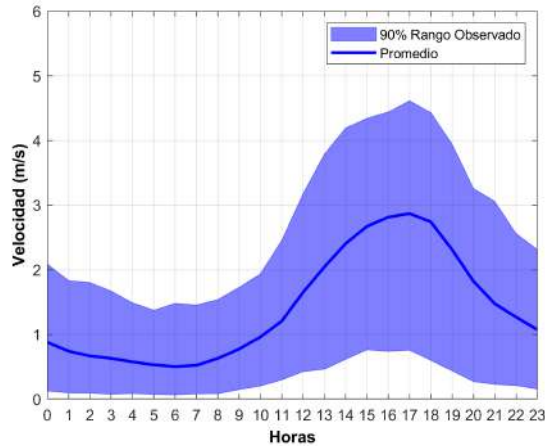
Respecto al ciclo diario de la dirección de viento, esta muestra en Figura 8-7 la frecuencia de la dirección de viento en intervalos de 22,5° expresado en colores, lo largo de las horas del día en términos de porcentaje. La finalidad del gráfico es indicar la dirección de viento predominante patrón por hora a lo largo del día en promedio.

Los registros obtenidos de las estaciones de la Red SINCA muestran el estándar de un aumento de la magnitud en las variables de velocidad de viento y temperatura y una disminución de la humedad relativa en horas del día, mientras que el periodo nocturno ocurre lo inverso.

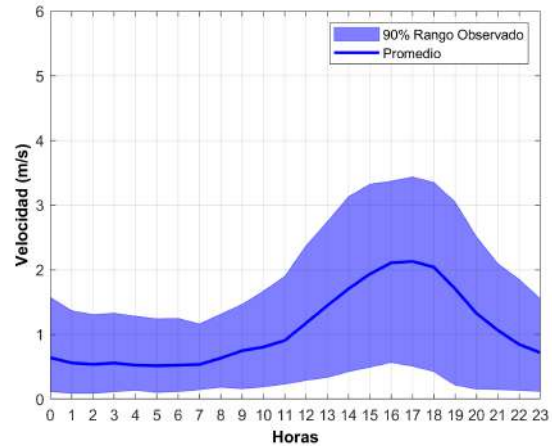
En términos generales, como se aprecia en Figura 8-6, la velocidad de viento posee características débiles, acentuado en el periodo de nocturno, mientras que en día el promedio no sobrepasa los 4 m/s en las estaciones mostradas. Respecto a la variabilidad de la velocidad de viento, estación Parque O'Higgins es la que presenta menor variabilidad entre las estaciones presentadas, con vientos cercanos a "calmas" expresado en el percentil 5, en el periodo nocturno, y un máximo cercano a 4 m/s a las 17:00 horas aproximadamente, indicado por el percentil 95.

Figura 8-6: Ciclos diarios de velocidad de viento observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.

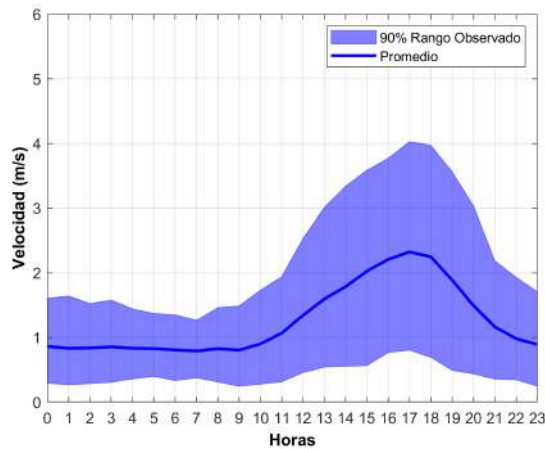
a) Estación Cerro Navia



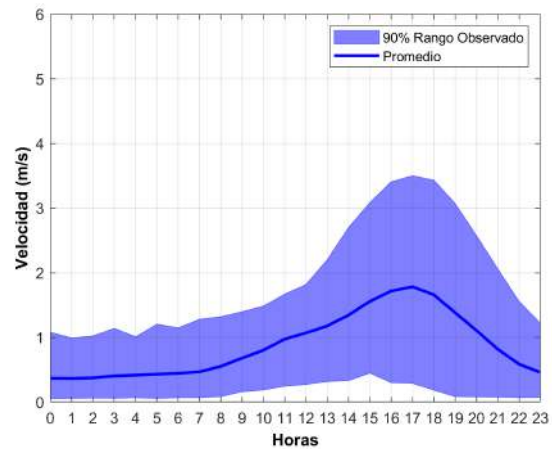
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante

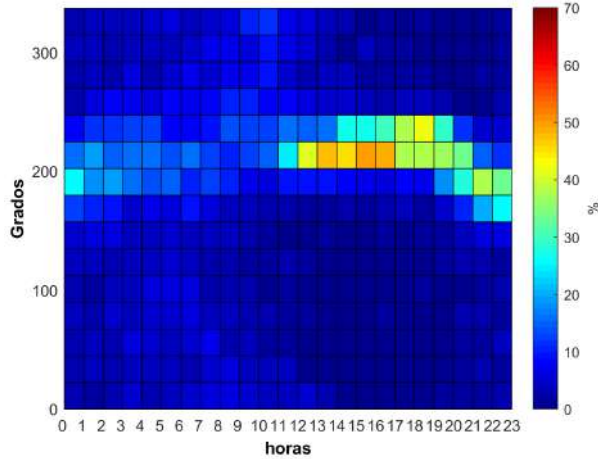


Fuente: Elaboración propia.

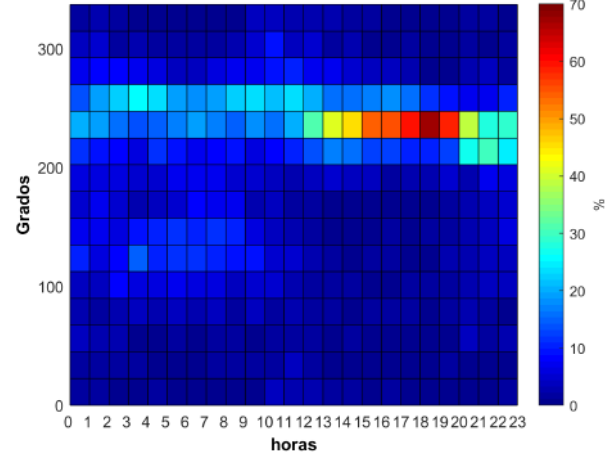
En la Figura 8-7, se observa un estándar de visualización en la dirección de viento, esto a partir de las 12:00 horas, el cual corresponde al aumento de las frecuencias de dirección suroeste en todas las estaciones, indicado por la barra de colores de un 40% y 30% en las estaciones Cerro Navia y El Bosque y un 70% en Parque O'Higgins y Talagante. En el periodo nocturno se logra observar una tendencia de componente noreste y norte en las estaciones El Bosque y Talagante con un 30% de frecuencia del espectro total de direcciones de viento posibles.

Figura 8-7: Ciclos diarios de dirección de viento observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.

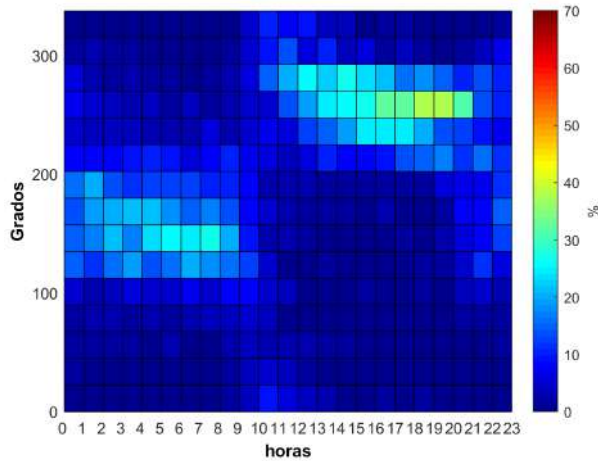
a) Estación Cerro Navia



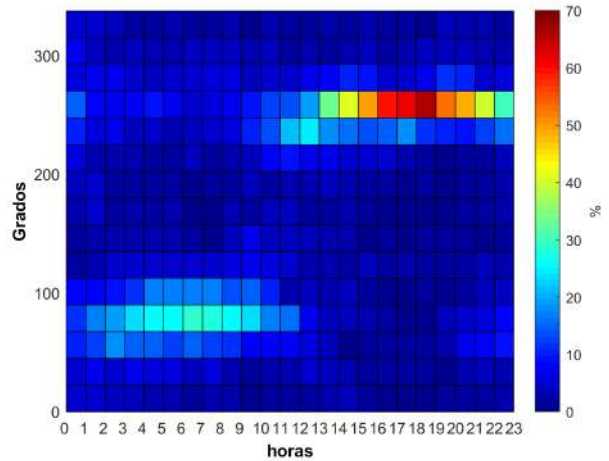
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



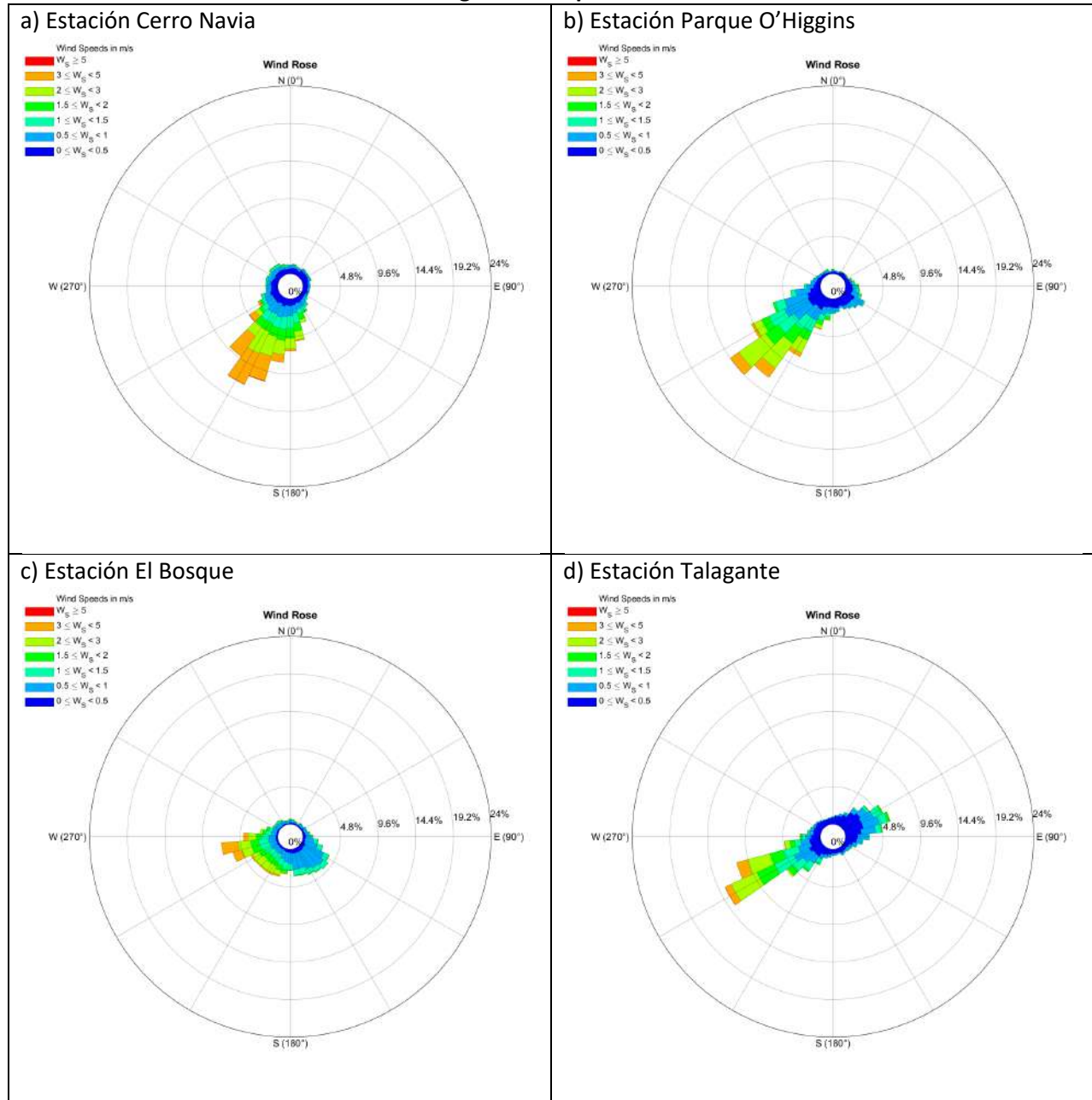
d) Estación Talagante



Fuente: Elaboración propia.

La idea es reforzada en la Figura 8-8, donde se reafirma que la dirección de viento promedio predominante es suroeste en las cuatro estaciones con una mayor tendencia oeste en la estación El Bosque, la cual se encuentra emplazada en la zona sur de la ciudad Santiago.

Figura 8-8: Rosas de viento promedio anuales observadas en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.



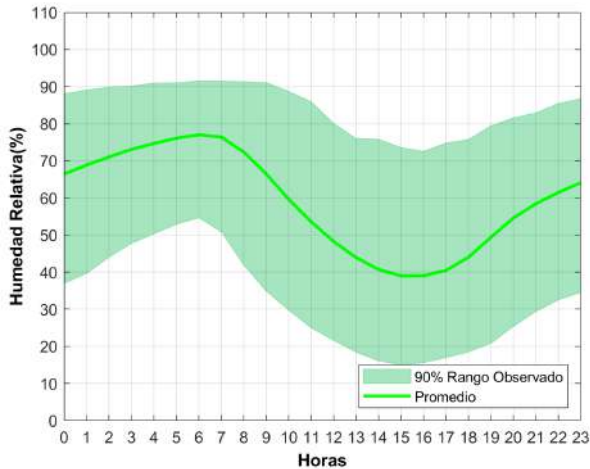
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la humedad relativa en las estaciones presentadas en Figura 8-9, se observan curvas similares en las estaciones localizadas en la ciudad de Santiago donde la curva del promedio muestra un máximo cercano al 80% en el periodo nocturno, mientras que en el día un mínimo de 40% a eso de las 16:00 horas.

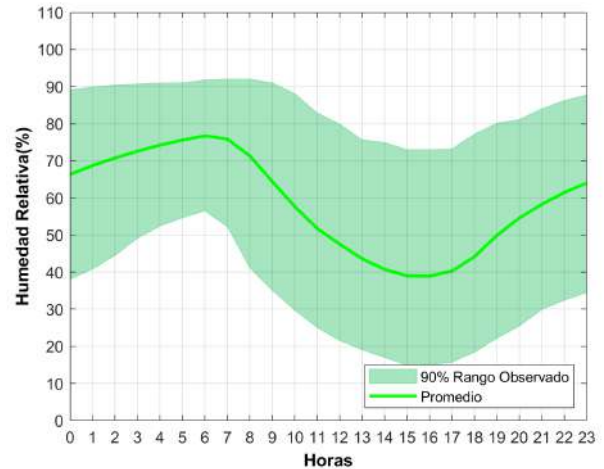
La estación Talagante presenta un incremento de la humedad en un 10% respecto a las otras estaciones localizadas en Santiago, mostrado en el área sombreada y en la curva del promedio. Respecto a la variabilidad esta es ligeramente menor respecto a las otras tres estaciones.

Figura 8-9: Ciclos diarios de humedad relativa observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.

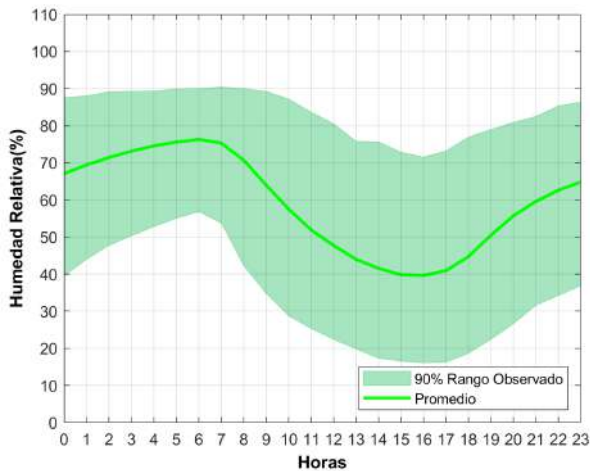
a) Estación Cerro Navia



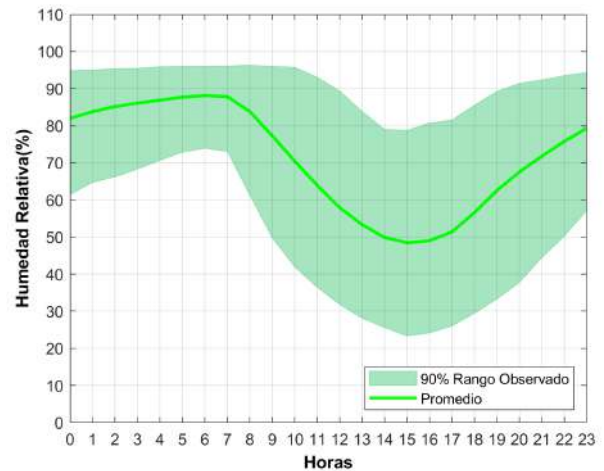
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante

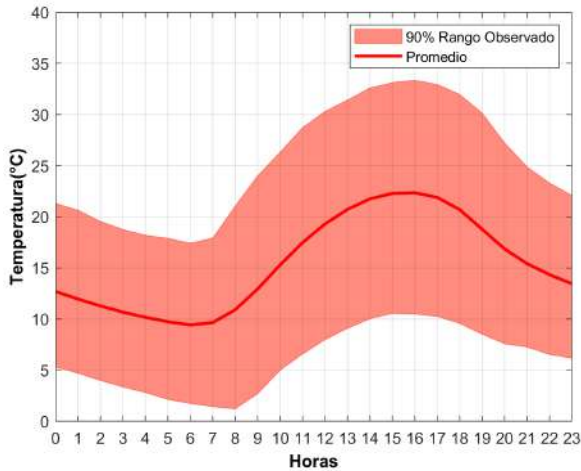


Fuente: Elaboración propia.

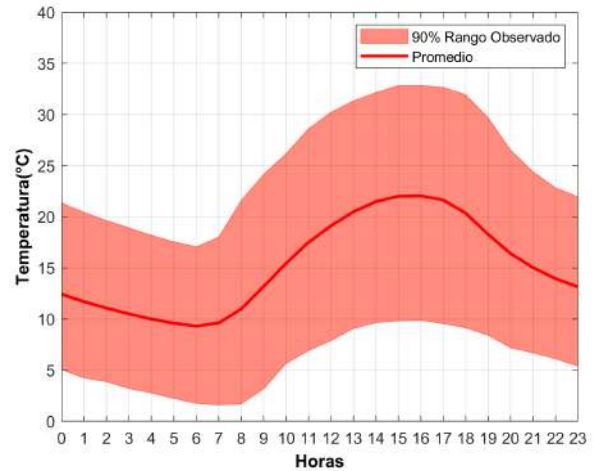
La temperatura presentada en la curva del promedio de temperatura en Figura 8-10, es similar en tendencia y valores en las tres estaciones localizadas en Santiago, mientras que en estación Talagante es ligeramente menor durante el periodo nocturno. Esto coincide con los registros de humedad relativa, donde Talagante presenta mayores concentraciones de humedad relativa que las tres estaciones mostradas en Santiago. Respecto a la variabilidad, la diferencia se presenta en el periodo nocturno, donde la estación Talagante presenta un menor espesor del área sombreada, mostrando una menor variabilidad que el resto de las estaciones.

Figura 8-10: Ciclos diarios de temperatura observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.

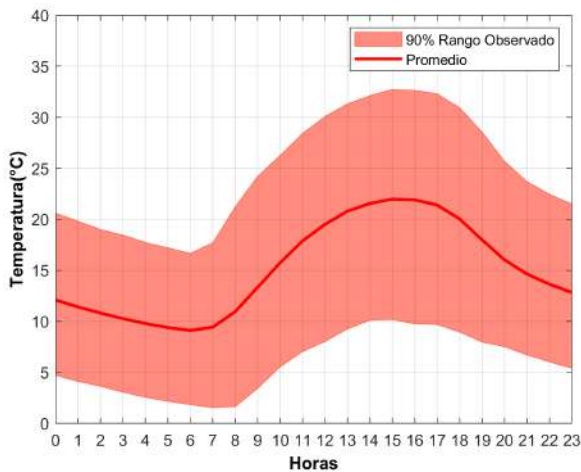
a) Estación Cerro Navia



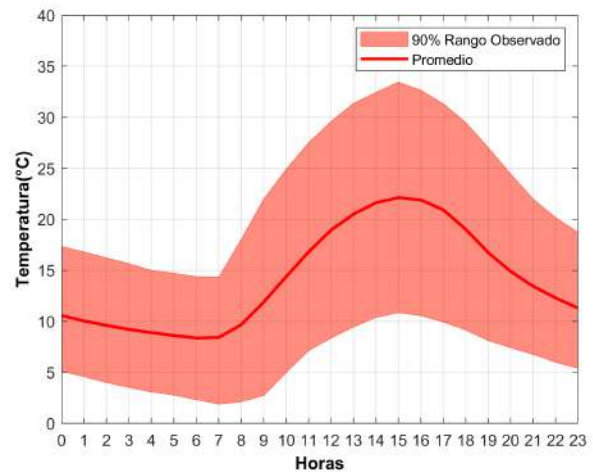
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante



Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes mostradas en las figuras que van de Figura 8-11 a Figura 8-13 corresponden a los ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento, humedad relativa y temperatura del año 2017 en las estaciones de análisis Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante. El ciclo estacional consiste en un gráfico donde se muestra el ciclo diario en el eje x y el ciclo anual en el eje y. Los colores muestran la magnitud de la variable, donde el color rojo muestra valores máximos y los colores azules los mínimos. Además, en la Figura 8-11 se agregan vectores de viento superpuestos en el mapa de colores, con la finalidad de mostrar la dirección de viento predominante promedio.

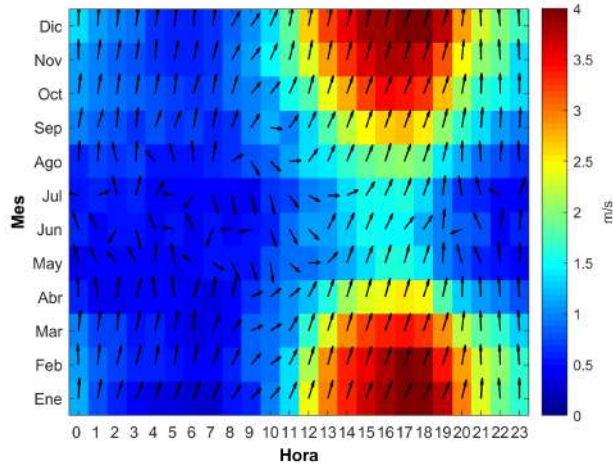
La Figura 8-11 muestra en todas las estaciones que la velocidad de viento presenta valores máximos en el periodo diurno y periodo estival. Lo contrario ocurre en invierno y en las noches, donde los vientos poseen características más bien débiles. Lo descrito se profundiza en la estación Cerro Navia,

mientras que en Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante se suavizan las diferencias entre ciclo diario y ciclo anual.

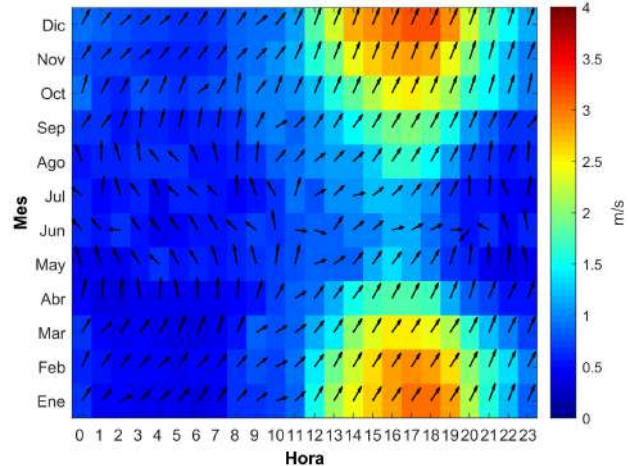
Respecto a la dirección de viento, las cuatro estaciones registran similitud en la dirección de viento de componente suroeste en el periodo diurno, y meses de verano. Mientras que en invierno y en la noche se presentan diferencias entre las estaciones. Cerro Navia no muestra una tendencia clara de predominancia en dicho periodo, observándose registros de viento norte, este y sur. En estación Talagante se observan vientos de componente noreste, posible asociado al paso de sistemas frontales, mientras que las otras dos estaciones, Parque O'Higgins y El Bosque, coinciden en los registros de viento sureste.

Figura 8-11: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.

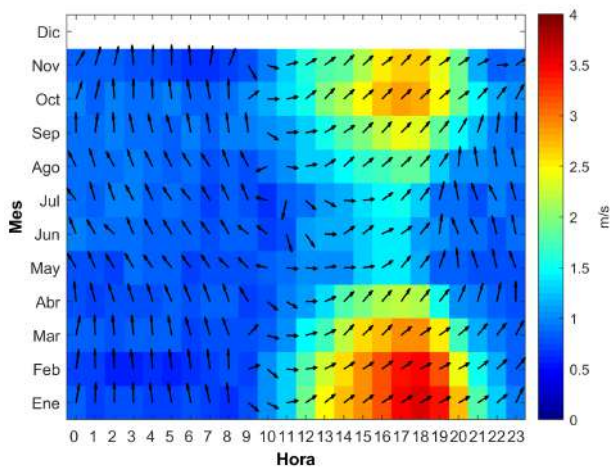
a) Estación Cerro Navia



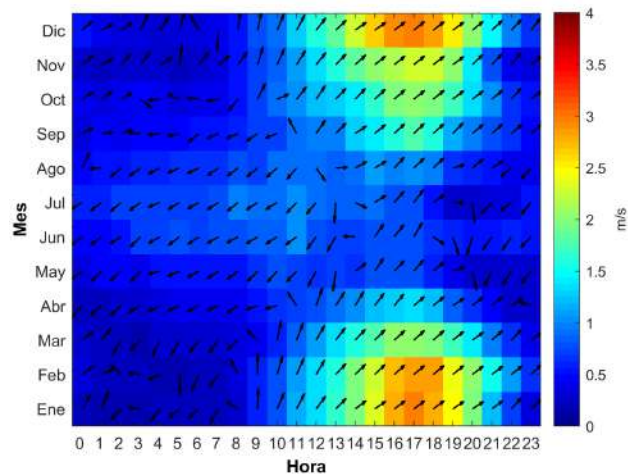
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante

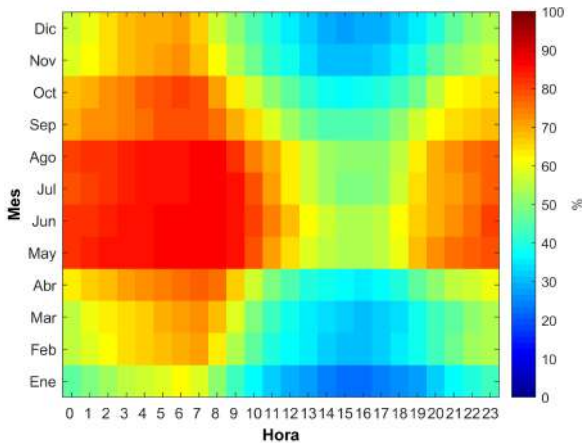


Fuente: Elaboración propia.

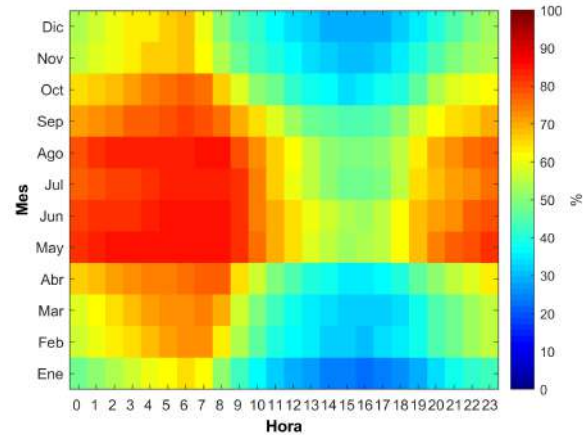
Las Figura 8-12 y Figura 8-13, se presentan los ciclos estacionales de humedad relativa y temperatura en las cuatro estaciones. Estos muestran máximos inversos, es decir, en los meses de verano y periodo diurno la humedad registra los valores mínimos, mientras que la temperatura los valores máximos. Distinto ocurre en invierno donde se invierten las magnitudes. Destaca estación Talagante sobre el resto, donde la humedad relativa registra una humedad constante en el periodo nocturno y a lo largo de todo el año y la temperatura bajas temperaturas en el mismo periodo.

Figura 8-12: Ciclos estacionales de humedad relativa observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.

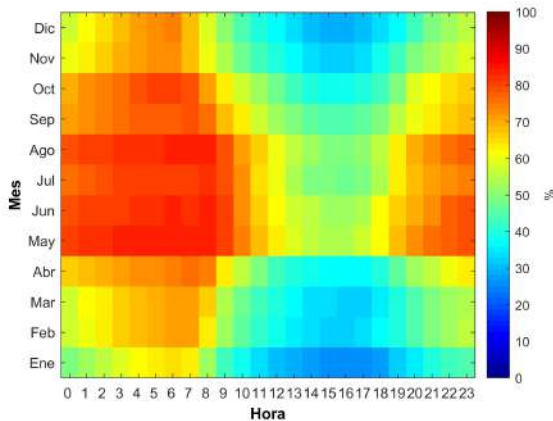
a) Estación Cerro Navia



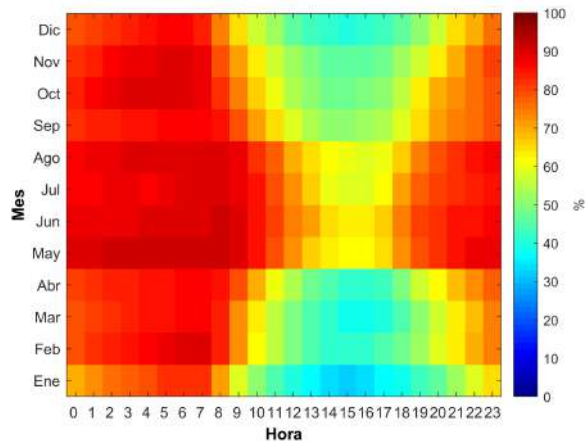
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



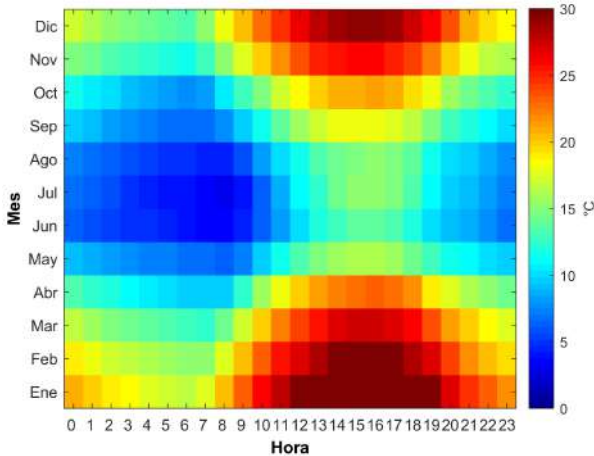
d) Estación Talagante



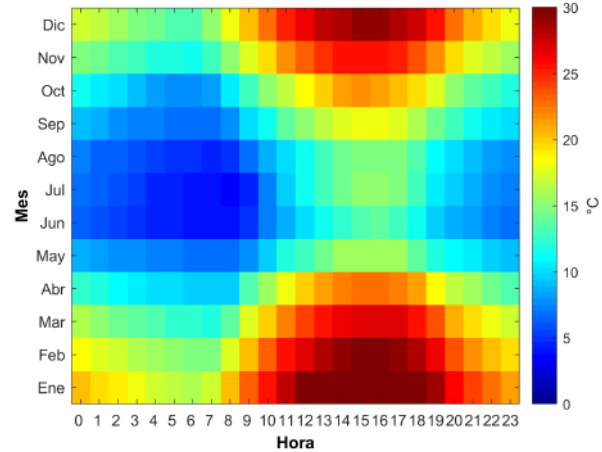
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-13: Ciclos estacionales de temperatura observados en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.

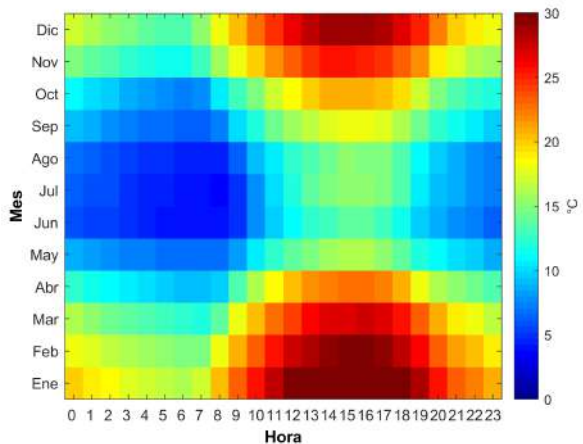
a) Estación Cerro Navia



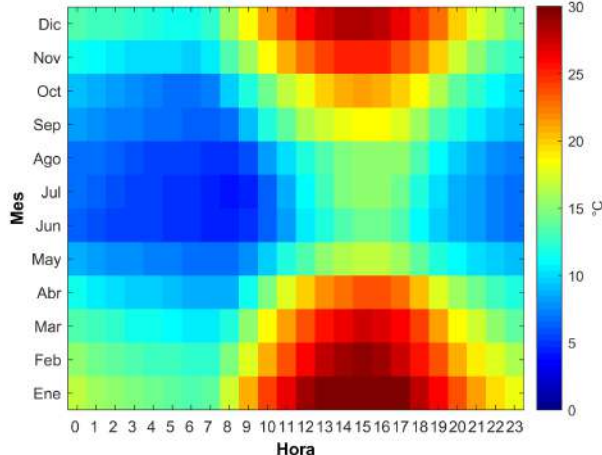
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante



Fuente: Elaboración propia.

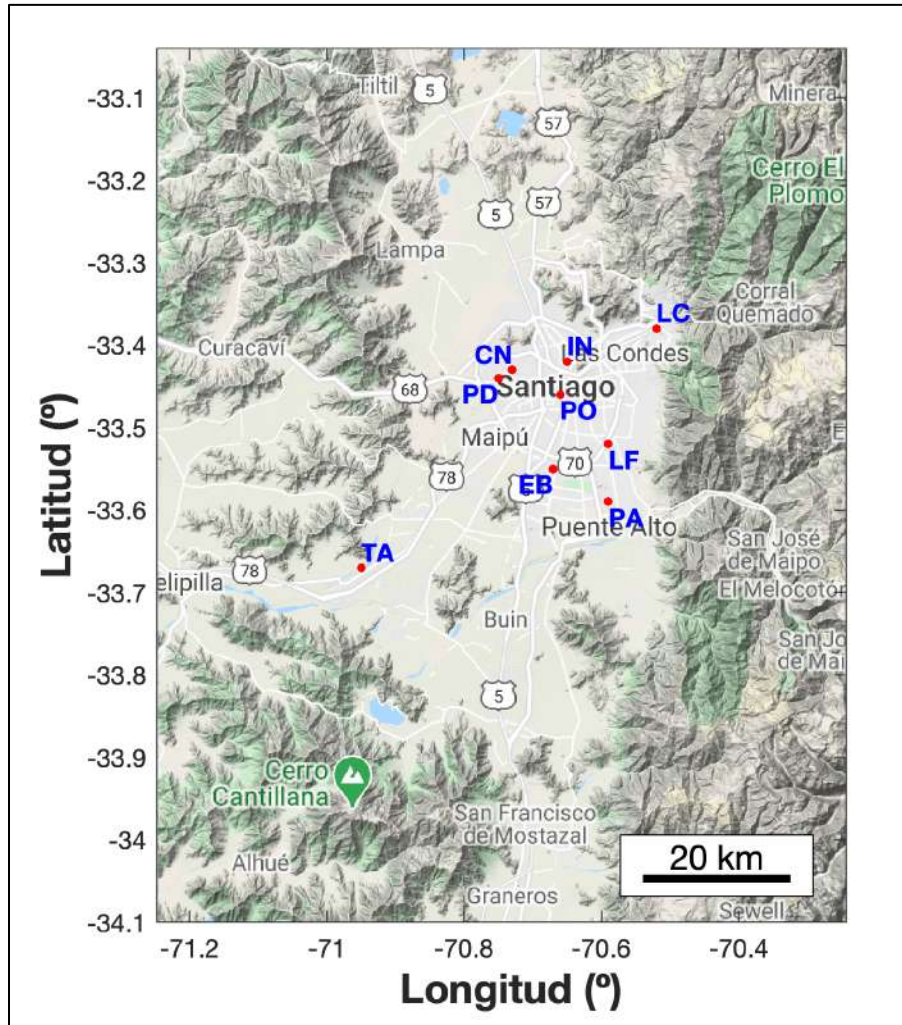
8.3.3.4 Información de Calidad de Aire de la Región Metropolitana durante el año 2017

En esta sección se presenta la información de calidad de aire por NO₂, O₃ y MP_{2,5} registrada en la Región Metropolitana durante el año 2017. Esta información se presenta con el fin de utilizarla para la comparación con los resultados de la modelación fotoquímica.

La Red actual de monitoreo de calidad de aire en la Región Metropolitana cuenta con las siguientes 10 estaciones de monitoreo pertenecientes a la red pública del Ministerio del Medio Ambiente: Cerro Navia, Independencia, La Florida, Las Condes, Pudahuel, Parque O'Higgins, Puente Alto, El Bosque, Talagante y Quilicura.

En Figura 2-1 se muestra la ubicación de las 10 estaciones de monitoreo de calidad de aire mencionadas anteriormente. Por otra parte, para cada una de las estaciones indicadas se presenta en Tabla 8.2 la información acerca de su ubicación geográfica en UTM (WGS 84) y el porcentaje de datos registrados por cada estación monitorea de los contaminantes NO₂, O₃ y MP_{2,5} durante el periodo enero – diciembre del 2017.

Figura 8-14: Ubicación de las estaciones monitoras de la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia con coordenadas disponibles en SINCA.

Tabla 8.2: Ubicación de estaciones monitoras de la Región Metropolitana y porcentaje de datos de NO₂, O₃ y MP_{2,5} registrados por cada una para el periodo enero – diciembre del 2017.

Estaciones		Coordenadas UTM Datum WGS 84 (m)		% de datos contaminantes		
Abreviación	Nombre	UTM-E	UTM-N	NO ₂	O ₃	MP _{2,5}
CN	Cerro Navia	339.169	6.299.704	97	99	96
IN	Independencia	346.590	6.300.933	91	94	96
LF	La Florida	352.339	6.289.932	93	98	96

Estaciones		Coordenadas UTM Datum WGS 84 (m)		% de datos contaminantes		
Abreviación	Nombre	UTM-E	UTM-N	NO ₂	O ₃	MP _{2,5}
LC	Las Condes	358.613	6.305.553	73	96	96
PU	Pudahuel	337.329	6.298.564	89	94	96
PO	Parque O'Higgins	345.731	6.296.483	96	86	97
PA	Puente Alto	352.458	6.282.170	77	88	96
EB	El Bosque	344.962	6.286.488	95	95	96
TA	Talagante	319.215	6.272.727	49	96	88
QU	Quilicura	337.198	6.306.326	Sin datos	Sin datos	93

Fuente: Elaboración propia con información de SINCA.

La información de calidad del aire por NO₂, O₃ y MP_{2,5} registrada en las estaciones de la Región Metropolitana durante el año 2017 se presentan en Tabla 8.3, Tabla 8.4 y Tabla 8.5, respectivamente. En estas tablas se entregan los promedios anuales de los tres contaminantes, máximo horario de NO₂, máxima concentración 8 horas móvil de O₃ y máximo 24 horas de MP_{2,5}. Esta información se considera a modo de referencial, debido a que no se calcularon considerando la cantidad mínima de datos que requieren las normas de calidad de aire de estos contaminantes.

Tabla 8.3: Concentraciones de NO₂ registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana durante el año 2017.

Estaciones	Concentración de NO ₂ (µg/m ³)	
	Promedio anual	Máximo horario
Cerro Navia	40	274
Independencia	54	274
La Florida	44	274
Las Condes	44	274
Pudahuel	42	235
Parque O'Higgins	49	235
Puente Alto	38	186
El Bosque	45	182
Talagante	19	182

Fuente: Elaboración propia con información de SINCA.

Tabla 8.4: Concentraciones de O₃ registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana durante el año 2017.

Estaciones	Concentración de O ₃ (µg/m ³)	
	Promedio anual	Máximo 8 hrs móvil
Cerro Navia	31	184
Independencia	20	125
La Florida	26	197
Las Condes	35	261
Pudahuel	22	137
Parque O'Higgins	24	116
Puente Alto	32	180
El Bosque	25	191
Talagante	28	175

Fuente: Elaboración propia con información de SINCA.

Tabla 8.5: Concentraciones de MP_{2,5} registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana durante el año 2017.

Estaciones	Concentración de MP _{2,5} (µg/m ³)	
	Promedio anual	Máximo 24 horas
Cerro Navia	30	92
Independencia	28	93
La Florida	27	89
Las Condes	22	92
Pudahuel	28	89
Parque O'Higgins	27	88
Puente Alto	24	71
El Bosque	33	93
Talagante	24	82
Quilicura	27	74

Fuente: Elaboración propia con información de SINCA.

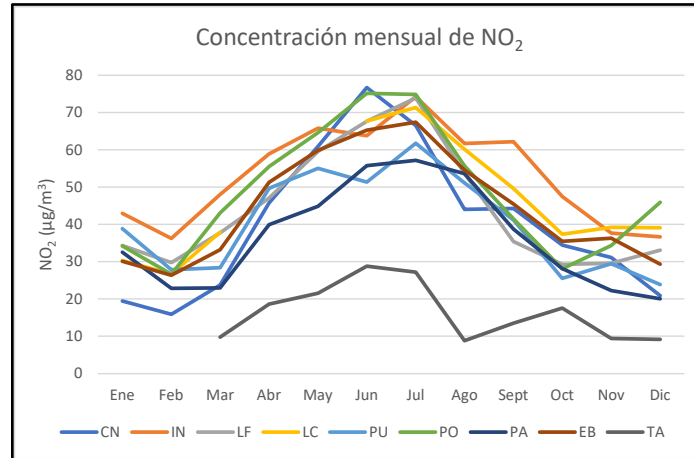
Los ciclos anuales de NO₂, O₃ y MP_{2,5} registrados en las estaciones de la Región Metropolitana durante el año 2017 se presentan en las Figura 8-15 a Figura 8-17, respectivamente. En estos gráficos se entregan los promedios mensuales de los tres contaminantes, desde enero hasta diciembre. En el caso del O₃, además se presenta el gráfico con los meses desde jun hasta diciembre del 2017 primero y luego desde enero a mayo del mismo año, con el fin de mostrar el ciclo en su punto más alto.

El ciclo de NO₂, como se observa en Figura 8-15, presenta un aumento en las concentraciones del contaminante desde marzo en todas las estaciones de la Región Metropolitana hasta llegar máximos durante junio y julio, alcanzando el valor más alto, de 77 µg/m³, en la estación Cerro Navia en junio. Mientras que las concentraciones de NO₂ más bajas son durante los meses de febrero y diciembre en la Región Metropolitana, excepto en las estaciones La Florida y Talagante que se presentan en octubre y agosto, respectivamente.

Con respecto al ciclo de O₃, en Figura 8-16 se ve que las concentraciones máximas de este contaminante en la Región Metropolitana son en los meses más cálidos del año, durante enero, febrero y diciembre, alcanzado valores de aproximadamente 88 µg/m³ en la estación Las Condes en el mes de enero. Como es de esperar con este contaminante, los niveles promedios mensuales más bajos son durante los meses fríos, con mínimos en junio en todas las estaciones monitoras. La estación con menores niveles de O₃ en la Región Metropolitana es Independencia que presenta concentraciones de 4 µg/m³ durante junio.

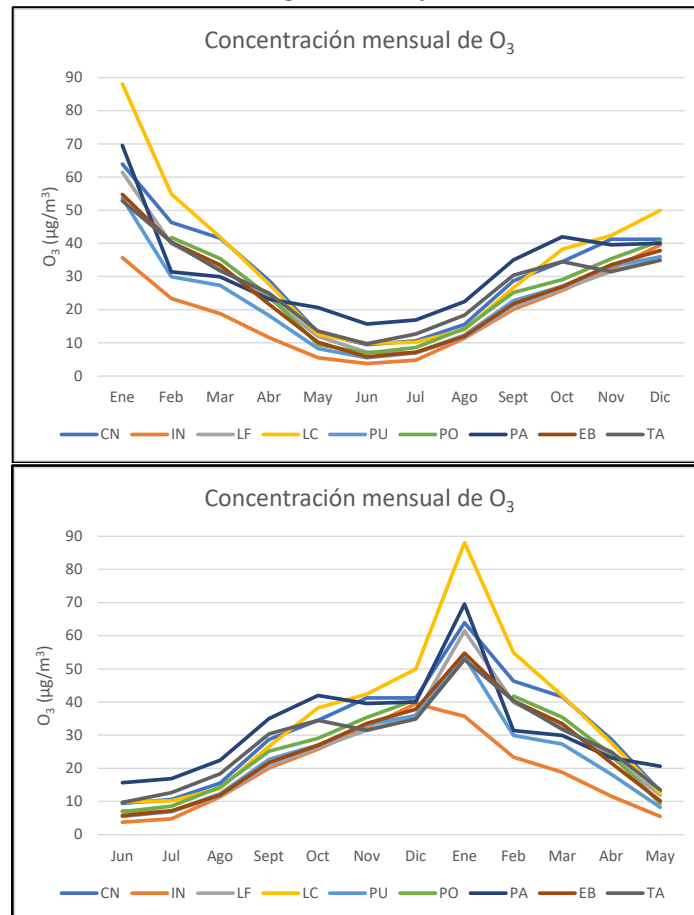
Como se observa en Figura 8-17, el ciclo anual de MP_{2,5} tiene un comportamiento contrario al O₃, con valores más altos durante invierno y más bajos durante el verano. La estación con niveles de MP_{2,5} más altos de la Región Metropolitana es El Bosque, que alcanza niveles aproximadamente de 60 µg/m³ durante julio. Por otra parte, el nivel promedio más bajo se presenta en la estación Talagante con 7 µg/m³ en octubre.

Figura 8-15: Ciclo anual de las concentraciones de NO_2 registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana.



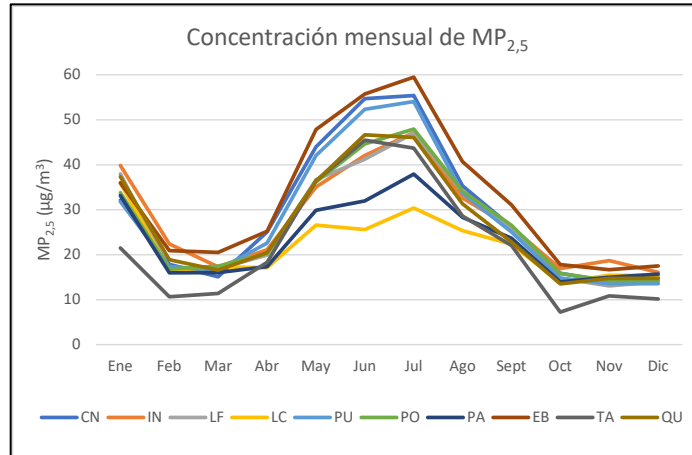
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-16: Ciclos anuales de las concentraciones de O_3 registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-17: Ciclo anual de las concentraciones de MP_{2,5} registradas por las estaciones monitoras de la Región Metropolitana.



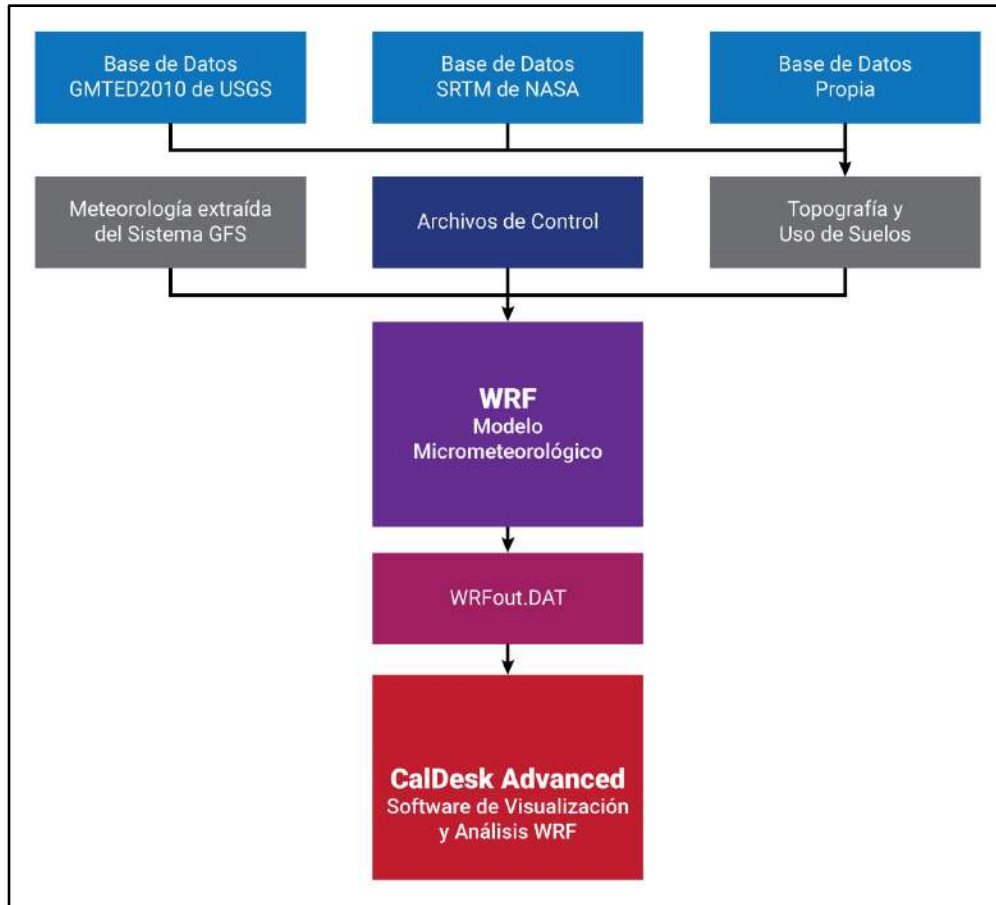
Fuente: Elaboración propia.

8.3.4 Implementación y aplicación del modelo meteorológico WRF en la RM

En esta sección se presenta la implementación y aplicación del modelo meteorológico WRF para la generación de la meteorología requerida por el modelo CAMx para el año 2017.

En Figura 8-18 se presenta un diagrama de operación del modelo WRF. Como se observa en esta figura, este sistema considera como información de entrada meteorología del sistema GFS y/o datos de estaciones meteorológicas locales, además de topografía y uso de suelos. Con los archivos de salida del modelo se pueden obtener distintos formatos de archivos, los que sirven de entrada para distintos modelos de dispersión y fotoquímicos.

Figura 8-18: Diagrama de operación del modelo meteorológico WRF.



Fuente: Elaboración propia.

El modelo meteorológico WRF se implementó considerando dos grillas anidadas en la zona de la Región Metropolitana. La meteorología implementada del modelo WRF correspondió a los datos históricos del año 2017 proporcionados por GDAS de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), de USA, con una resolución espacial de 0,25 grados. Las características de la configuración de las dos grillas anidadas en la zona de la Región Metropolitana se presentan a continuación en Tabla 8.6ñ

La topografía del dominio de modelación fue obtenida a partir del proyecto SRTM (del acrónimo inglés Shuttle Radar Topography Mission) con resolución de 3 segundos de grado (90 m aproximadamente) y el uso de suelo a partir de la información satelital MODIS (del acrónimo inglés Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) de la NASA con resolución de 15 segundos de grado.

Tabla 8.6: Configuración de las grillas utilizadas en las corridas del modelo WRF, dominio de modelación para la Región Metropolitana.

Características	Grilla	
	1	2
N° celdas en dirección E-W	37	37
N° celdas en dirección N-S	37	37
Resolución en dirección E-W	12.000 m	4.000 m
Resolución en dirección N-S	12.000 m	4.000 m
Tipo de proyección: Lambert Conformal		

Fuente: Elaboración propia.

El dominio de modelación de la Región Metropolitana se diseñó considerando la grilla N° 2 de WRF, por ser la que posee una resolución con tamaño de grilla de 4000 x 4000 metros para definir la topografía y uso de suelo. Tiene dimensiones de 148 kilómetros en la dirección Este-Oeste y 148 kilómetros en la dirección Norte-Sur, a partir de su origen ubicado en los -33.585981 latitud Sur y -71.047205 longitud Oeste. Las características generales de esta grilla se presentan en Tabla 8.7 y el área se muestra en Figura 8-19.

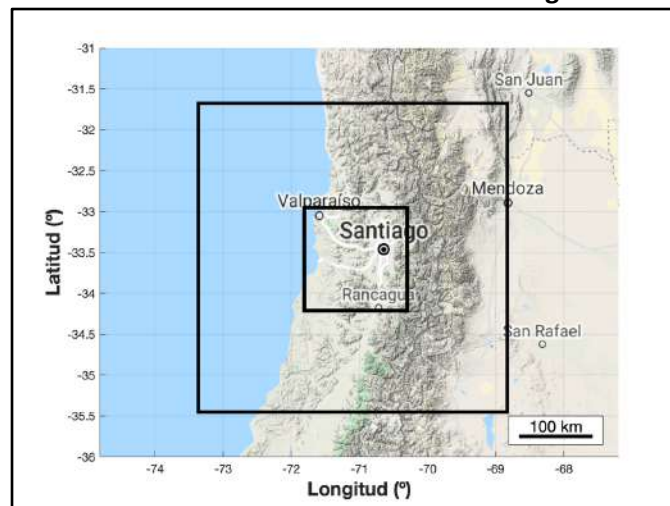
Tabla 8.7: Características del dominio de modelación de la segunda grilla utilizada por el modelo WRF en la zona de la Región Metropolitana.

Características Grilla 2 de WRF	
Resolución	4.000 x 4.000 (m)
N° de celdas en dirección X	37
N° de celdas en dirección Y	37
Coordenadas de referencia del origen del dominio*	Latitud: -33.585981; Longitud: -71.047205
Total del área del dominio	21.904 (km ²)

*: Coordenada de referencia, el dominio corresponde a la segunda grilla anidada en la modelación del modelo WRF, la cual está en proyección Lambert Conformal Conic (LCC).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-19: Dominio de modelación de WRF en la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la configuración del modelo, en relación a la física y dinámica, se consideraron en forma parcial las parametrizaciones de los trabajos realizados por Saide et al. (2011) y Orfanoz (2016), cuyos principales esquemas son mostrados en la Tabla 8.8

Tabla 8.8: Configuración de las principales parametrizaciones utilizadas en la modelación con WRF para la Región Metropolitana.

Variable	Nombre	Esquema	Descripción
Microfísica	mp_physics	WSM3	Esquema simple, eficaz con los procesos de hielo y nieve para grillas de mesoescala
Radiación de onda larga	ra_lw_physics	RRTM	Modelo de transferencia radiativa rápida que utiliza tablas de eficiencia. Cuenta con múltiples bandas
Radiación de onda corta	ra_sw_physics	Dudhia scheme	Integración simple que permite la absorción y dispersión por nubes y a cielo despejado
Cúmulos	radt	Grell-3	Versión mejorada del esquema Grell-Devevi: método de conjunto con multi-cierre, multiparámetro
Capa superficial	sf_sfclay_physics	MYNN	Esquema de capa superficial de Nakashi and Niino para su esquema de capa límite.
Superficie	sf_surface_physics	5-layer thermal difusión	Esquema de temperatura única para 5 capas.
Coeficiente de remolino (eddy)	Km_opt	Horizontal first order closure	Cierre horizontal Smagorinski de primer orden, K para difusión horizontal es diagnosticada solo de la deformación horizontal. La difusión vertical viene dada por el esquema de capa límite.
Advección	*_adv_opt	Positive-definite	Opción de advección escalar, química, de humedad y TKE. Advección definida positiva.

Fuente: Orfanoz, 2016

8.3.4.1 Resultados del modelo WRF en la Región Metropolitana

En la presente sección se muestran los resultados del modelo meteorológico WRF. Los resultados obtenidos provienen de las variables extraídas de las coordenadas de las estaciones de la red meteorológica presentadas en la sección 3 del presente informe (Tabla 8.1).

Series de tiempo de variables meteorológicas modeladas con WRF del año 2017

Las series de tiempo de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura modeladas con WRF para el año 2017 en las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante de la zona de la Región Metropolitana se presentan en la Figura 8-20. En esta figura se aprecia que el modelo

WRF simula el típico aumento de la temperatura y velocidad de viento en los meses de verano y la disminución en el periodo invernal. Mientras que la humedad relativa ocurre lo inverso, lo que entrega un atisbo de una correcta simulación meteorológica en el dominio estudiado.

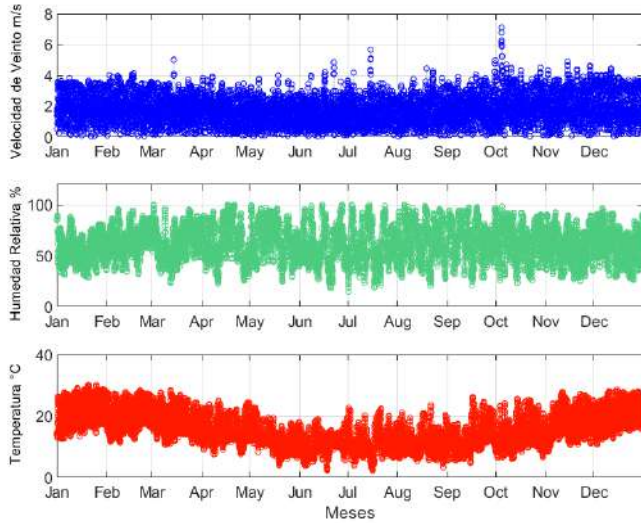
Por otra parte, en la Figura 8-21 se muestran los gráficos de diagrama de caja y bigotes de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura modelados con WRF en las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante para el año 2017. Esta figura muestra valores atípicos de velocidad de viento y temperatura en el periodo de invierno, mostrando un ciclo estacional, mientras que la humedad relativa no muestra los valores atípicos en invierno y el ciclo de forma tan marcada.

La velocidad de viento muestra valores atípicos en invierno de 7 m/s aproximadamente en las estaciones localizadas en la ciudad de Santiago, mientras que estación Talagante los valores atípicos llegan a 10 m/s, pudiendo indicar que la simulación logra hacer una distinción entre suelo urbano y suelo rural. Esto se ve reforzado por el tamaño de la caja, expresado en la variabilidad de la velocidad de viento, donde en las estaciones localizadas en Santiago es mínimo y en la estación Talagante es máximo.

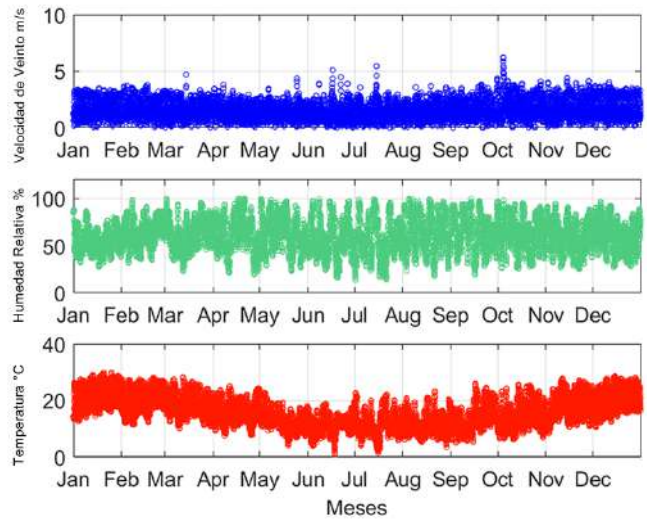
La temperatura tiene valores máximos de 30 °C en verano, mientras que en invierno alcanza valores cercanos a 0 °C. Los valores atípicos son simulados en los meses de invierno con temperaturas sobre 20 °C, lo cual podría mostrar un atisbo de captura del fenómeno de baja costera y su característica típica de correlación entre días con mayor contaminación y días con mayor amplitud térmica característica descrita en el trabajo desarrollado por Garreaud and Rutllant, 2002.

Figura 8-20: Series de tiempo de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura registradas por modelo WRF en la Región Metropolitana.

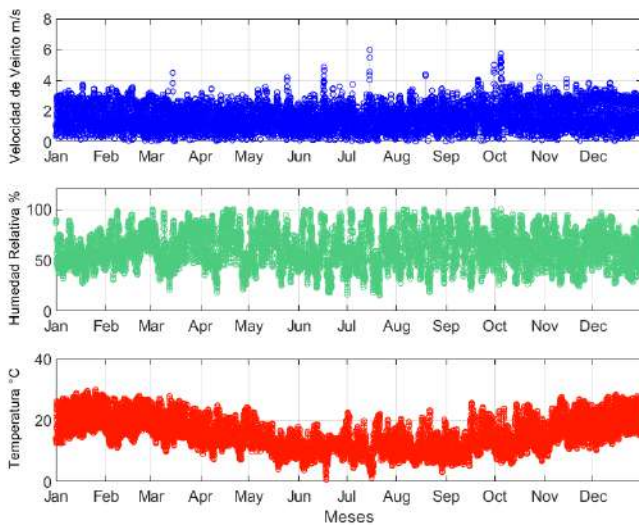
a) Estación Cerro Navia



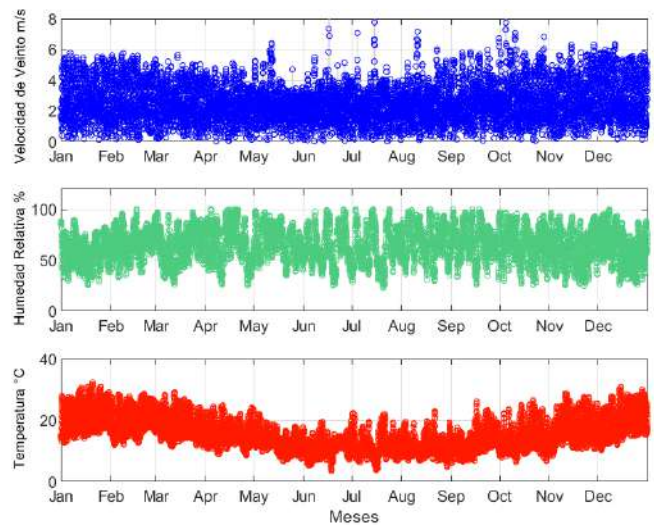
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque

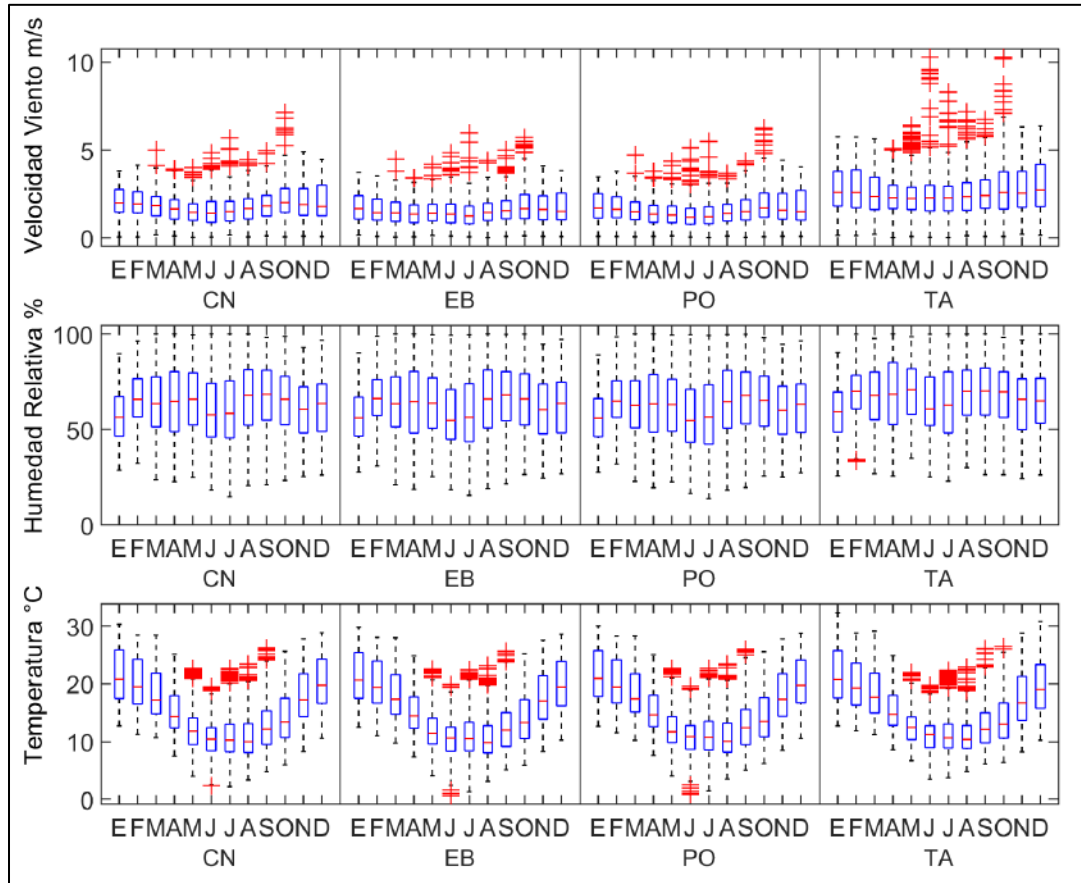


d) Estación Talagante



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-21: Diagramas de Caja y Bigotes de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura modelado con WRF en la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia

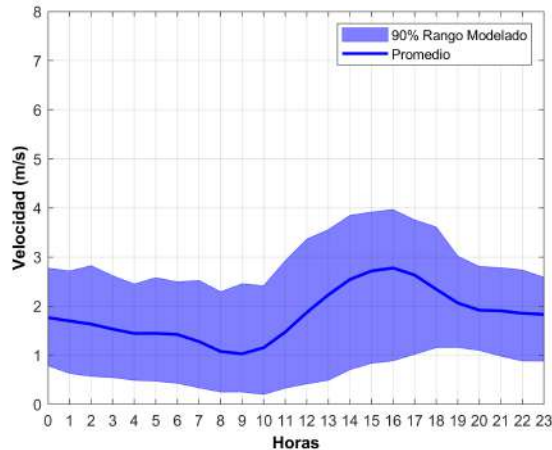
Ciclos diarios y estacionales de variables meteorológicas del año 2017

Los ciclos diarios de velocidad y dirección de viento, humedad relativa y temperatura del año 2017 modelados con WRF en la Región Metropolitana se presentan en Figura 8-22 a Figura 8-26, respectivamente. Por otra parte, los ciclos estacionales modelados para estas mismas variables se presentan en Figura 8-27 a Figura 8-29. En todas estas figuras se muestran los ciclos de las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante.

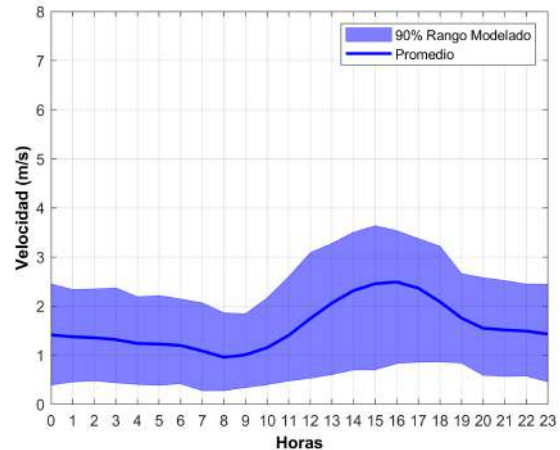
Los ciclos diarios de velocidad de viento simulados con WRF, muestran en Figura 8-22 el cambio de magnitud entre periodo nocturno y diurno en todas las estaciones, esto es simulando un crecimiento del área sombreada y el promedio durante el día, y una disminución en la noche. Respecto a la variabilidad, las simulaciones son similares en las tres estaciones localizadas en Santiago, diferenciándose Talagante donde es mayor respecto a las otras tres estaciones.

Figura 8-22: Ciclos diarios de velocidad de viento modelados con WRF en la Región Metropolitana.

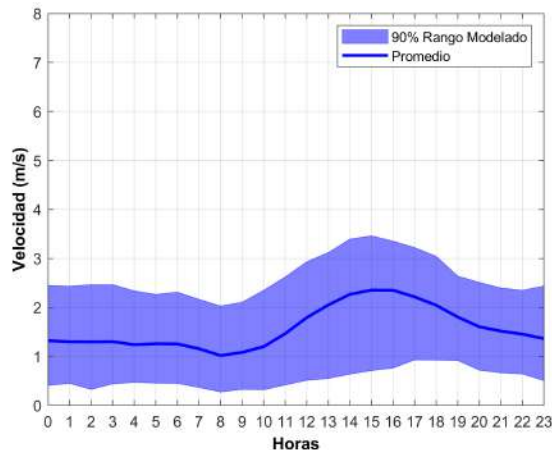
a) Estación Cerro Navia



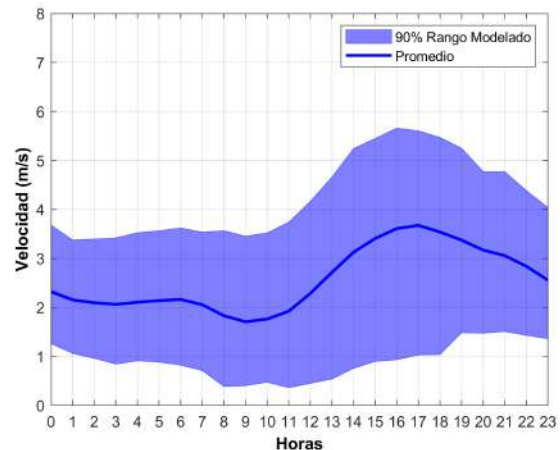
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante

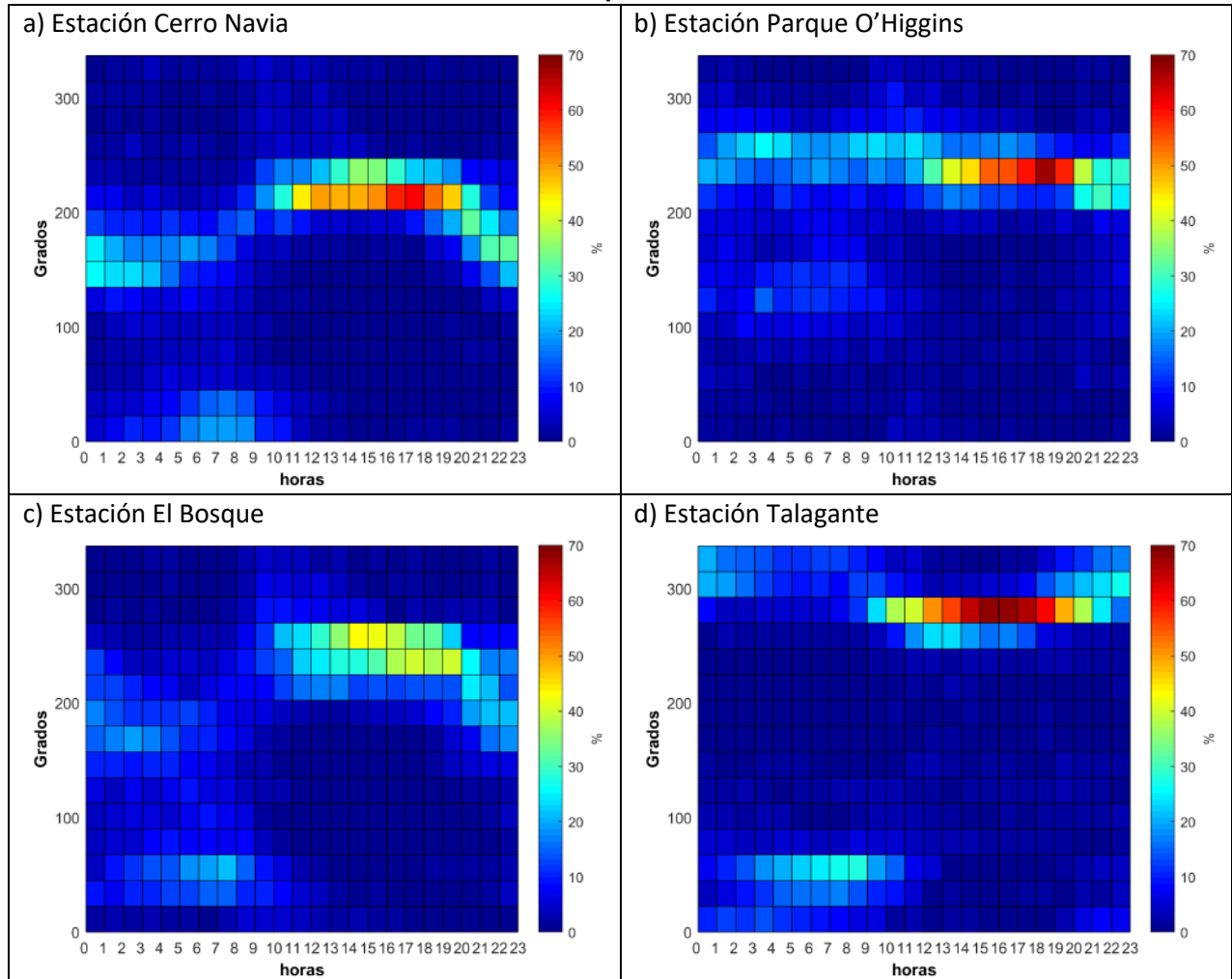


Fuente: Elaboración propia.

Los ciclos diarios de direcciones de viento simulados con WRF, presentados en Figura 8-23, muestran un cambio de componente predominante a partir de las 10:00 horas en las estaciones mostradas. En las estaciones localizadas en Santiago, se observa un aumento de las frecuencias desde un 40% a 70% de viento de componente suroeste, mientras que en Talagante con una frecuencia cercana al 60% la componente dominante es noroeste.

Respecto al periodo nocturno, no es tan claro observar una tendencia, mientras que en El Bosque y Talagante en torno a un 20% de frecuencias el viento dominante podría ser de tipo noreste. Cerro Navia muestra más bien una débil componente sur y Parque O'Higgins de tipo noroeste.

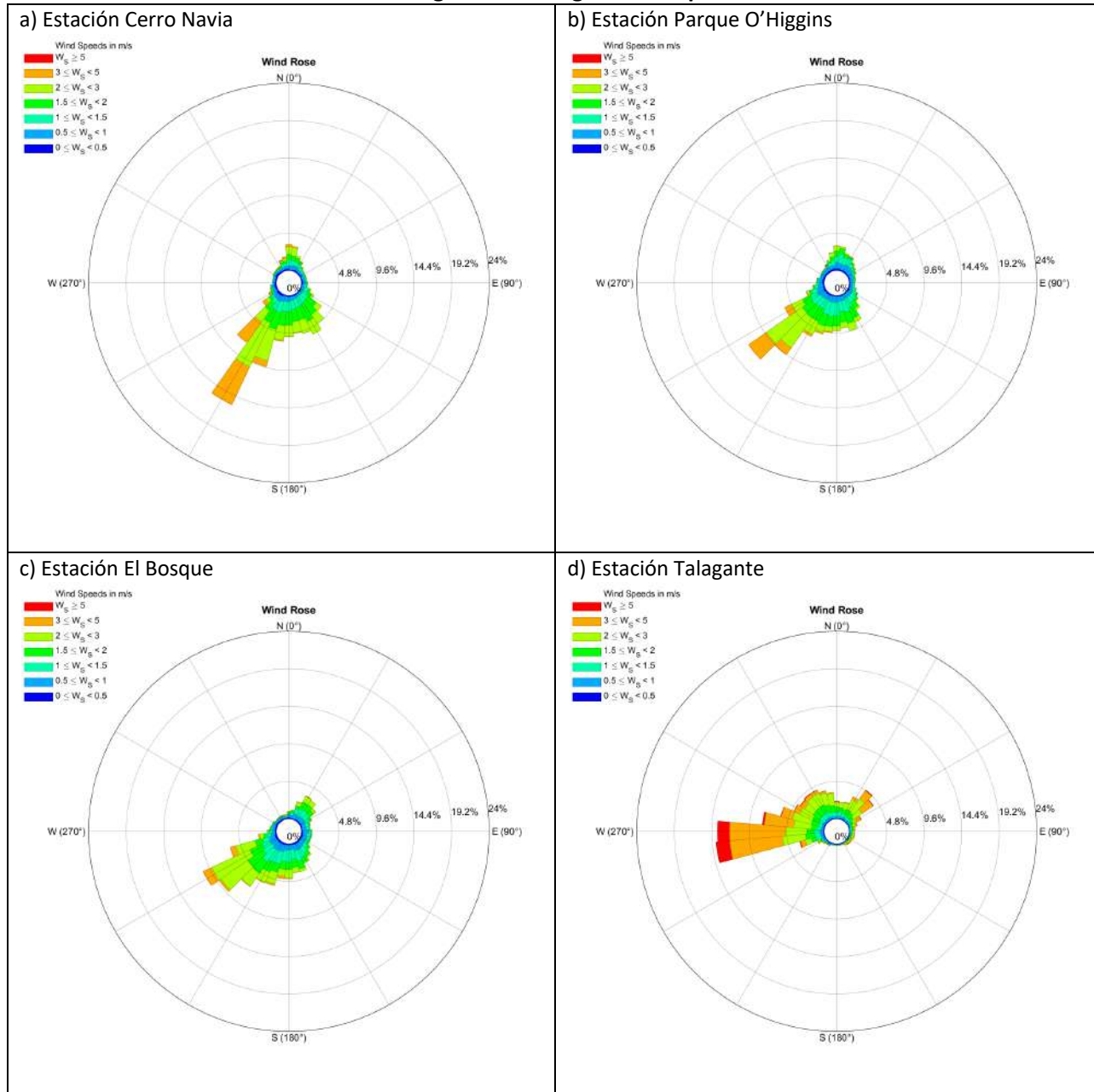
Figura 8-23: Ciclos diarios de dirección de viento modelados con WRF en la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia.

Las rosas de viento mostradas en la Figura 8-24, al igual que en las observaciones, refuerzan la tendencia de la simulación, donde en las tres estaciones localizadas en Santiago se observa componente suroeste, mientras que en Talagante la componente predominante es más bien oeste.

Figura 8-24: Rosas de viento promedio anuales modeladas con WRF en las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana.

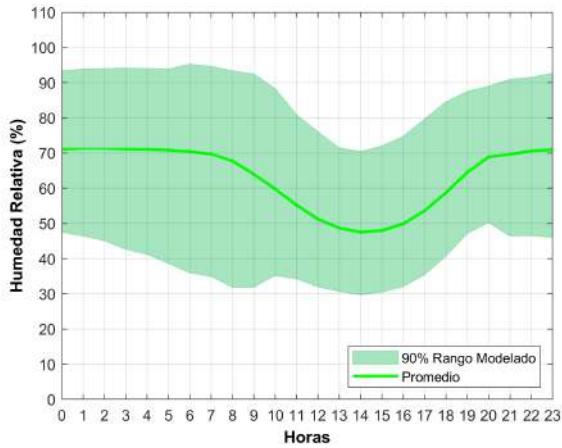


Fuente: Elaboración propia.

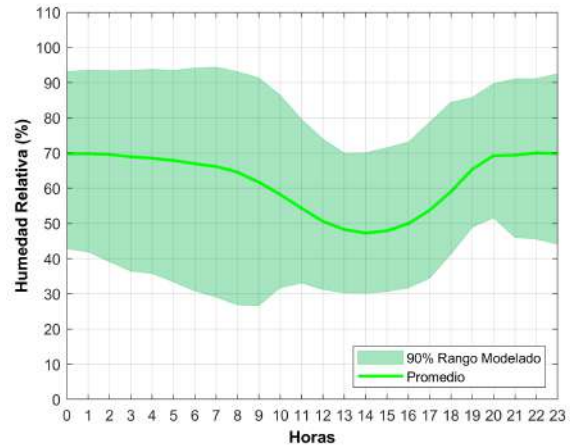
La humedad relativa simulada con WRF en las estaciones, cuyo ciclo diario se observa en Figura 8-25, muestra el cambio de magnitud de la variable respecto al día y la noche. Un promedio de 70% es simulado en el periodo nocturno disminuyendo a un 50% en el día. Respecto a la variabilidad expresado en los percentiles 5% y 95%, esta es mayor en las estaciones localizadas en Santiago que en estación Talagante.

Figura 8-25: Ciclos diarios de humedad relativa modelados con WRF en la Región Metropolitana.

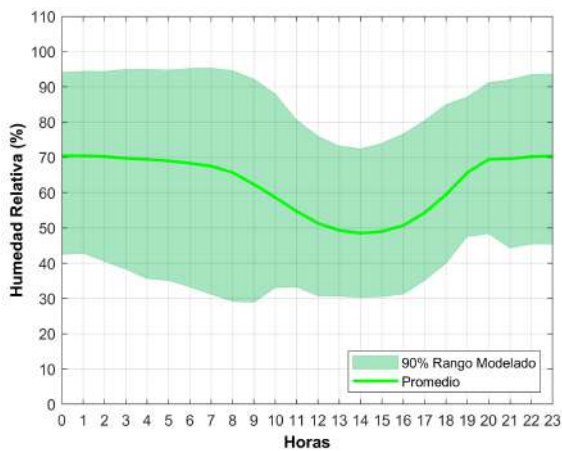
a) Estación Cerro Navia



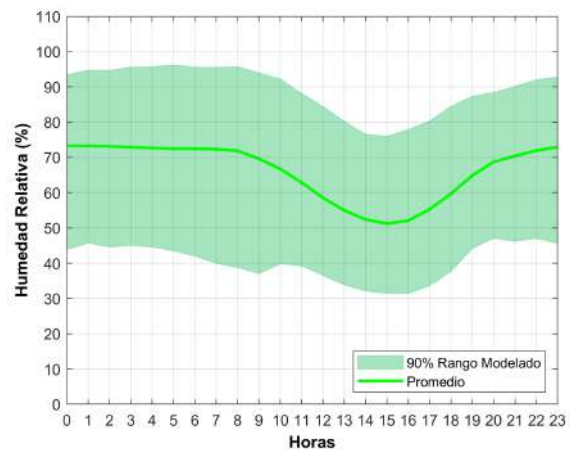
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante

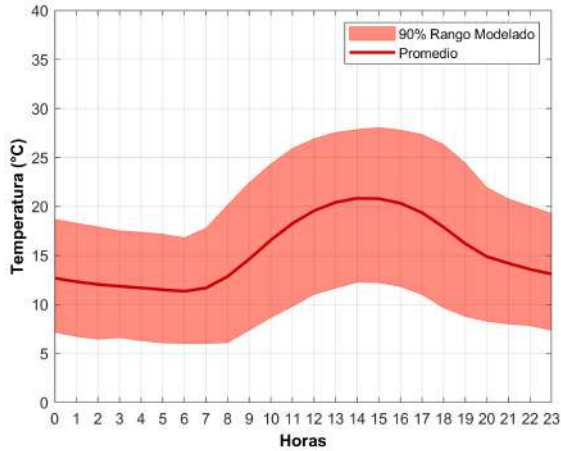


Fuente: Elaboración propia.

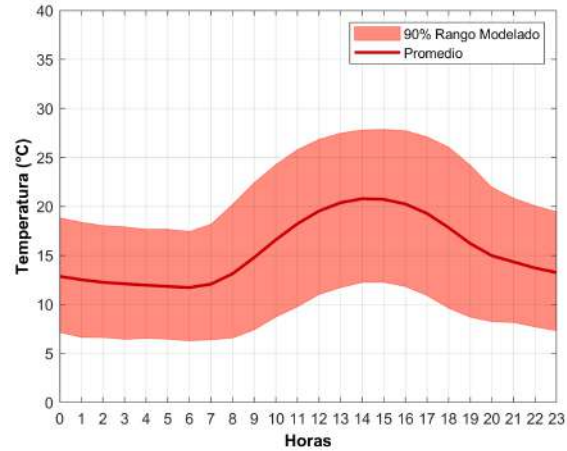
Con respecto al ciclo diario de la temperatura modelada con WRF, en Figura 8-26 se aprecia el inverso del ciclo respecto a la humedad relativa, con el máximo de la curva promedio en el día y el mínimo en la noche. El promedio en la noche se encuentra asintóticamente cercano a los 14 °C, mientras que en el día aumenta a un máximo de 20 °C aproximadamente a las 15:00 horas. La variabilidad es similar en las estaciones mostradas, siendo levemente menor en Talagante.

Figura 8-26: Ciclos diarios de temperatura modelados con WRF en la Región Metropolitana.

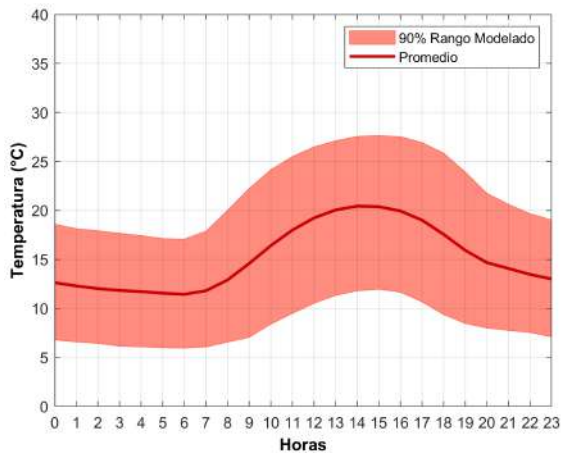
a) Estación Cerro Navia



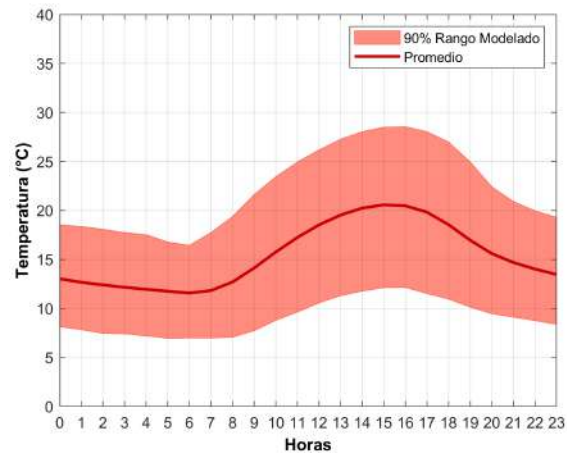
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante



Fuente: Elaboración propia.

Refuerzan la descripción de las series diarias (Figura 8-20) y los gráficos de caja y bigote (Figura 8-21) de las variables meteorológicas, la descripción estacional de las mismas presentadas en Figura 8-27 a Figura 8-29.

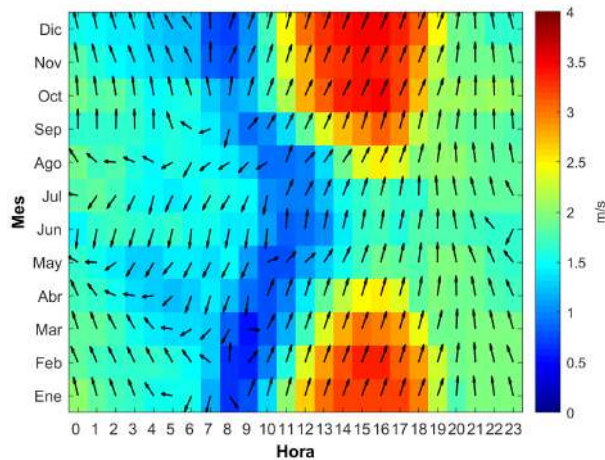
En Figura 8-27 se aprecia que la estacionalidad de la magnitud de velocidad de viento simulada es máxima en el periodo estival y diurno, cercano a los 4 m/s en las estaciones mostradas. Llama la atención que la simulación en estación Talagante muestra una profundización del aumento de la velocidad de viento, diaria y estacional en relación con el resto de las estaciones mostradas. Los mínimos de velocidad de viento se presentan en el periodo nocturno y parte de la mañana con valores cercanos a vientos calmos y 1,5 m/s.

Respecto a la dirección de viento, en términos generales se observa en Figura 8-28 que las simulaciones muestran el cambio de dirección a partir de las 10:00 horas prácticamente todo el año. Puntualmente, en las estaciones localizadas en Santiago el modelo simula viento de tipo suroeste, mientras que en Talagante es de tipo oeste a la hora indicada.

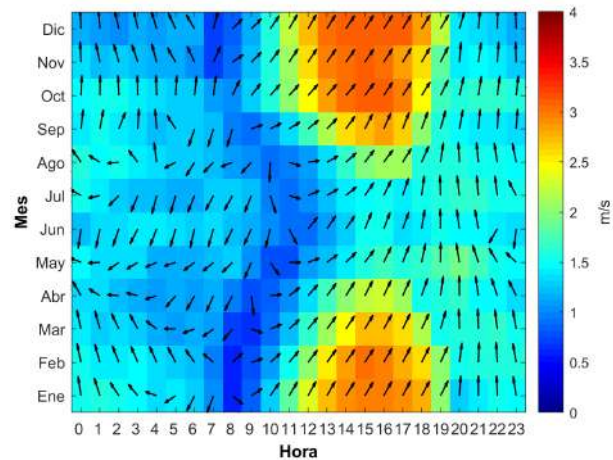
En el periodo nocturno y en los meses de verano, las simulaciones de las estaciones localizadas en Santiago muestran componente de tipo sureste en los meses de primavera verano, mientras que, en invierno los vientos son más bien de componente norte. La simulación en Talagante muestra todo el año y en el periodo nocturno vientos de componente norte.

Figura 8-27: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento modelados con WRF en la Región Metropolitana.

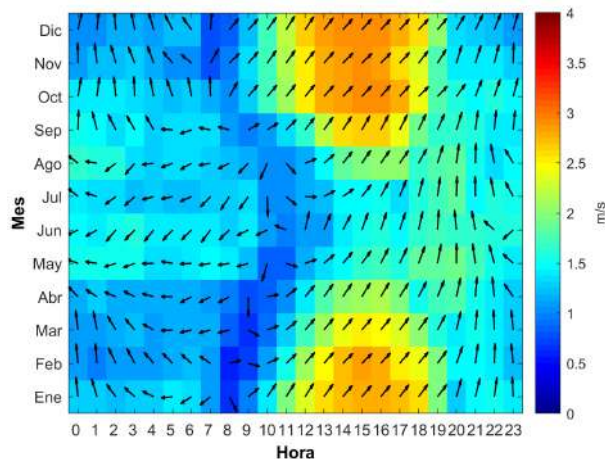
a) Estación Cerro Navia



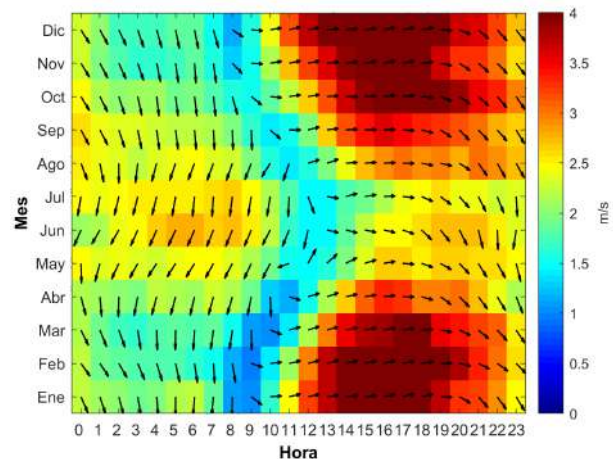
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



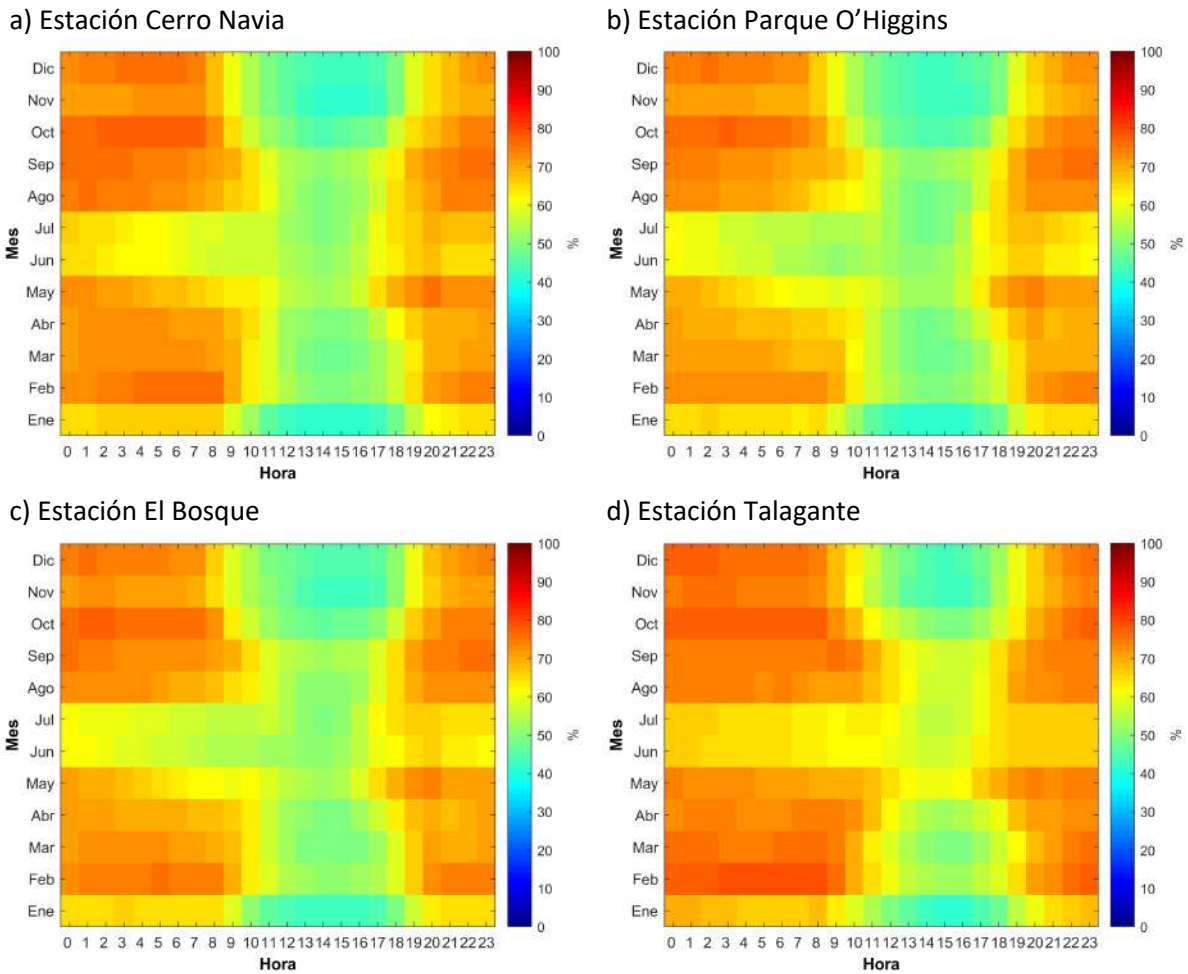
d) Estación Talagante



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la simulación de humedad relativa en las estaciones mostradas, se observa en Figura 8-28 que el modelo logra captar parcialmente el ciclo estacional de la variable, esto es mayor magnitud en los meses de invierno y periodo nocturno, sin embargo, se presenta una leve baja en los meses de junio y julio. Para el periodo estival y horas del día el modelo reproduce la disminución de la magnitud de humedad relativa.

Figura 8-28: Ciclos estacionales de humedad relativa modelados con WRF en la Región Metropolitana.

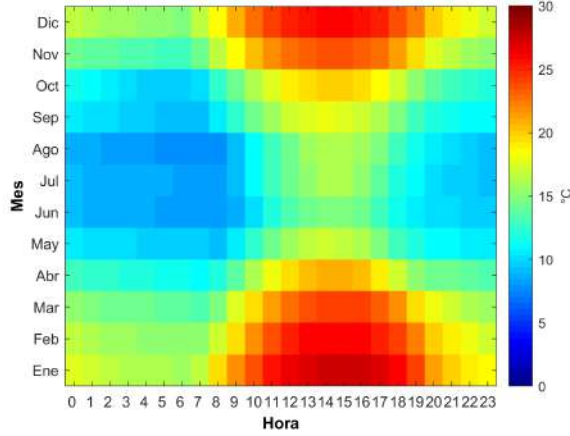


Fuente: Elaboración propia.

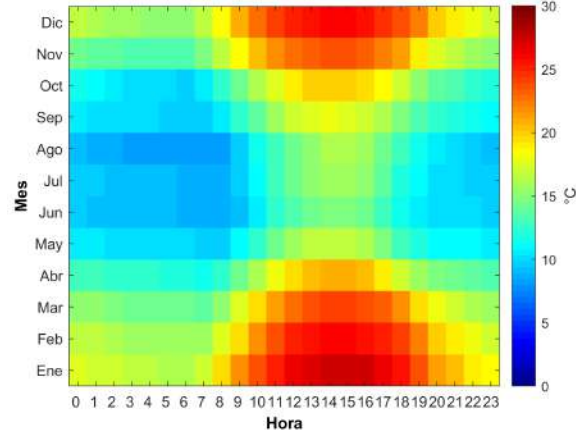
Respecto a los ciclos estacionales de temperatura que se muestran en la Figura 8-29, y al igual que los ciclos estacionales de la humedad relativa (Figura 8-28), el modelo reproduce el ciclo diario y estacional en todas las estaciones mostradas, esto es, un aumento de la magnitud de la variable en el día y meses de primavera verano y una disminución en el periodo nocturno e invernal.

Figura 8-29: Ciclos estacionales de temperatura modelados con WRF en la Región Metropolitana.

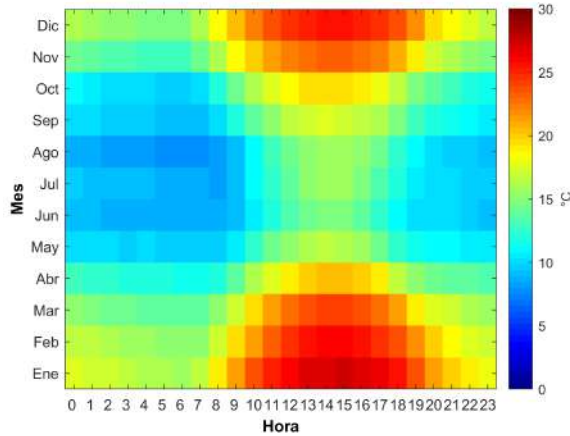
a) Estación Cerro Navia



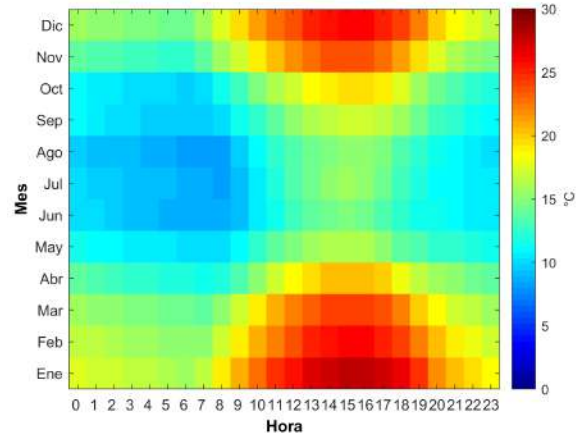
b) Estación Parque O'Higgins



c) Estación El Bosque



d) Estación Talagante



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de incertidumbre del modelo WRF en la Región Metropolitana

En esta sección se analiza el nivel de incertidumbre del modelo meteorológico WRF, de forma cualitativa mediante la comparación de gráficos, de ciclos diarios y estacionales y de forma cuantitativa, mediante estadísticos matemáticos obtenidos por comparación entre los datos horarios de las observaciones y los resultados simulados con WRF.

Los estadísticos matemáticos calculados son los siguientes:

- Error cuadrático medio (RMSE): entrega el grado de precisión entre los datos pronosticados y observados.
- Sesgo normalizado (BIASN): entrega el sesgo entre las series modeladas y observadas.
- Coeficiente de correlación (R): entrega el grado de relación lineal entre los datos observados y modelados.

Las fórmulas y rango de estos estadísticos se presentan en Tabla 8.9.

Tabla 8.9: Estadísticos Matemáticos de Literatura.

Estadístico	Ecuación	Rango
RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n}}$	(0, ∞)
BIASN	$\frac{\sum_{i=1}^n M_i - O_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$	(-∞, ∞)
R	$\frac{1}{(1-n)} \sum_{i=1}^N \frac{(M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sigma_M \sigma_o}$	[-1,1]

Fuente: Elaboración propia en base a Wilks, 2011.

Análisis cualitativo

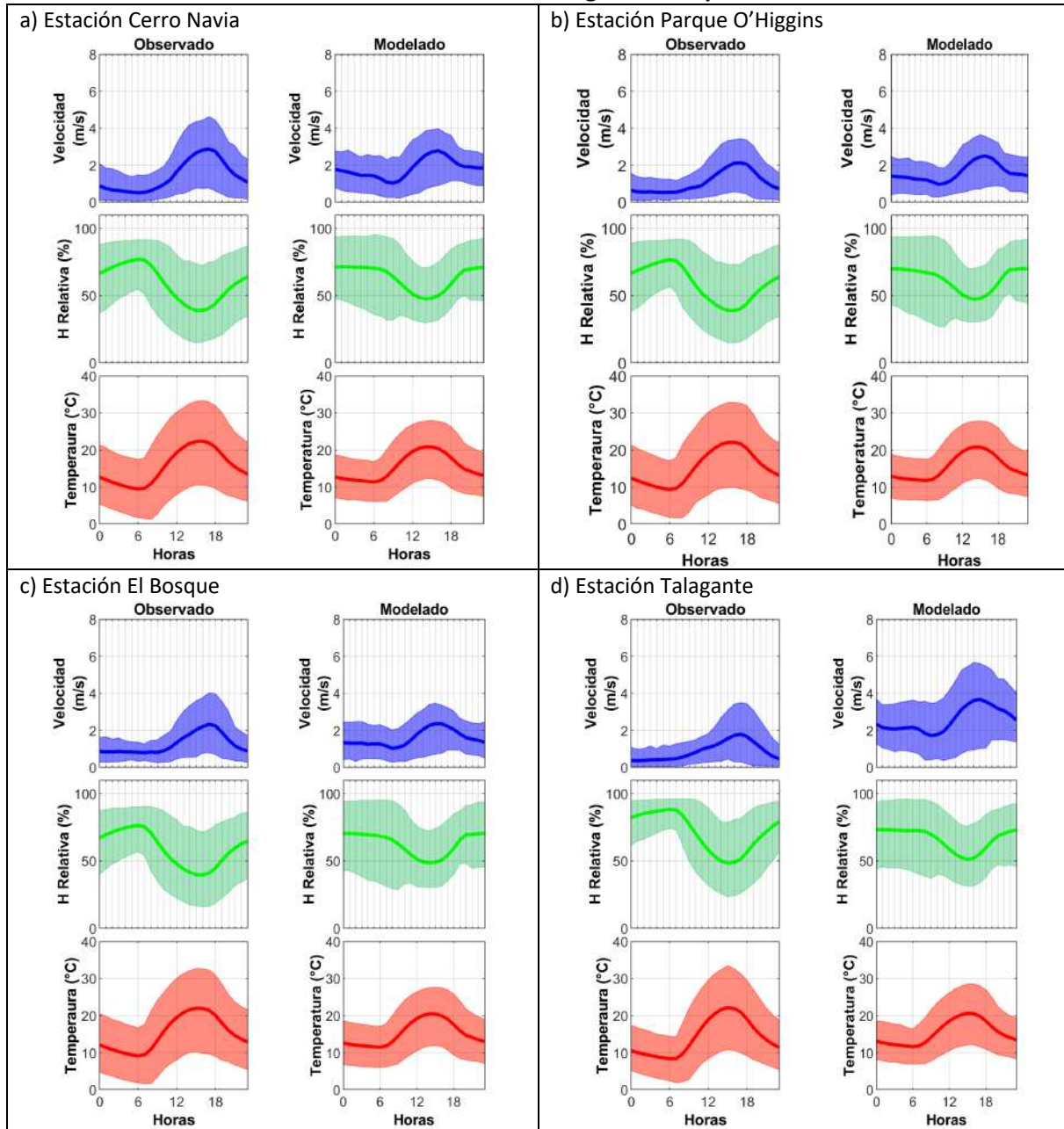
En Figura 8-30 a Figura 8-32 se presentan la comparación de los ciclos diarios y estacionales observados y modelados con WRF, de las variables velocidad y dirección de viento, humedad relativa y temperatura durante el año 2017 en las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante. El resto de las estaciones de la Red SINCA de la Región Metropolitana se presentan en Anexo I.

En términos generales, el modelo logra capturar los ciclos diarios de la velocidad de viento, temperatura y humedad relativa en las estaciones mostradas Figura 8-30. En particular, la velocidad de viento es sobrestimada siguiendo la curva promedio en las estaciones mostradas, no así la variabilidad, la cual es sobrestimada en el periodo nocturno y subestimada en el día en las estaciones localizadas en Santiago urbano. Mientras que en Talagante la variabilidad de la velocidad es notablemente sobrestimada, destacando entre las estaciones mostradas.

Respecto a la humedad relativa, el modelo no logra capturar el mínimo de la curva promedio durante el día, sobrestimando el valor del ciclo en las estaciones mostradas. La variabilidad es sobrestimada durante la noche, ya sea por un percentil 5 menor al de la observación o por un percentil 95 mayor al de la observación, mientras que en el día se simula lo contrario.

Finalmente, el modelo al reproducir el ciclo de la temperatura en las estaciones sobrestima el valor mínimo mostrado en la curva del promedio durante la noche, mientras que el valor máximo de la misma curva durante el día es subestimado. Respecto a la variabilidad esta es subestimada durante todas las horas del ciclo.

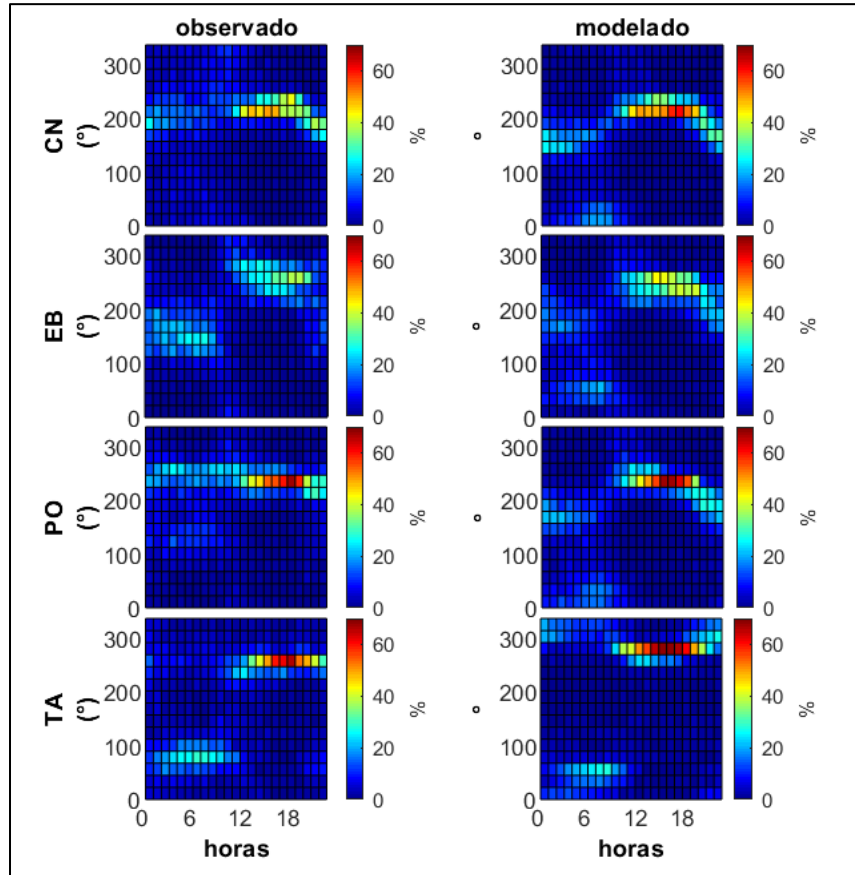
Figura 8-30: Ciclos diarios de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura observados y modelados con WRF en la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la dirección de viento, se observa en Figura 8-31 que el modelo logra capturar ciertos patrones de mesoescala del área de modelada. El cambio de dirección de viento mostrado en el ciclo diario de las observaciones es logrado por el modelo, presentando divergencias en patrones de viento nocturnos, sin embargo, la reproducción de vientos catabáticos en la Región Metropolitana es logrado notablemente.

Figura 8-31: Ciclos diarios de dirección de viento observados y modelados con WRF en estaciones de la Región Metropolitana.



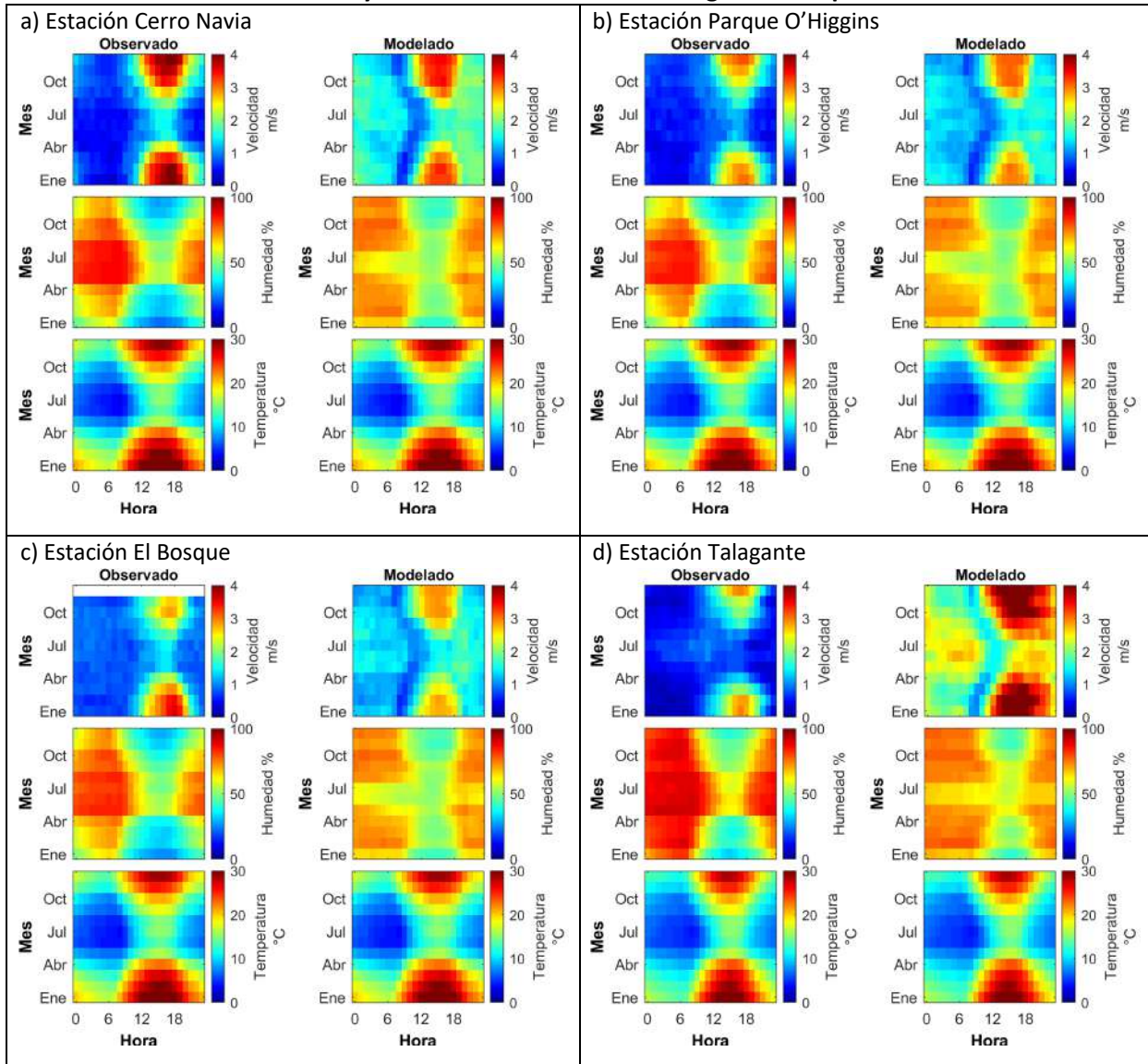
Fuente: Elaboración propia.

Complementando el análisis de los ciclos diarios, se muestran en Figura 8-32 las comparaciones entre datos observados y modelados con WRF mediante gráficos estacionales de cada variable meteorológica en cada estación. La velocidad de viento es sobrestimada por el modelo, visualizado en el periodo nocturno y durante todo el año por el contraste de colores entre observaciones (azul) y simulaciones con WRF (celeste) con una diferencia en promedio de 1 m/s.

El desempeño del modelo en reproducir la humedad relativa presentó problemas en la representación de los meses de invierno, puntualmente junio y julio donde no logra capturar los máximos de humedad del ciclo estacional. Sin embargo, el modelo logra capturar los ciclos, ya sea de forma parcial, esto es el aumento de la magnitud en invierno y noche, y su disminución en los meses de verano y durante el día.

Finalmente, la temperatura simulada por WRF presenta un desempeño aceptable en relación a la captura de los ciclos estacional y diario, presentando un mejor desempeño que la simulación de humedad relativa.

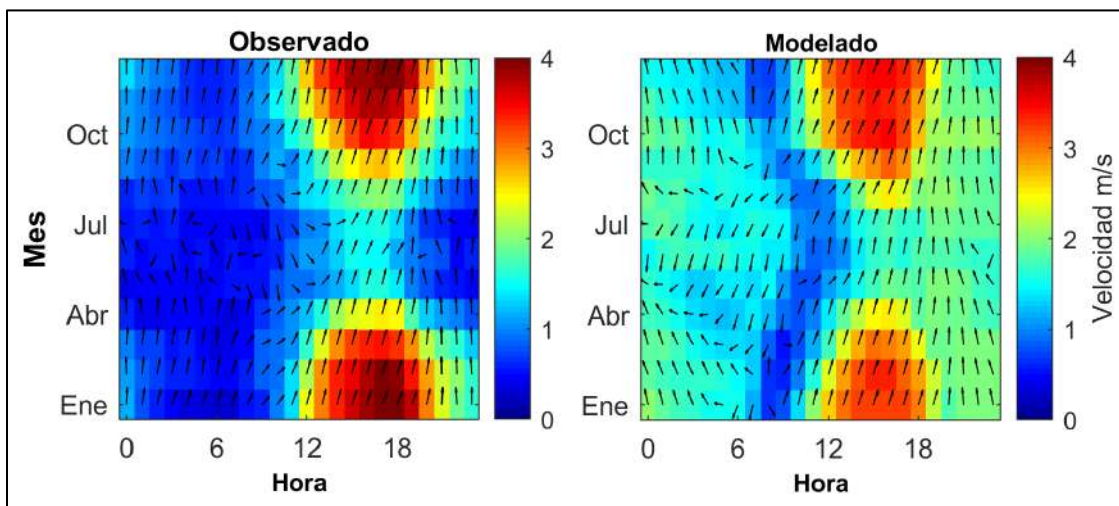
Figura 8-32: Ciclos estacionales de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura observados y modelados con WRF en la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia.

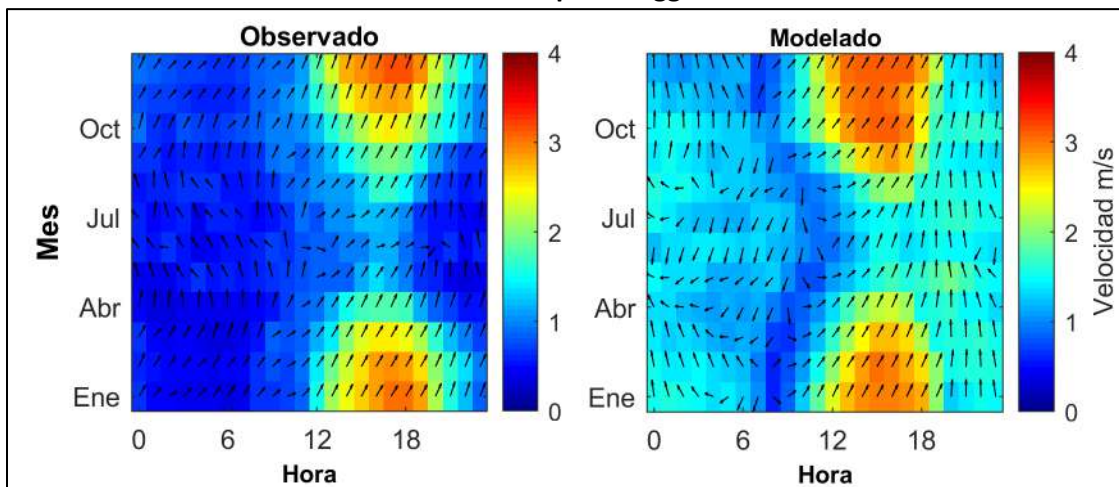
En Figura 8-33 a Figura 8-36 se presentan las comparaciones entre las gráficas que contienen los ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento. En términos generales, la dirección de viento simulada por WRF muestra una correcta aproximación a los vientos observados en las estaciones localizadas en Santiago, logrando reproducir la componente suroeste del día a lo largo de todo el año y atisbos de cambios que se producen en los meses de invierno en el periodo nocturno y en la transición matutina. Distinto es el caso de la estación Talagante, donde WRF solo logra reproducir parte de la componente, esto es, viento suroeste diurno el cual es simulado como oeste y los vientos nocturnos de tipo noreste son simulados de tipo norte.

Figura 8-33: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados y modelados con WRF en Cerro Navia.



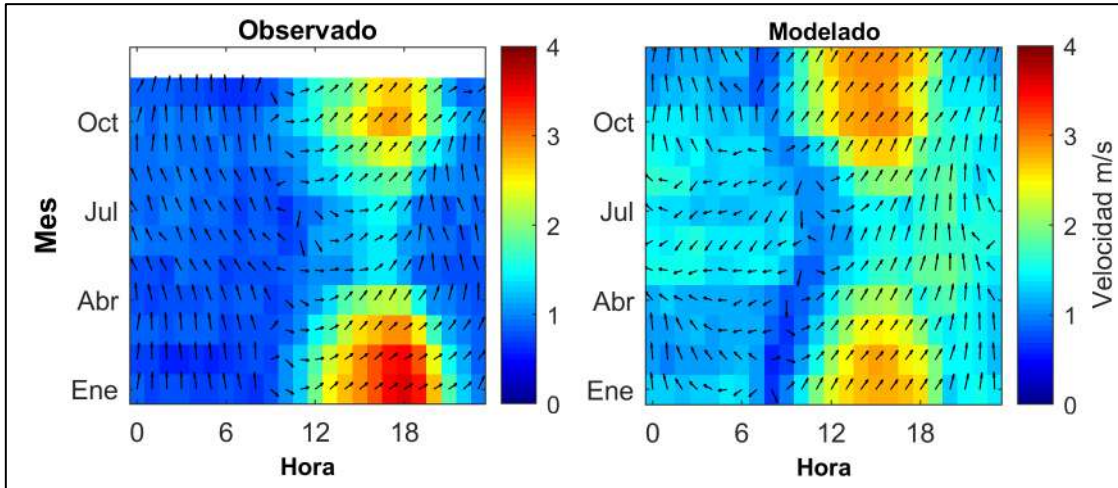
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-34: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados y modelados con WRF en Parque O'Higgins.



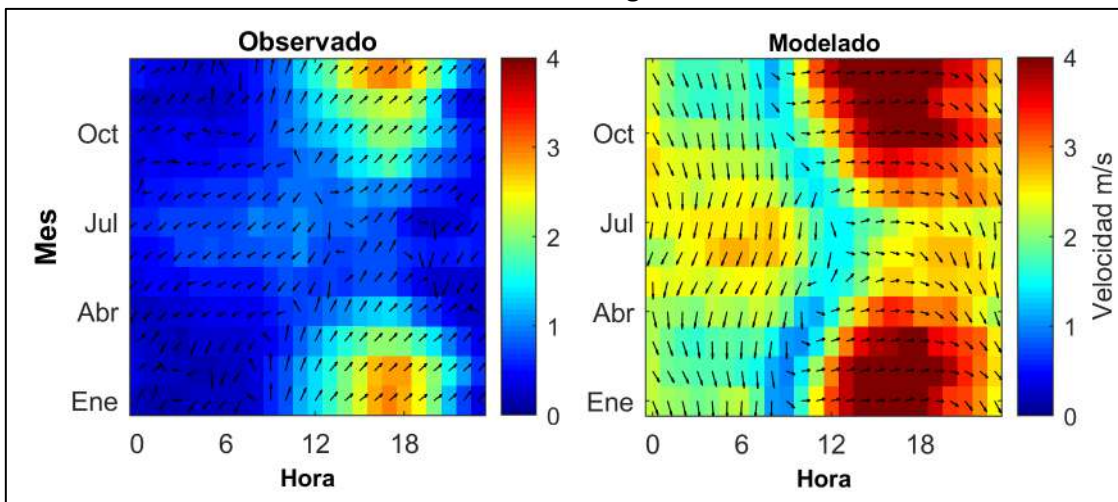
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-35: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados y modelados con WRF en El Bosque.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-36: Ciclos estacionales de velocidad y dirección de viento observados y modelados con WRF en Talagante.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo es realizado mediante la utilización de los estadísticos descritos al inicio de la sección 0. Estos son resultados de la comparación entre las series de datos observados y modelados con WRF, extraídos para las estaciones Cerro Navia, Parque O'Higgins, El Bosque y Talagante, los cuales se presentan en Tabla 8.10. Estos estadísticos dan una muestra del desempeño del modelo en los puntos geográficos analizados.

Tabla 8.10: Resultados estadísticos obtenidos de la comparación de datos observados y modelados con WRF en las estaciones Cerro Navia, Parque O’Higgins, El Bosque y Talagante.

Estadística	Variable	Unidad	Cerro Navia	P. O’Higgins	El Bosque	Talagante
BiasN	VV	m/s	0,29	0,47	0,23	1,94
	HR	%	0,07	0,05	0,06	-0,07
	T	°C	-0,003	0,02	0,004	0,084
RMSE	VV	m/s	1,03	0,91	0,84	1,97
	HR	%	17,78	18,82	17,29	16,09
	T	°C	2,94	2,96	2,82	2,94
R	VV	Adimensional	0,62	0,58	0,52	0,61
	HR	Adimensional	0,61	0,55	0,61	0,66
	T	adimensional	0,95	0,96	0,96	0,96

VV: velocidad de viento HR: humedad relativa T: temperatura del aire.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo sobrestimó levemente los resultados de velocidad de viento, expresado mediante el BiasN, en las tres estaciones localizadas en Santiago, mientras que en Talagante la diferencia se presentó con un valor 1,94 m/s. Respecto a las variables humedad relativa y temperatura la sobrestimación o subestimación fue casi nula, con valores cercanos a 0.

La precisión del modelo meteorológico WRF respecto a la velocidad tuvo el mejor desempeño en estación Parque O’Higgins con un valor de 0,91 m/s, mientras que para la humedad relativa y temperatura la mejor precisión fue obtenida en la estación El Bosque con un 17% y 2,82 °C respectivamente.

Finalmente, la mejor relación entre las series de tiempo observadas y modeladas para la velocidad de viento fue obtenida en Cerro Navia, con un R de 0,62, mientras que, para la humedad relativa y la temperatura el modelo tuvo su mejor desempeño en Talagante con un R de 0,66 y 0,96 respectivamente.

8.3.5 Implementación y aplicación del modelo fotoquímico CAMx en la Región Metropolitana

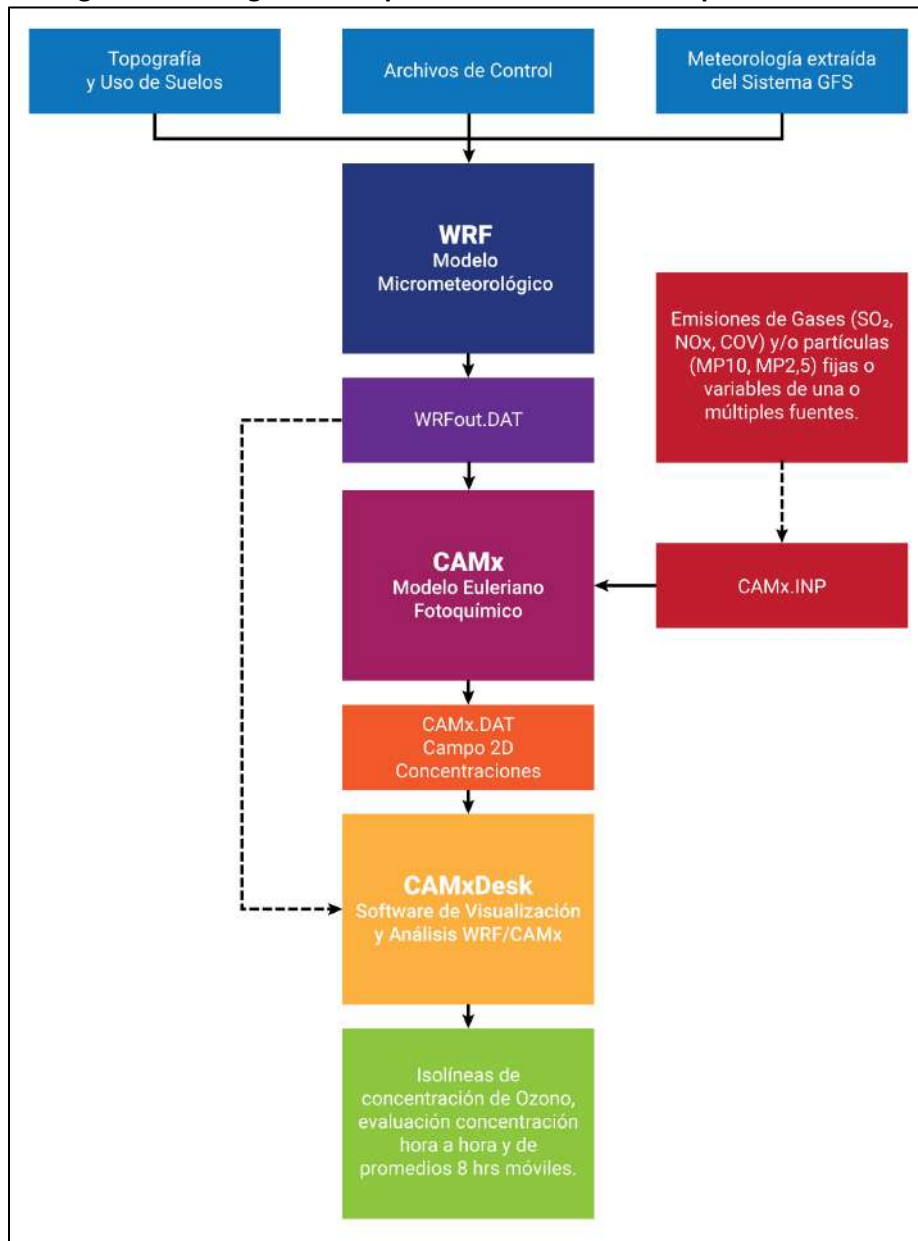
La implementación y aplicación del sistema fotoquímico CAMx para modelar las concentraciones de NO₂, O₃ y MP_{2,5} en Región Metropolitana se realizó considerando la meteorología del año 2017 modelada con WRF, y las emisiones correspondientes al Inventario de Emisiones de la RM presentado en el Informe de Avance 2.

El sistema CAMx, considera el estado del arte de la fotoquímica atmosférica, para evaluar el incremento de contaminantes secundarios debido a emisiones de precursores de estos, en un dominio o área de interés. En este estudio el modelo se alimenta de la micrometeorología generada por el modelo WRF, además de las emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NOx), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Anhídrido Sulfuroso (SO₂), Monóxido de Carbono (CO), etc., de las diferentes fuentes en el área de modelación.

En Figura 8-37 se presenta un diagrama del sistema CAMx, donde se ilustran los diferentes archivos de entrada requeridos por el modelo. Como se observa en esta figura, CAMx requiere la meteorología generada por WRF y la información de emisiones, entregada en el Inventario de Emisiones.

Las características de la implementación del modelo CAMx versión 6.0 para este estudio se presentan en las secciones siguientes.

Figura 8-37: Diagrama de operación del modelo fotoquímico CAMx.



Fuente: Elaboración propia.

El modelo fotoquímico CAMx se implementó en la zona de la Región Metropolitana considerando un subdominio del considerado para WRF. En este caso, el dominio de CAMx considera 120 km en la dirección Este-Oeste y 120 km en la dirección Norte-Sur, manteniendo el mismo centro que el utilizado con modelo WRF. Las características de este dominio se resumen en Tabla 8.11 y en Figura 8-38 se muestra el área del dominio utilizado.

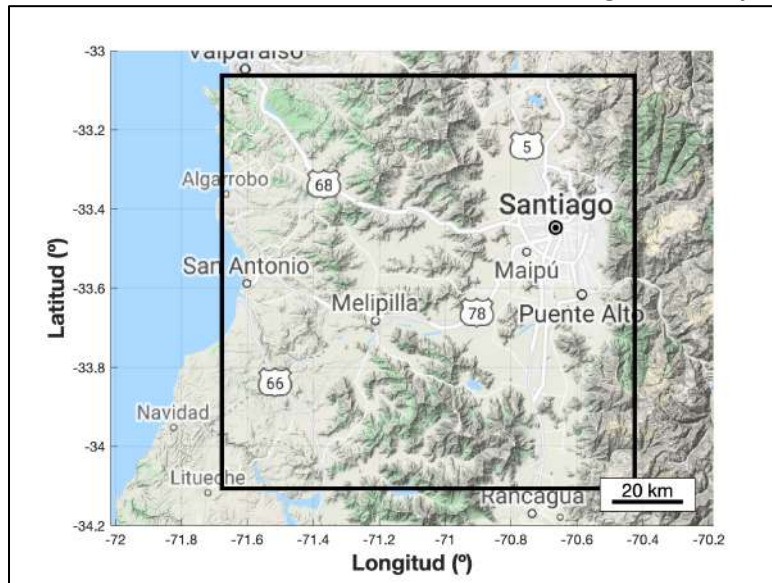
Tabla 8.11: Características del dominio de modelación utilizando el sistema CAMx en la zona de la Región Metropolitana*.

Características	
Resolución	4.000 x 4.000 (m)
Nº de celdas en dirección X	30
Nº de celdas en dirección Y	30
Coordenadas del centro del dominio.	Latitud: -33.585981; Longitud: -71.047205
Total del área del dominio	30 x 30 x 4 (km) x 4 (km) = 14.400 km ²

*: Corresponde a una parte de la segunda grilla en la modelación del modelo WRF.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-38: Dominio de modelación de CAMx en la Región Metropolitana.



Fuente: Elaboración propia.

Los modelos que simulan reacciones fotoquímicas de la atmósfera requieren que las emisiones de COV's y NO_x, sean especiadas, según dos enfoques básicos (USEPA, 2003a):

- Especiación por compuestos individuales (discrete speciation). Por ejemplo, las emisiones de Benceno, Hexano, Formaldehido, Óxido Nitroso. Para ello se suele utilizar los denominados perfiles de especiación, los cuáles, en función de la fuente emisora, asignan porcentajes para la estimación de la emisión desglosada de cada compuesto individual.

- Especiación por grupos de compuestos (lumped-mode speciation); que integran las emisiones de dos o más compuestos individuales, según su comportamiento reactivo y de acuerdo al mecanismo fotoquímico elegido para los estudios de contaminación por O₃. Este enfoque busca simplificar el cálculo del gran número de reacciones que ocurren en la baja troposfera.

Estudios realizados por Jiménez et al. (2003) desarrollaron un análisis comparativo de siete de los principales mecanismos fotoquímicos existentes y se definió que casi todos proporcionan concentraciones similares de O₃; aunque hay discrepancias significativas para otros compuestos como el HO₂ o el HNO₃. En este estudio se utilizó el mecanismo SAPRC-07 (Statewide Air Pollution Research Center-07). En este análisis comparativo, el mecanismo químico Carbon Bond 4 (CB4) presentó resultados representativos del actual estado del arte incorporando el menor número de reacciones (por tanto, requiere menor proceso de cálculo). Este mecanismo considera diferentes categorías para la simulación numérica de las reacciones que ocurren en la baja troposfera, distribuyendo las emisiones gaseosas en uno o más grupos, según la importancia y/o la similitud de las reacciones químicas, de acuerdo con cuatro tipos de especies:

- Especies inorgánicas.
- Especies orgánicas cuyas reacciones químicas son específicas e importantes, por lo que se tratan explícitamente.
- Especies orgánicas que se representan por medio de una categoría sustitutiva en relación con el enlace de los átomos de carbono.
- Especies orgánicas que se representan por medio de una categoría sustitutiva en relación con su estructura molecular.

El mecanismo Carbon Bond 5 (CB5) fue desarrollado por Yarwood, Rao, Yocke, & Whitten (2005) y está basado en la versión 4 del mecanismo Carbon Bond (CB4) desarrollado a finales de los 80s y actualizado a mediados de los 90s.

CB5 es un mecanismo condensado de química oxidativa atmosférica que provee una base para estudios de modelación computacional de Ozono, material particulado (PM), visibilidad, deposición ácida y problemas de gases tóxicos. Tiene 51 especies y 156 reacciones. El mecanismo fue evaluado con respecto a datos de cámara de smog de la Universidad de Carolina del Norte y la Universidad de California en Riverside y contiene múltiples mejoras con respecto al mecanismo CB4.

Yarwood, y otros (Yarwood, Rao, Yocke & Whitten, 2005) revisaron el conjunto de reacciones del mecanismo CB4 para identificar las reacciones que deberían añadir para tener en cuenta condiciones de temperatura, presión y ambiente químico que se encontraron en simulaciones anuales en escalas entre la urbana y la continental. Al mecanismo CB5 se le añadieron 17 reacciones inorgánicas entre las cuales hay:

- Reacciones para el hidrógeno molecular que tienen importancia para la química del OH y el HO₂ y para condiciones muy secas en la tropósfera superior. Incluir el Hidrógeno permite evaluar los impactos en la calidad del aire que pueda causar usar Hidrógeno como un combustible alternativo.

- Reacciones para modelar de manera más completa la química del radical hidroxilo (OH) en la tropósfera superior y para mejorar la modelización de sustancias tóxicas persistentes y del Mercurio.
- Reacciones adicionales para el radical NO₃ para mejorar la química nocturna. El radical NO₃ es el protagonista principal de la química atmosférica nocturna e incluir reacciones de remoción de NO₃ mejora los cálculos de las velocidades de destrucción de varios tipos de hidrocarburos reactivos.
- Reacciones de recirculación de NO_x para mejorar la representación del destino del NO_x en escalas de tiempo superiores a un día por medio de la recirculación lenta de formas inactivas de NO₂ al NO_x.

El desarrollo de CB6 se realizó para la Comisión de Calidad Ambiental de Texas (TCEQ) que es responsable de desarrollar el Plan de Implementación del Estado de Texas (SIP) para el Ozono, por Yarwood, Jung, Whitten, Heo, Mallberg & Estes (2010). El desarrollo del Plan de Implementación del Estado de Texas de Ozono se basa en la modelación utilizando el modelo fotoquímico Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) (ENVIRON, 2010) y el mecanismo químico CB05 (Yarwood et al., 2005). El mecanismo químico es un componente crítico en el desarrollo del Plan de Implementación del Estado de Texas de Ozono porque forma el vínculo entre las emisiones de precursores del Ozono, a saber, óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC), y las concentraciones de Ozono en el modelo fotoquímico. La investigación en química atmosférica proporciona continuamente nueva información que debe evaluarse y potencialmente incorporarse a los mecanismos químicos para mantener su precisión y, por lo tanto, proporcionar las mejores estrategias posibles para mejorar la calidad del aire del Ozono.

Las principales actualizaciones de CB05 a CB6 son:

- Incorporación de nueva información científica publicada desde la actualización del mecanismo anterior en 2005 (CB05), especialmente según lo evaluado por los paneles de revisión de la IUPAC (Atkinson et al., 2010) y la NASA (Sander et al., 2006).
- Revisión y actualización de reacciones para alcanos, alquenos y aromáticos con la mayoría de los cambios resultantes para isopreno y aromáticos.
- Agregar explícitamente varios COV de larga duración que forman ozono a escalas regionales, específicamente propano, benceno, acetona y otras cetonas.
- Añadiendo explícitamente acetileno y benceno porque son precursores de la formación de SOA y útiles como trazadores de emisiones antropogénicas.
- Agregar explícitamente productos de degradación de COV que pueden producir SOA mediante reacciones en fase acuosa, específicamente glioxal, glicolaldehído y metilglioxal.

Además, CB06 tiene 5 nuevas especies modeladas de COV que deben considerarse en el procesamiento de emisiones:

- PRPA que representa propano (representado como 1,5 PAR + 1,5 NR en CB05)
- BENZ representa el benceno (representado como 1 PAR + 5 NR en CB05)
- ETHY representa el etino (representado como ALDX en CB05)
- ACET que representa acetona (representado como 3 PAR en CB05)

- KET que representa grupos de cetonas (representado como PAR en CB05)

En Tabla 8.12 se indican las especies que considera el mecanismo químico CB6.

Tabla 8.12: Especies del mecanismo químico Carbón Bond 6 (CB6).

Espece	Descripción
BZO ₂	Radical peroxi de la adición de OH al benceno
EPX ₂	Radical peroxi de la reacción de EPOX con OH
ISO ₂	Radical peroxi de la adición de OH al isopreno
OPO ₃	Radical peroxiacilo de OPEN
RO ₂	Operador para aproximar la concentración total de radicales peroxi
XLO ₂	Radical peroxi de la adición de OH a XYL
CAT1	Metil-catecoles
CRON	Nitro-cresols
CH ₄	Metano
EPOX	Epóxido formado a partir de la reacción de ISPX con OH
ISPX	Hidroperóxidos de la reacción ISO ₂ con HO ₂
FORM	Formaldehído
GLY	Glioxal
GLYD	Glicolaldehído
INTR	Nitratos orgánicos de reacción ISO ₂ con NO
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Óxido nitroso
O ₃	Ozono
O	Átomo de oxígeno en el estado electrónico O3(P)
O1D	Átomo de oxígeno en el estado electrónico O1(D)
OH	Radical hidroxilo
HO ₂	Radical hidroperoxy
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno
NO ₃	Radical nitrato
HPLD	Hidroperoxialdehído
N ₂ O ₅	Pentóxido de dinitrógeno
HONO	Ácido nitroso
HNO ₃	Ácido nítrico
PNA	Ácido peroxinítrico (HNO ₄)
CO	Monóxido de carbono
FORM	Formaldehído
ALD2	Acetaldehído
ETOH	Etanol
C ₂ O ₃	Radical acetilperoxy
HCO ₃	Aducto de HO ₂ y formaldehído
PAN	Nitrato de peroxiacetilo
ALDX	Propionaldehído y aldehídos superiores
CXO ₃	Radicales acetilperoxy de tres o más carbonos
PANX	Nitratos de peroxiacetilo de tres o más carbonos
XO ₂	Conversión de NO a NO ₂ a partir del radical alquilperoxy (RO ₂)
XO ₂ H	Conversión de NO a NO ₂ (XO ₂) acompañada de producción de HO ₂
XO ₂ N	Conversión de NO nitratos orgánicos a partir del radical alquilperoxy (RO ₂)

Especie	Descripción
NTR	Nitrato orgánico (RNO ₃)
MEO₂	Radical metilperoxy
MEOH	Metanol
MEPX	Metilhidroperoxido
FACD	Ácido fórmico
ETHA	Etano
ROOH	Peróxidos orgánicos superiores
AACD	Ácido acético y otros ácidos carboxílicos superiores
PACD	Ácido peroxiacético y otros ácidos peroxiacéticos superiores
PAR	Enlace parafínico (C-C)
ROR	Radical alcoxy secundario
ETH	Eteno
OLE	Enlace olefínico terminal (R-C=C)
IOLE	Enlace olefínico interior (R-C=C-R)
ISOP	Isopreno
ISPD	Productos de isopreno (metacroleínas)
OPAN	Nitrato de peroxiacetilo (compuesto PAN) de OPO ₃
TERP	Terpeno
TOL	Tolueno y otros aromáticos monoalquílicos
XYL	Xileno y otros aromáticos polialquílicos
CRES	Cresol y otros fenoles de alto peso molecular
TO₂	Aducto del radical hidroxilo y tolueno
OPEN	Producto de apertura de anillos aromáticos
CRO	Radical metilfenoxi
MGLY	Metilglicoxal y otros productos aromáticos
SO₂	Dióxido de azufre
SULF	Ácido sulfúrico gaseoso
BENZ	Benceno
KET	Grupos de cetonas
ACET	Acetona
ETHY	Etino
PRPA	Propano
NTR1	Nitrato de peroxiacetilo (compuesto PAN) de OPO ₃
NTR2	Nitratos orgánicos multifuncionales
ECH₄	Metano emitido (para permitir el seguimiento separado del CH ₄)
XPRP	Operador de nitratos orgánicos de PRPA.
XPAR	Operador de nitratos orgánicos de PAR.
CRNO	Radical oxi nitro-cresol
CRN2	Radical peroxi nitro-cresol
CRPX	Hidroperóxido de nitro-cresol
CAO₂	Producto de apertura de anillo de metil catecol

Fuente: Elaboración propia.

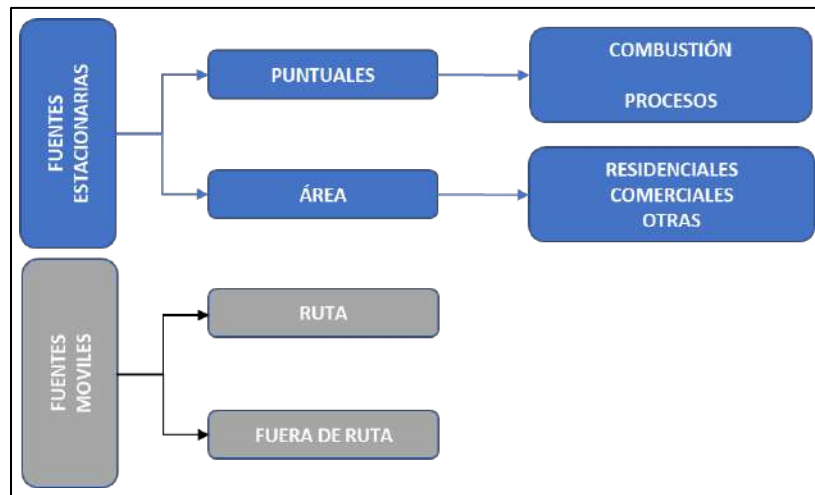
Considerando los avances del mecanismo CB6 en la fotoquímica de la atmósfera, este mecanismo se eligió como parte del proceso de implementación del modelo CAMx para este estudio, considerando de esta manera el estado del arte en fotoquímica atmosférica.

Para la aplicación del modelo CAMx se consideró el periodo meteorológico del año 2017 modelado con WRF y presentado en Capítulo 8.3.4. Para este periodo se consideró las emisiones presentadas en el Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana presentado en Informe de Avance 2.

8.3.5.1 Implementación del Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana en CAMx

Las emisiones de la Región Metropolitana presentadas en Informe de Avance 2 que se consideran en este estudio tienen 2 grandes grupos de fuentes: las fuentes estacionarias y fuentes móviles. A su vez cada uno de estos grupos tienen subgrupos más específicos, tal como se muestra en Figura 8-39.

Figura 8-39: Esquema General de clasificación de fuentes para elaboración de los Inventarios.



Las fuentes estacionarias de área y las fuentes móviles se implementaron en CAMx como fuentes tipo área. En el caso de las emisiones de fuentes estacionarias puntuales, estas se implementaron en CAMx con la información de las características de las chimeneas de estas fuentes, tales como: altura y diámetro de la chimenea, temperatura y velocidad de salida de los gases. Estas características se presentan en Tabla 8.13.

Las fuentes puntuales que no aparecen en Tabla 8.13 también fueron implementadas en CAMx como fuente de área en su grilla de ubicación, sin embargo, las fuentes mostradas, poseían características de velocidad y temperatura de gases formidables que escapaban de la capa superficial de la modelación de CAMx.

Tabla 8.13: Características de fuentes puntuales del Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana.

Empresa	Descripción	Diámetro (m)	Altura (m)	Velocidad de gases (m/s)	Temperatura de gases (°C)
Comunidad Edificio El Bosque Sur 379	Caldera de calefacción	0,355	47	10	187,4
Comunidad Edificio El Bosque Sur 379	Caldera de agua caliente	0,245	47	10	174,2
Comunidad Edificio Plaza Real	Caldera de calefacción	0,4	38	10	80
Gimnasio o Dos Los Dominicos	Caldera de calefacción y Agua Caliente	0,22	34.5	0,36	90
Kennedy Plaza	Grupo electrógeno de emergencia	0,19	62	12	40
Saint John"s Villa Academy	Caldera de calefacción y Agua Caliente	0,1503	45	10	161,72
Sociedad Industrial Romeral, Planta San Gabriel	Horno de calcinación N° 2	1,01	19	11	111
Cristalerías de Chile S.A.	Horno fundición vidrio	2,42	40	10,3	270
Cristalerías de Chile S.A.	Horno fundición vidrio	2,42	40	10,3	270
Cristalerías de Chile S.A.	Horno fundición vidrio	2,42	40	10,3	270
Planta Polpaico - Til Til	Horno 1	5	74	11,97	116,1
Fa. de Cal Melipilla	Horno rotatorio N° 1	2	25	3,7	201
Fa. de Cal Melipilla	Horno rotatorio N° 2 para producción de cal	1,82	45	9,2	303
Hotelera Presidente Sociedad anónima	Caldera es utilizada para generación de agua caliente y calefacción	0,56	23	9	140
Hotelera Presidente Sociedad anónima	Caldera es utilizada para generación de agua caliente y calefacción	2	23	6	120
Inversiones Hoteleras S.A.	Caldera de calefacción y Agua Caliente	0,41	51	10	70
Inversiones Hoteleras S.A.	Caldera de calefacción y Agua Caliente	0,41	51	10	70

Fuente: Elaboración propia.

En Tabla 8.14 se presentan los contaminantes considerados en el Inventario de la Región Metropolitana por cada tipo de fuente. Estas emisiones fueron optimizadas en cuanto a sus perfiles diarios y mensuales de emisión, a fin de permitir una relación emisión impacto en las diferentes estaciones del año. Por lo tanto, las emisiones fueron ingresadas al modelo en forma horaria.

**Tabla 8.14: Contaminantes emitidos por cada tipo de fuente del Inventario de Emisiones de la
Región Metropolitana.**

Fuentes		Contaminantes										
		COV	NO _x	NO ₂	NO	SO _x	SO ₂	CO	NH ₃	CO ₂	MP ₁₀	MP _{2,5}
Fuentes estacionales												
Puntuales	Grupos electrógenos	X	X			X		X	X			
	Calderas de Calefacción	X	X			X		X	X			
	Calderas Industriales	X	X			X		X	X			
	Calderas de generación eléctrica	X	X			X		X	X			
	Procesos industriales	X	X			X		X	X			
	Hornos de panadería	X	X			X		X	X			
Área	Aplicación de asfalto	X										
	Artes gráficas	X										
	Combustión residencial GLP	X	X			X		X				
	Combustión residencial GN	X	X			X		X				
	Combustión residencial Kerosene	X	X			X		X				
	Combustión residencial Leña	X	X			X		X	X			
	Crianza de animales								X			
	Distribución de combustible	X										
	Fertilizantes								X			
	Fugas comerciales de GLP	X										
	Fugas residenciales de GLP	X										
	Incendios forestales	X	X				X	X		X	X	X
	Incendios urbanos	X	X					X	X			
	Lavasecos	X										
	Pintado arquitectónico	X										
	Pintado de vehículos	X										
Quemas agrícolas	X	X				X	X				X	
Solventes	X											
Fuentes móviles												
En Ruta	Automóviles	X	X				X	X	X			
	Motocicletas	X	X				X	X	X			
	Buses	X	X				X	X	X			
	Camiones	X	X				X	X	X			
Fuera de Ruta	Aeropuerto AMB	X	X			X		X				
	Maquinaria Agrícola y forestal	X	X				X	X	X			
	Maquinaria de construcción	X	X				X	X	X			
	Maquinaria industrial	X	X				X	X	X			
	Maquinaria de minería	X	X				X	X	X			

Fuente: Elaboración propia con información del Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana 2017.

8.3.5.2 Emisiones Biogénicas

El Modelo de Emisiones de Gases y Aerosoles de la Naturaleza (**M**odel of **E**missions of **G**ases and **A**erosols from **N**ature, MEGAN) está diseñado para cuantificar la emisión de gases y aerosoles de ecosistemas terrestres a la atmósfera. Esto generalmente se hace para generar insumos para esquemas químicos específicos en modelos químicos y de transporte utilizados para investigar la calidad del aire regional y el clima global. Las emisiones de gases reactivos y partículas de los ecosistemas terrestres, a los que aquí se hace referencia como “biogénicos”, impulsan las distribuciones atmosféricas de varios constituyentes relevantes para la calidad del aire y el clima. Las emisiones biogénicas tienden a ser muy variables y pueden variar más de un orden de magnitud en escalas espaciales de unos pocos kilómetros y escalas de tiempo de menos de un día. Esto hace que la estimación de estas emisiones sea especialmente desafiante y, sin embargo, la cuantificación y simulación precisas de estos flujos es un paso necesario hacia el desarrollo de estrategias para mitigar la contaminación del aire y el cambio climático.

El marco MEGAN calcula las emisiones biogénicas como el producto de un factor de emisión, que representa la capacidad de un tipo de vegetación para emitir un compuesto, y un factor de actividad de emisión que da cuenta de la respuesta a las condiciones ambientales cambiantes. MEGAN está diseñado para ser un sistema flexible que se puede utilizar tanto para la modelación de emisiones globales como regionales. Los datos de cobertura terrestre están disponibles con cobertura global a una resolución espacial de 30 segundos (~ 1 km²). Los datos de mayor resolución (por ejemplo, 100 a 900 m²) están disponibles para algunas regiones. MEGAN utiliza algoritmos mecánicos simples para representar la respuesta de las emisiones a las principales variables de control. En MEGAN se incluyen las emisiones de 201 especies químicas y el modelo puede generar compuestos individuales o categorías asociadas con varios esquemas de química atmosférica. Los 201 compuestos se agrupan en 20 categorías según las respuestas de las emisiones a los cambios en las condiciones ambientales. Las actividades de emisión se estiman para las 20 categorías y luego, dependiendo de la opción seleccionada por el usuario, se pueden especificar en los 201 compuestos o la salida en categorías químicas asociadas con esquemas de química atmosférica comunes (por ejemplo, CB5, CB6, CBMZ, S07, RACM, CRIV2-R5). Las variables impulsoras incluyen la cobertura del suelo, el clima y la composición química atmosférica.

En este estudio se utilizan las emisiones biogénicas implementadas en el modelo CAMx que corresponden a las obtenidas para los distintos tipos de uso de suelos considerando las variables meteorológicas modeladas con WRF para el mismo año, y los COVs biogénicos son especiados dentro de las especies del mecanismo CB6 anteriormente.

8.3.5.3 Resultados del modelo CAMx en la Región Metropolitana y comparación con concentraciones de NO₂, MP_{2.5} y O₃ observadas

En esta sección se presentan los resultados de NO₂, O₃ troposférico y MP_{2.5} secundario modelados con CAMx con a las emisiones del inventario realizado para la Región Metropolitana. Los corresponden a los obtenidos para el año 2017, considerando la meteorología modelada con WRF (presentado en sección 8.3.4). La identificación y ubicación de las estaciones monitoras de la Región Metropolitana consideradas como receptores de interés se indica previamente en Tabla 8.15.

Tabla 8.15: Ubicación de las estaciones monitoras de la Región Metropolitana donde se obtienen los resultados de CAMx.

Abreviación	Nombre	Latitud	Longitud	UTM-E (m)	UTM-N (m)	LCC-X (m)	LCC-Y (m)
CN	Cerro Navia	-33,43	-70,73	339.169	6.299.704	29.479	17.257
IN	Independencia	-33,42	-70,65	346.590	6.300.933	36.923	18.340
LF	La Florida	-33,52	-70,59	352.339	6.289.932	42.454	7.226
LC	Las Condes	-33,38	-70,52	358.613	6.305.553	49.036	22.723
PU	Pudahuel	-33,44	-70,75	337.329	6.298.564	27.616	16.153
PO	Parque O'Higgins	-33,46	-70,66	345.731	6.296.483	35.976	13.907
PA	Puente Alto	-33,59	-70,59	352.458	6.282.170	42.420	-0.537
EB	El Bosque	-33,55	-70,67	344.962	6.286.488	35.010	3.929
TA	Talagante	-33,67	-70,95	319.215	6.272.727	8.996	-9.321
QU	Quilicura	-33,37	-70,75	337.198	6.306.326	27.638	23.917

Fuente: Elaboración propia.

La presentación de resultados comprende gráficos con los ciclos diarios y anuales de las especies NO₂, O₃ troposférico y MP_{2,5} secundario simuladas y observadas, con la finalidad de visualizar la tendencia de las especies y comentar el desempeño del modelo CAMx respecto a las observaciones. Estos gráficos se muestran en Figura 8-40 a Figura 8-45.

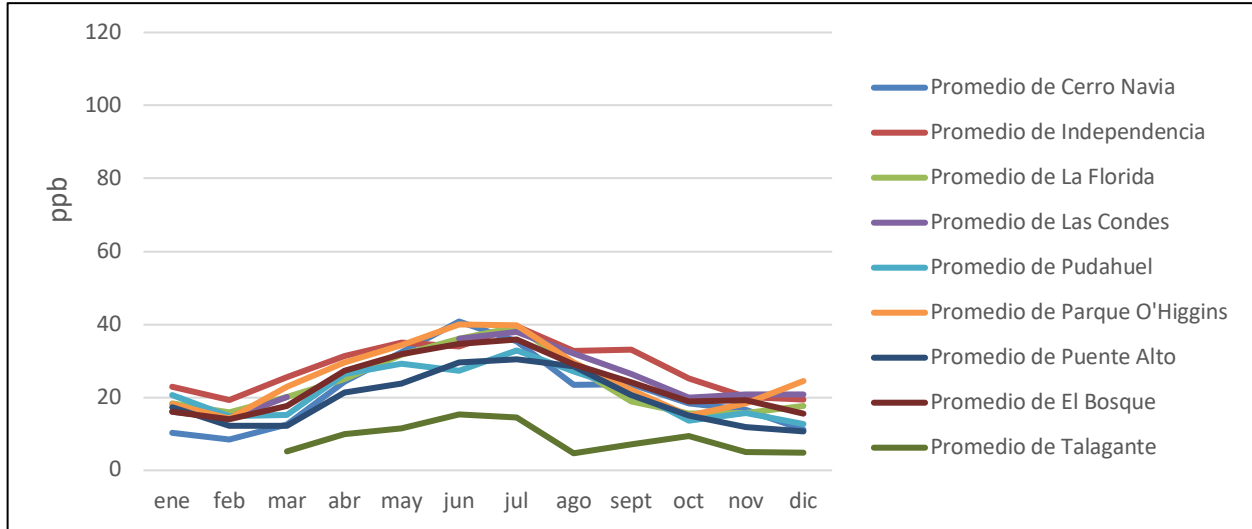
En la Figura 8-40 se visualiza que el modelo logra reproducir un ciclo anual del NO₂, con aumento de las concentraciones del contaminante en el periodo de invierno, acorde a la disminución de la altura de capa límite atmosférica documentado en (Muñoz and Alfafuz, 2012) y menor disponibilidad de luz solar para descomponer el NO₂ a O₃, sin embargo, el modelo sobrestima los niveles de NO₂ aproximadamente en el orden de dos veces comparado con las estaciones de monitoreo de la RM.

Hay varias hipótesis para explicar las posibles causas de la sobrestimación del modelo, desde los factores que afectan la capa límite en la modelación meteorológica, como también los elementos que constituyen las entradas de la modelación fotoquímica como la información de entrada de las emisiones, que son bastante conservadoras y resultan en emisiones altas, entre muchas otras potenciales causas.

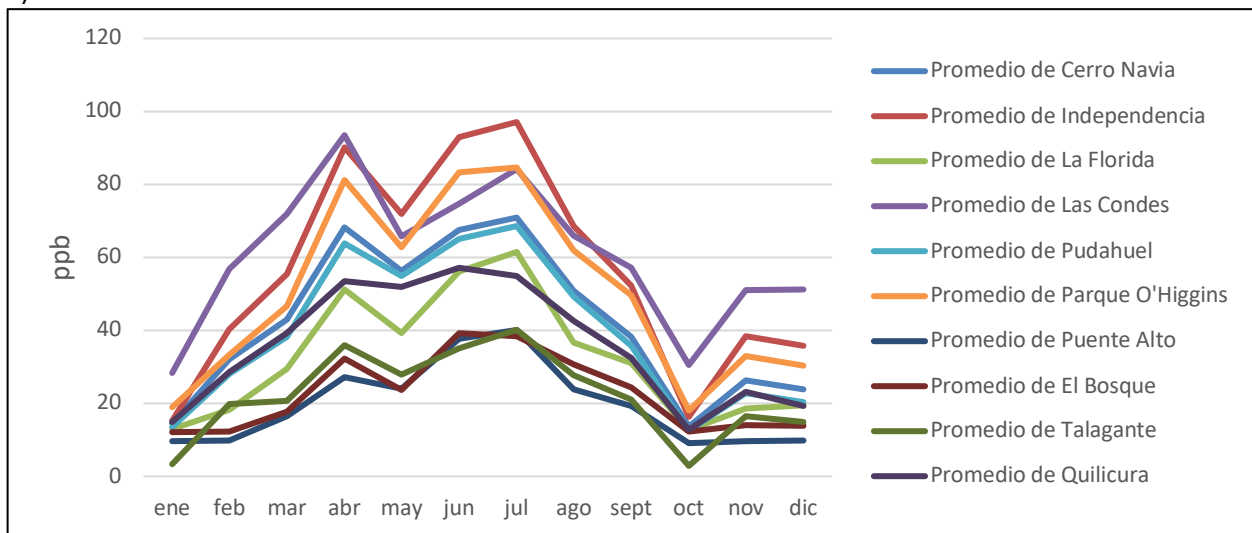
La misma observación se visualiza en el ciclo diario mostrado en la Figura 8-41 respecto a la sobrestimación del modelo, a pesar de que éste es capaz de reproducir el aumento del NO₂ en las mañanas asociado al ciclo de actividad del transporte vehicular y además por una capa límite que complementa con una capa residual de las emisiones del día anterior (Muñoz and Alfafuz, 2012).

Figura 8-40: Ciclo anual de promedios mensuales especie NO₂ Observado y Modelado año 2017.

a) Observado



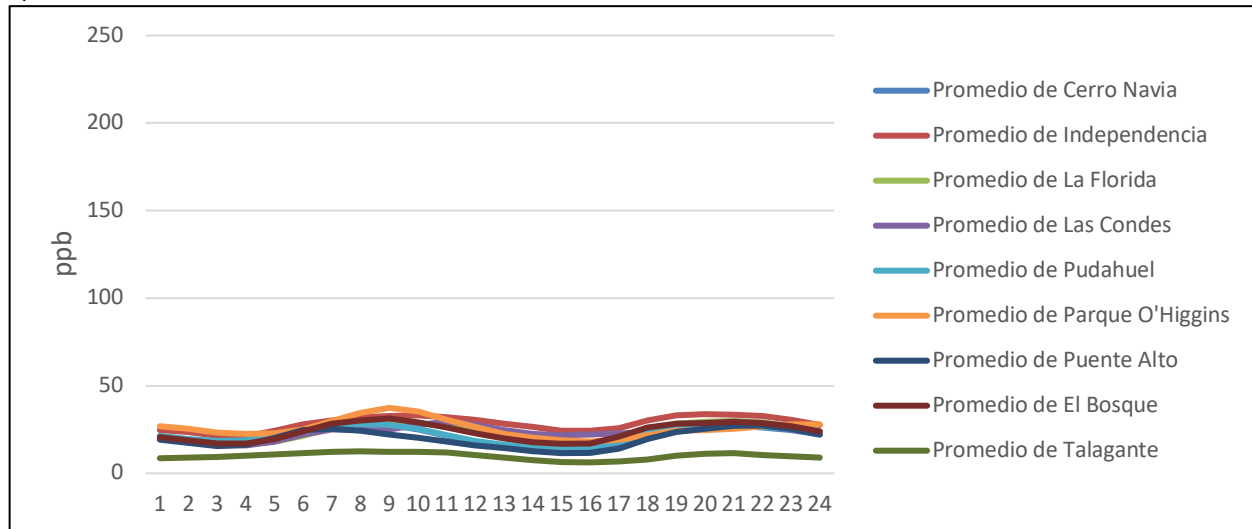
b) Modelado



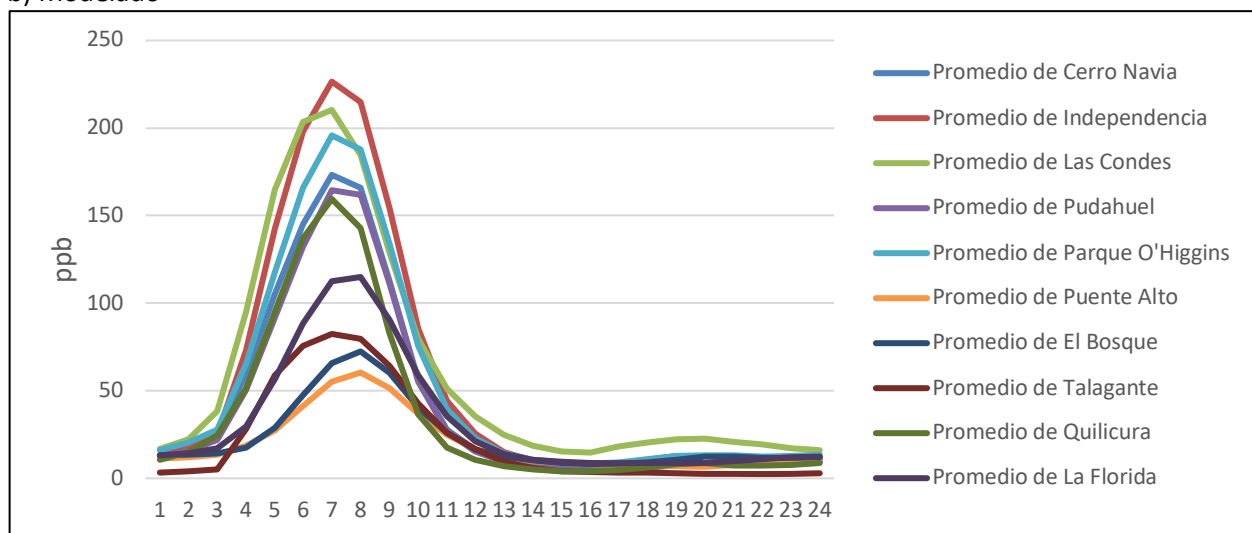
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-41: Ciclo diario especie NO₂ Observado y Modelado año 2017.

a) Observado



b) Modelado



Fuente: Elaboración propia.

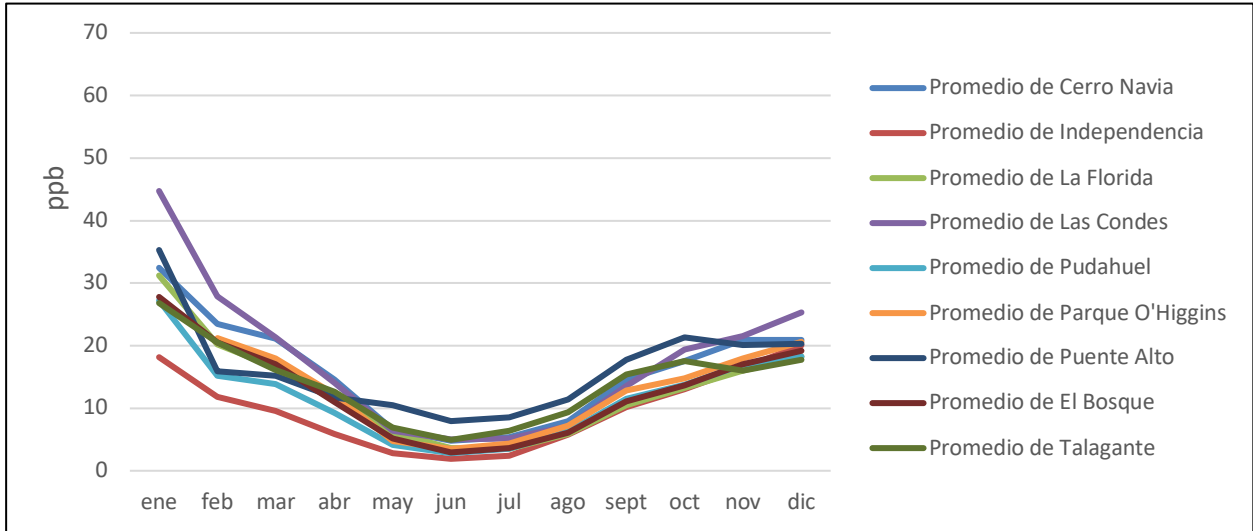
La Figura 8-42 y Figura 8-43 muestran el ciclo anual y diario respectivamente del O₃ troposférico el cual a diferencia de la especie NO₂ no sobrestima tanto las observaciones, manteniéndose las concentraciones en diferencias promedio de las decenas en unidades ppb entre cada estación.

Los ciclos son bien reproducidos por el modelo, logrando capturar la disminución de las concentraciones en invierno y las alzas en verano en el ciclo anual. Respecto al ciclo diario, a medida que comienza el sol a entregar mayor energía de longitud de onda corta sobre la Tierra, las concentraciones de ozono aumentan conforme pasan las horas del día, para luego disminuir a partir

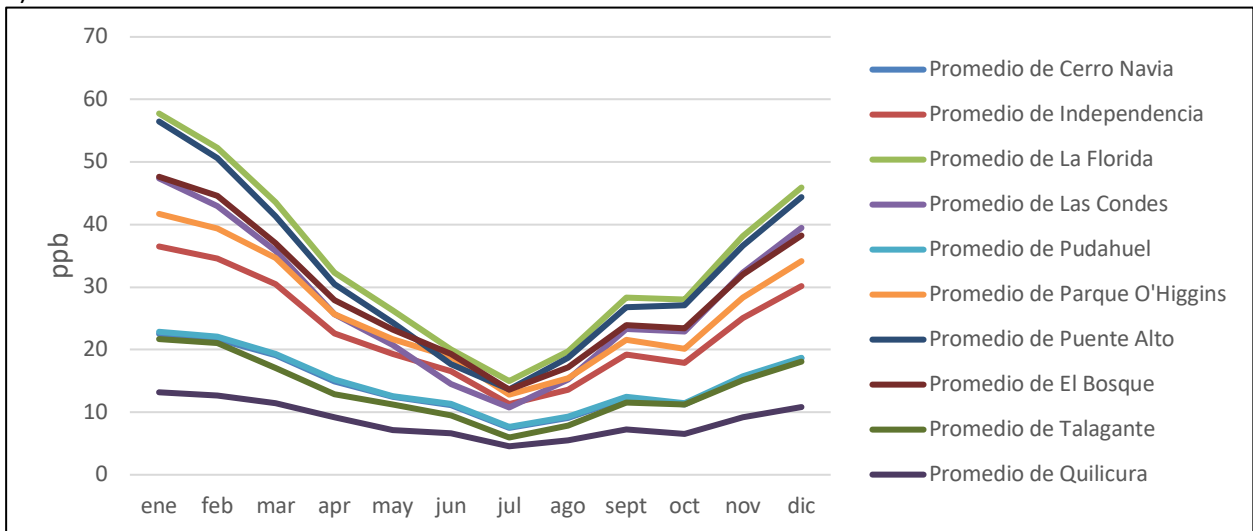
de la transición vespertina. Se observa un aumento posterior lo que claramente es un sesgo del modelo.

Figura 8-42: Ciclo anual de promedios mensuales especie O₃ Observado y Modelado año 2017.

a) Observado



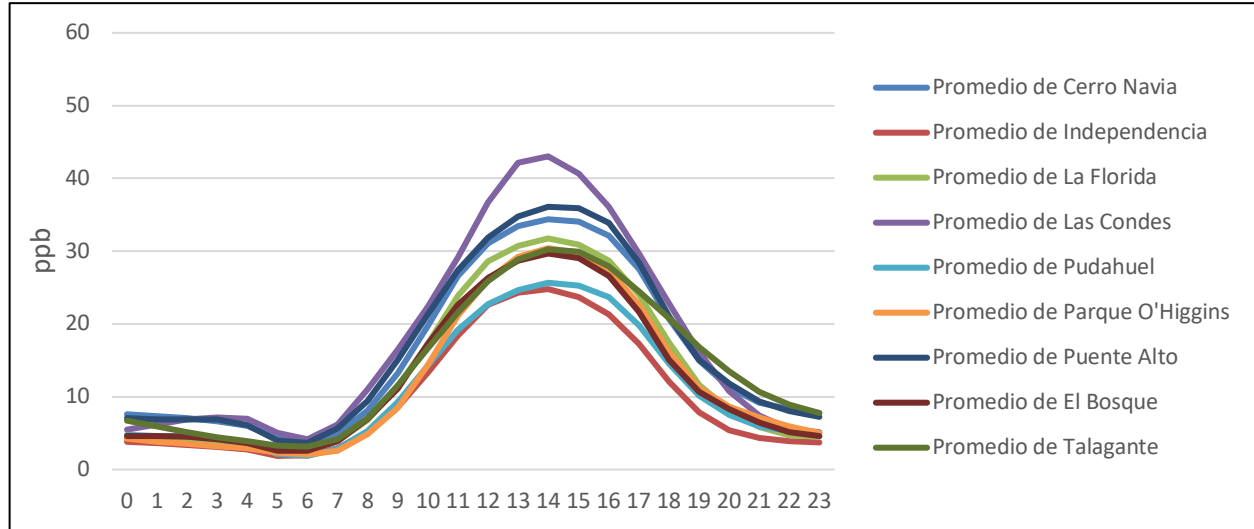
b) Modelado



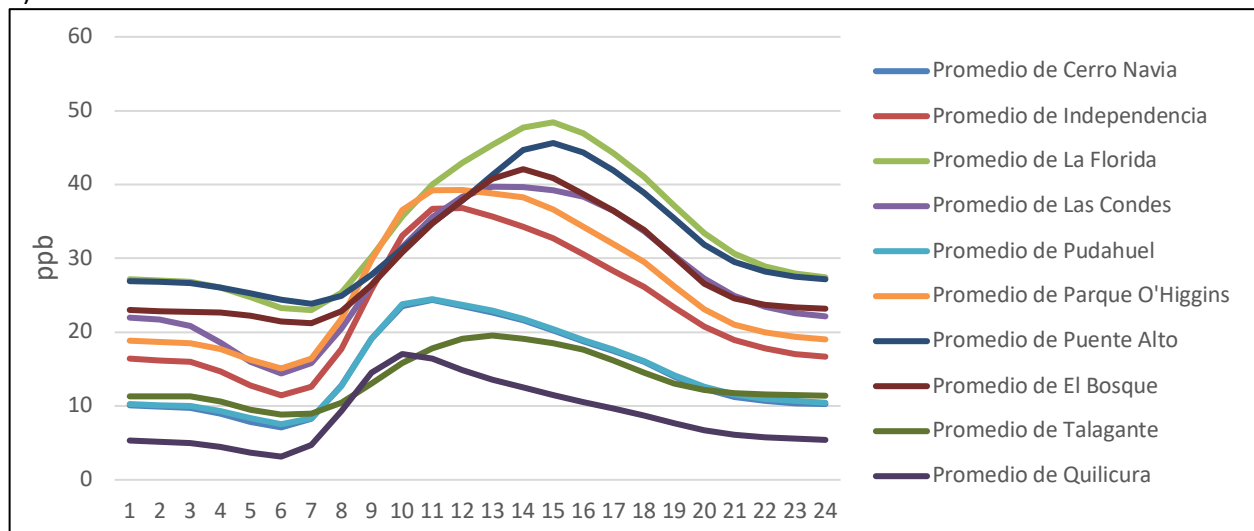
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-43: Ciclo diario especie O₃ Observado y Modelado.

a) Observado



b) Modelado



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8-44 y Figura 8-45 muestran las comparaciones de los ciclos anual y diario de MP_{2,5} secundario, donde se observa que el modelo CAMx subestima las concentraciones de este contaminante respecto a las concentraciones observadas en la RM, considerando que se estima que la fracción secundaria del MP_{2,5} representa entre un 40 y 80% en las distintas las estaciones monitoras de la zona y dependiendo de la época del año (invierno y verano)⁸⁶. Es importante tener presente que la modelación con CAMx en este estudio sólo considera la parte secundaria del MP_{2,5},

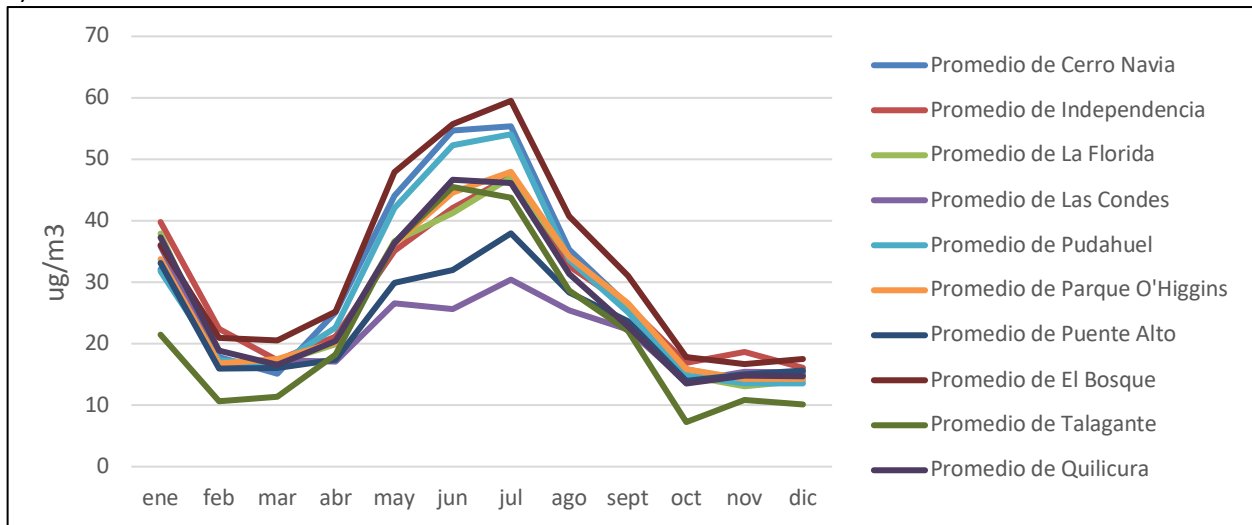
⁸⁶ Menares et al, 2020. Increasing trends (2001–2018) in photochemical activity and secondary aerosols in Santiago, Chile. Tellus B: 2020, 0, 1821512, <https://doi.org/10.1080/16000889.2020.1821512>

y por lo tanto no refleja la parte primaria también originada en fuentes de transporte, industria y emisiones residenciales.

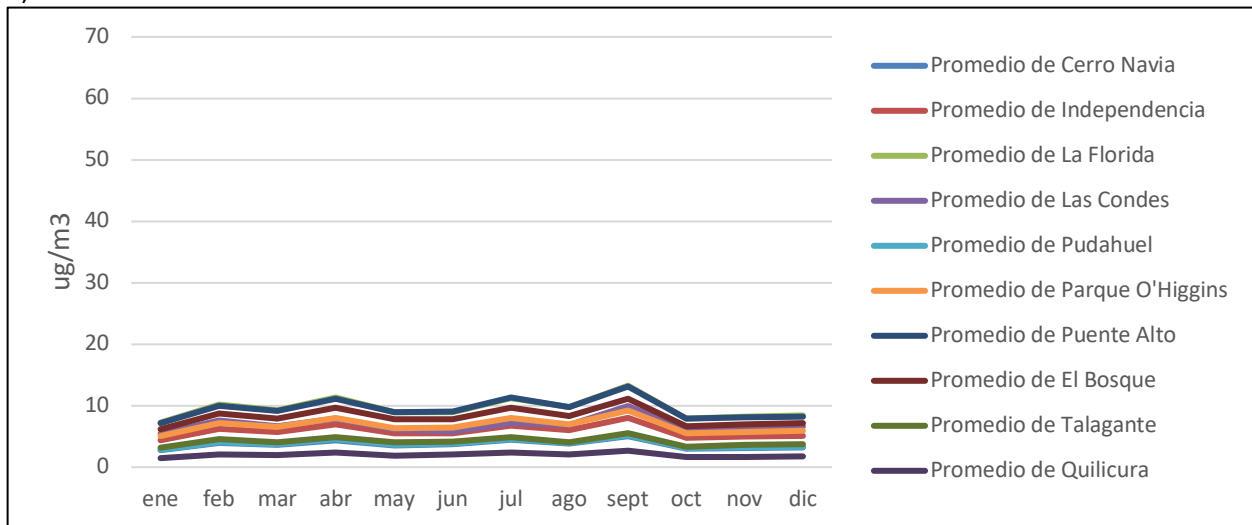
Destaca la relación entre el NO₂ como el precursor y MP_{2,5} secundario, esto visualizado en los ciclos de la primera especie mostrados de las Figura 8-40, Figura 8-41 y del MP_{2,5} en Figura 8-44 y Figura 8-45. El ciclo diario del NO₂, muestra un máximo en todas las estaciones que alcanza a 200 ppb cerca del mediodía, y el MP_{2,5} muestra un aumento de forma desfasada a las 15 horas, dando un atisbo del aporte de la primera especie. En el ciclo anual, muestra una correlación en los meses del periodo invernal donde ambas especies muestran altas concentraciones, infiriendo que el NO₂ podría estar cooperando en la formación de MP_{2,5} secundario.

Figura 8-44: Ciclo anual especie MP_{2,5} Observado y Modelado.

a) Observado



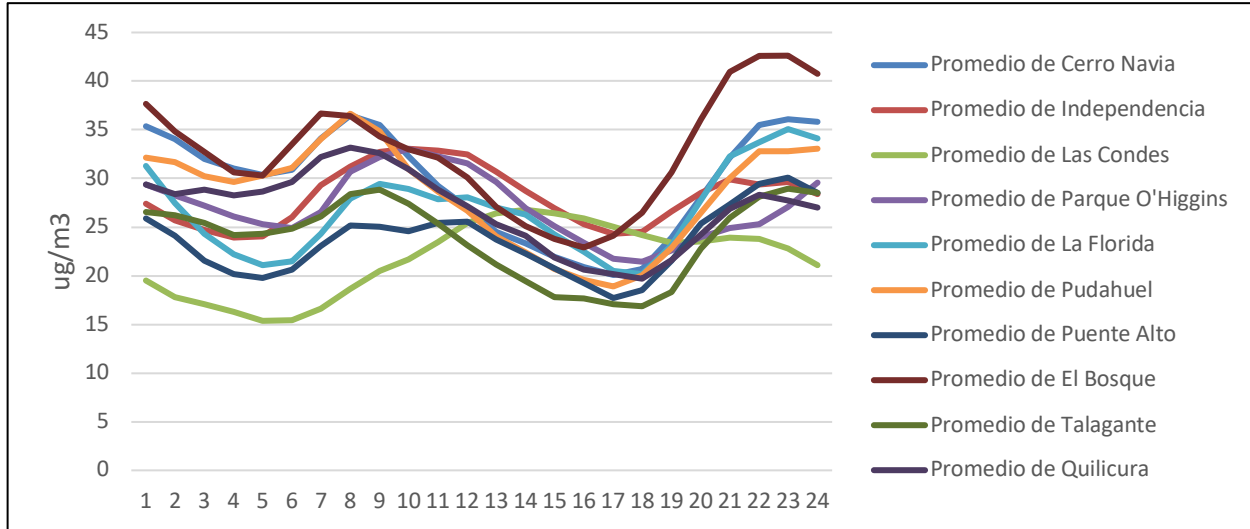
b) Modelado



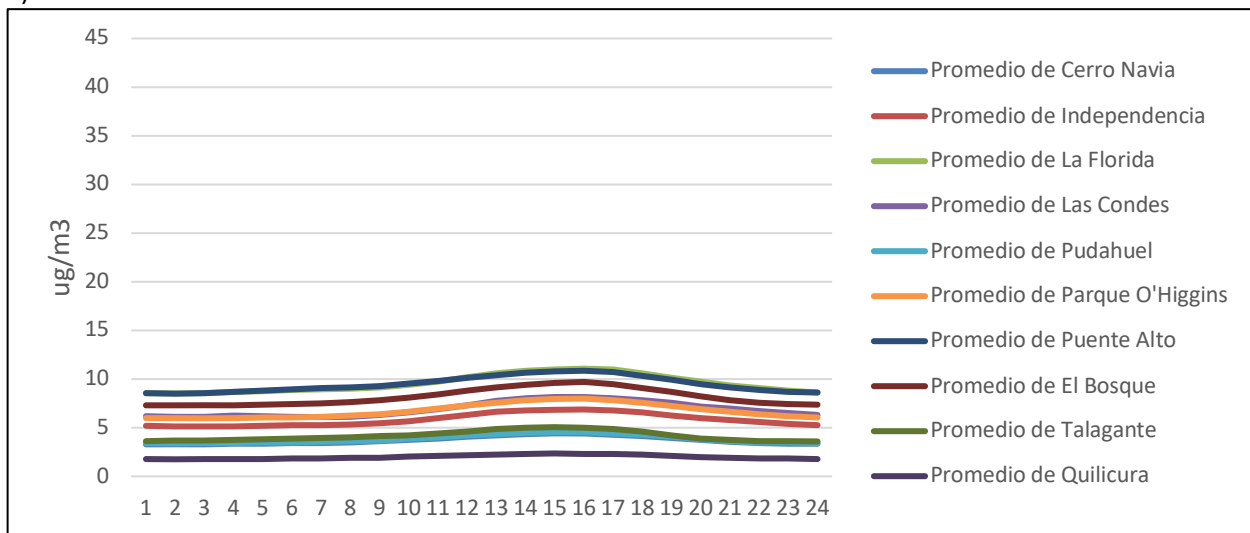
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8-45: Ciclo diario especie MP_{2,5} Observado y Modelado.

a) Observado



b) Modelado



Fuente: Elaboración propia.

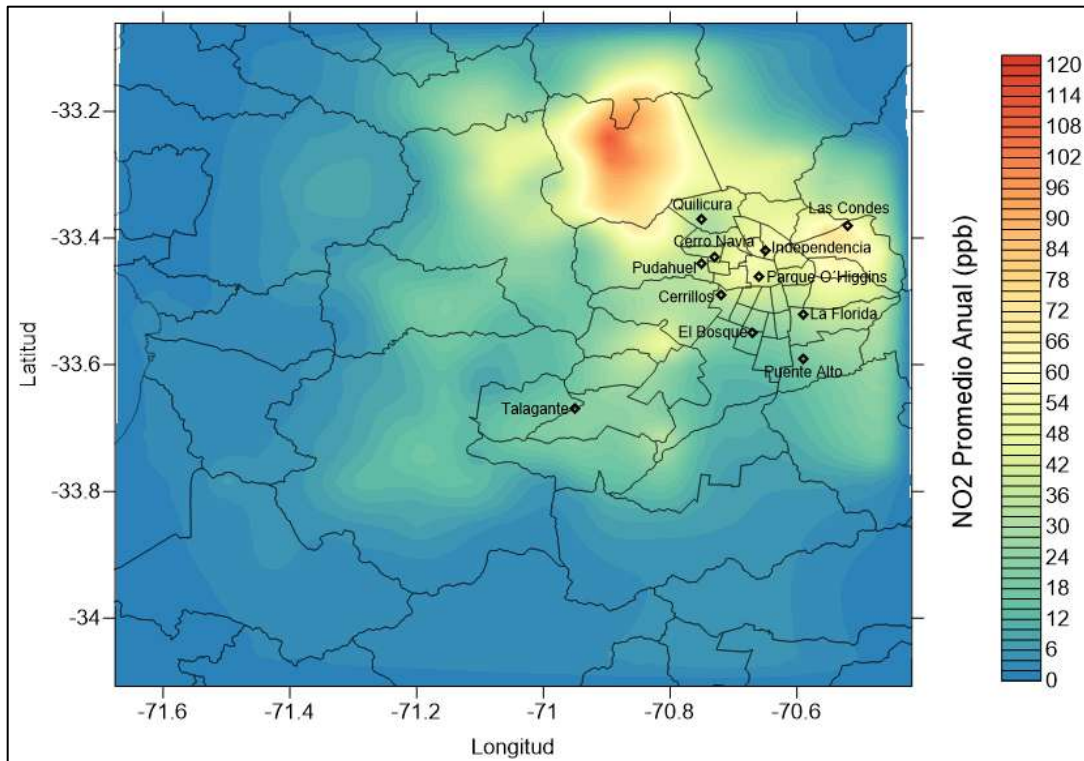
8.3.5.4 Distribución espacial de las concentraciones de NO₂ Y O₃

En el siguiente Capítulo se presentan la distribución espacial de los contaminantes NO₂ y O₃ en la zona de la Región Metropolitana, como isolíneas de concentraciones obtenidas mediante la modelación con CAMx, presentada en sección 8.3.5.

En Figura 8-46 y Figura 8-47 se presentan las isolíneas de concentraciones de NO₂ como promedio anual y máximas horarias. Por otra parte, las isolíneas de concentraciones de O₃ máximos 8 horas se muestran en Figura 8-48.

La Figura 8-46 muestra una gran fuente emisora de NO₂ la cual corresponde a los hornos de la empresa Polpaico (Tabla 8.13) con un promedio anual cercano a los 120 ppb de concentración. Adicionalmente se presentan altas concentraciones, pero menores respecto a la emisión de sector norponiente de la Región Metropolitana, en el centro de la ciudad de Santiago, lo que podría estar asociado a las fuentes móviles existentes en la ciudad.

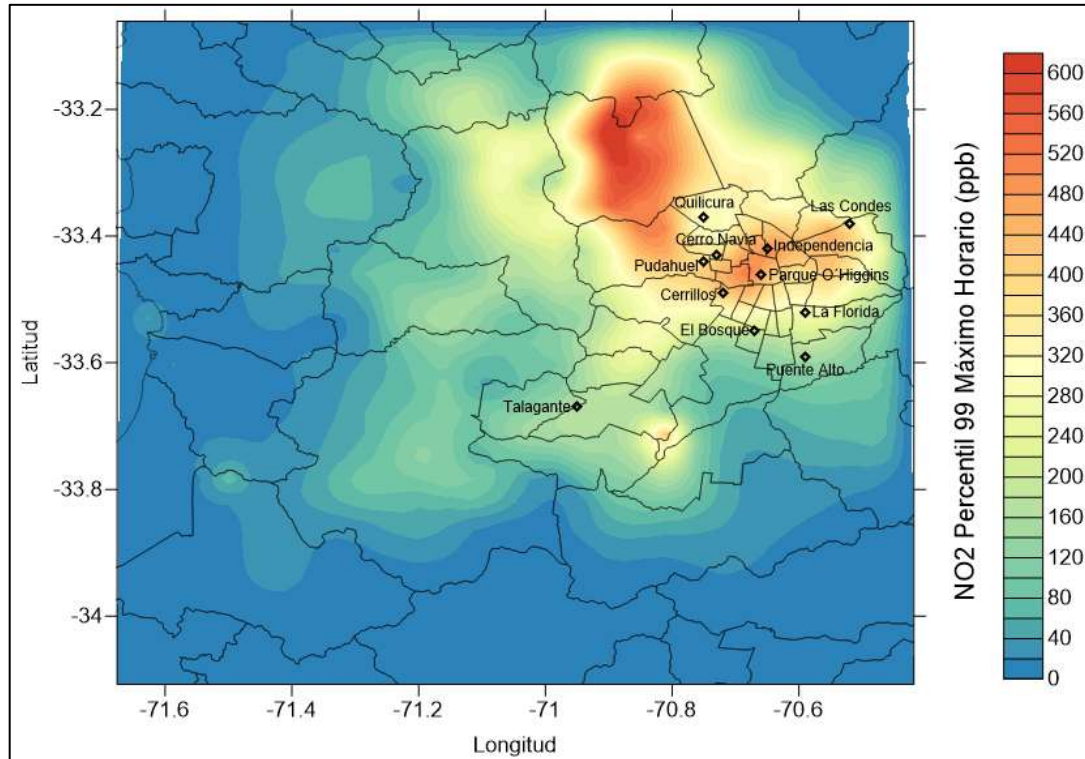
Figura 8-46: Distribución espacial de NO₂ promedio anual simulado con CAMx en la Región Metropolitana, año 2017



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8-47, al igual que en la Figura 8-46, muestra una gran fuente emisora de NO₂ en el sector norponiente de la región con un percentil 99 de 1 hora cercano a los 700 ppb de concentración y adicionalmente en el centro de Santiago. Conforme a medida que se sale del radio urbano de Santiago, el percentil 99 de concentraciones de una hora disminuye a la mitad de la concentración (350 ppb).

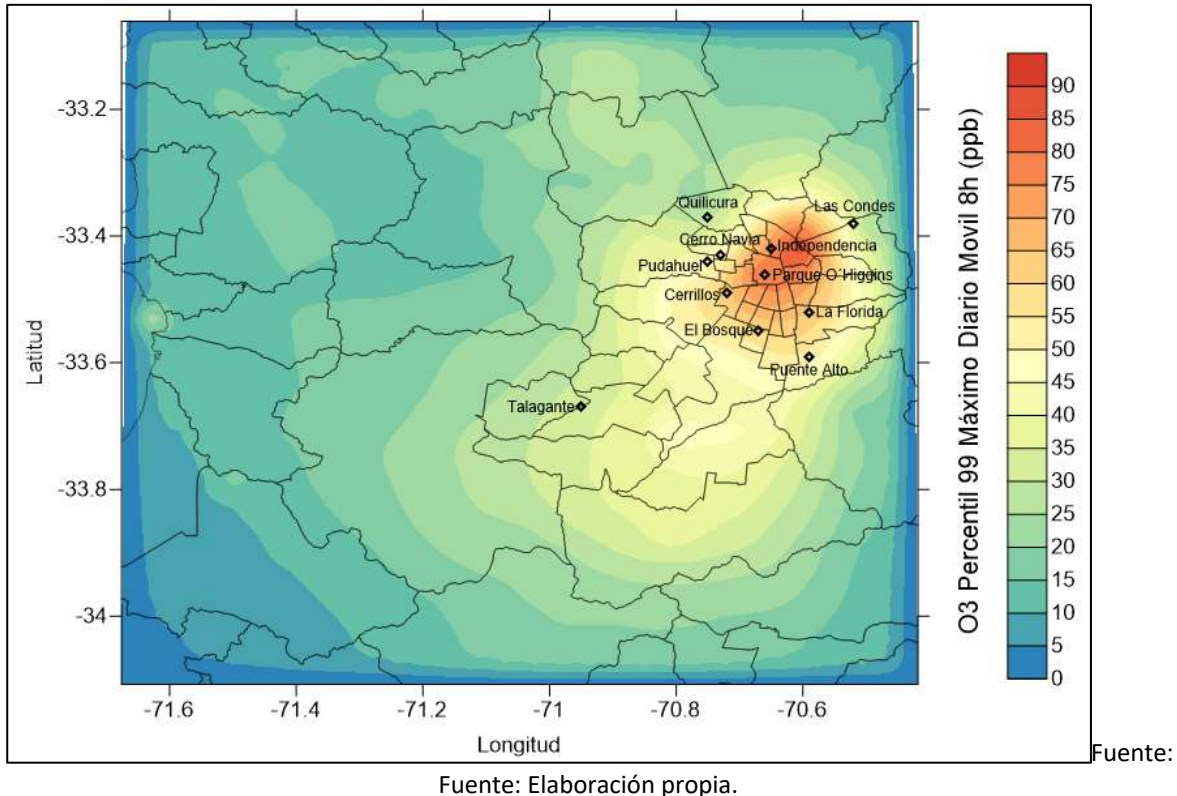
Figura 8-47: Distribución espacial de NO₂ percentil 99 de las concentraciones 1 hora simulado con CAMx en la Región Metropolitana, año 2017



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8-48 muestra que el percentil 99 de las concentraciones de 8 horas de O₃ es mayor hacia la zona centro norte de la RM, alcanzado a 90 ppb. Las concentraciones de O₃ van disminuyendo a medida que nos alejamos del radio urbano de Santiago.

Figura 8-48: Distribución espacial de O_3 percentil 99 de las concentraciones 8 horas simulado con CAMx en la Región Metropolitana, año 2017.



Los patrones de distribución regional modelados para NO_2 y O_3 reflejan en general la información que entregan las estaciones de la RM respecto a la contaminación fotoquímica, esto es, niveles de NO_2 y O_3 mucho mayores en las zonas aguas abajo de las fuentes de precursores y de la circulación atmosférica en la región. Resulta ser un antecedente valioso para considerar en los elementos de política pública para la regulación misma de la norma ambiental de NO_2 y otros instrumentos para limitar las emisiones de NO_x , pero también para medidas de gestión y el conocimiento del grupo de población que está más expuesto.

Es importante señalar que los resultados de la modelación fotoquímica realizada se pueden mejorar para obtener niveles simulados más ajustados a lo que se mide en las estaciones de monitoreo, pero esto requiere de un esfuerzo que excede los tiempos y recursos de ejecución de este estudio. Por otra parte, el sólo ejercicio de la implementación permite relevar elementos importantes a mejorar en la información pública como los inventarios de emisiones, y la ausencia de información detallada de VOC en la cuenca de la RM. En este sentido, refuerzan los elementos a considerar para el diseño de mediciones permanentes o campañas temporales con el fin de caracterizar la atmósfera para mejorar la comprensión de la complejidad de los procesos fotoquímicos en la RM.

9 MODELACIÓN EMPÍRICA

9.1 Aspectos metodológicos

Los casos de las otras zonas contempladas en el estudio son muy distintos al de la Región Metropolitana. El hecho más significativo es que los niveles actuales de NO₂ ambiental están muy por debajo de la norma vigente y también bajo los niveles de referencia OMS. Además, las emisiones proyectadas en el horizonte de 15 años (2032) ya están sujetas a restricciones impuestas en instrumentos como normas de emisión, planes de prevención y descontaminación, y otros instrumentos de política pública, como la descarbonización de la matriz eléctrica. Todo lo anterior da como resultado que las emisiones se mantendrán o estarán por debajo de los niveles actuales, y particularmente en la comuna de Puchuncaví y Gran Concepción, habrá significativas reducciones dado el retiro de unidades de generación termoeléctrica a carbón.

Dado lo anterior, resulta adecuada la aplicación de un enfoque empírico relacionando los inventarios elaborados para las emisiones de NO_x del escenario 2017 y las proyecciones respectivas, con las concentraciones ambientales observadas de NO₂, O₃ y MP_{2.5}.

La estimación del factor que relaciona las emisiones de NO_x con las concentraciones ambientales de NO₂ (FEC), asume que existe una proporcionalidad entre el valor agregado de emisiones totales anuales de NO_x con el promedio anual observado de NO₂.

Promedio anual de NO₂ \propto Emisiones NO_x

Es decir,

$$\text{FEC (NO}_2\text{)} = \text{Promedio anual de NO}_2 / \text{Emisiones anuales NO}_x$$

El nivel agregado anual simplifica los ciclos diarios y la variación de la actividad fotoquímica a lo largo del año, pero conserva el vínculo causal de los precursores en la contaminación fotoquímica. Por otra parte, es adecuado para los requerimientos de un análisis regulatorio.

Para proyectar valores ambientales de periodos más cortos se utilizan regresiones para de la dispersión entre los promedios anuales de NO₂ y los estadígrafos que representan periodos de exposición aguda: percentil 99 y máximos de valores horarios para NO₂, máximo anual del promedio de 8hr de O₃, promedio anual y máximo anual de promedio diario de MP_{2.5}.

En términos teóricos, la capacidad oxidativa de la atmósfera se refleja en la disponibilidad de la suma de NO₂ y O₃, por otra parte también es importante el balance de la disponibilidad de VOC y NO₂, expresado como la razón VOC/NO₂. Estas características son particulares y absolutamente específicas de cada lugar. Por ello, la construcción de regresiones en función de la disponibilidad de NO₂, en términos simplificados refleja la característica “fotoquímica” de cada lugar. Como se ha señalado en otros pasajes, hay evidencia empírica de que en mayor presencia de VOC el ozono se forma a partir de la oxidación de los VOC y no preferentemente partir de la fotólisis del NO₂, esto se observa en los niveles más altos de ozono en Las Condes durante los fines de semana, aun con niveles de NO₂ menores respecto a los días de semana. Por lo que una política de reducción exclusiva

de emisiones de NO_x puede incluso tener efectos adversos en la mayor generación de ozono, condiciones exacerbadas en los meses de verano que dan lugar a días de altas temperaturas.

En las secciones siguientes se presenta el desarrollo y resultado de las relaciones empíricas para las zonas de estudio.

9.2 Zona 1. Calama

Figura 9-1: Dispersión entre promedio anual de NO₂ y percentil 99 de NO₂, periodo 2013-2019, valores en µg/m³.

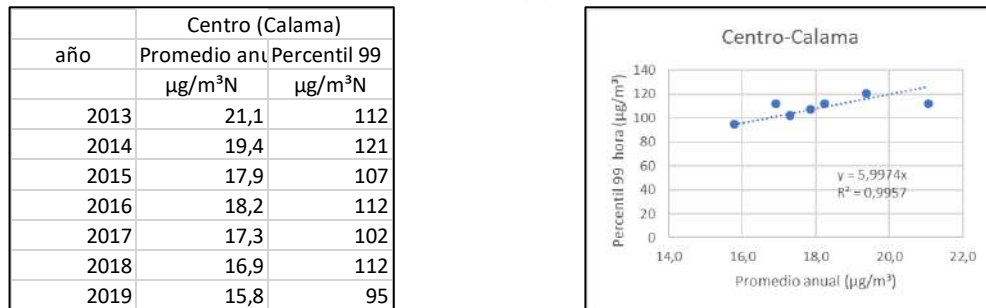
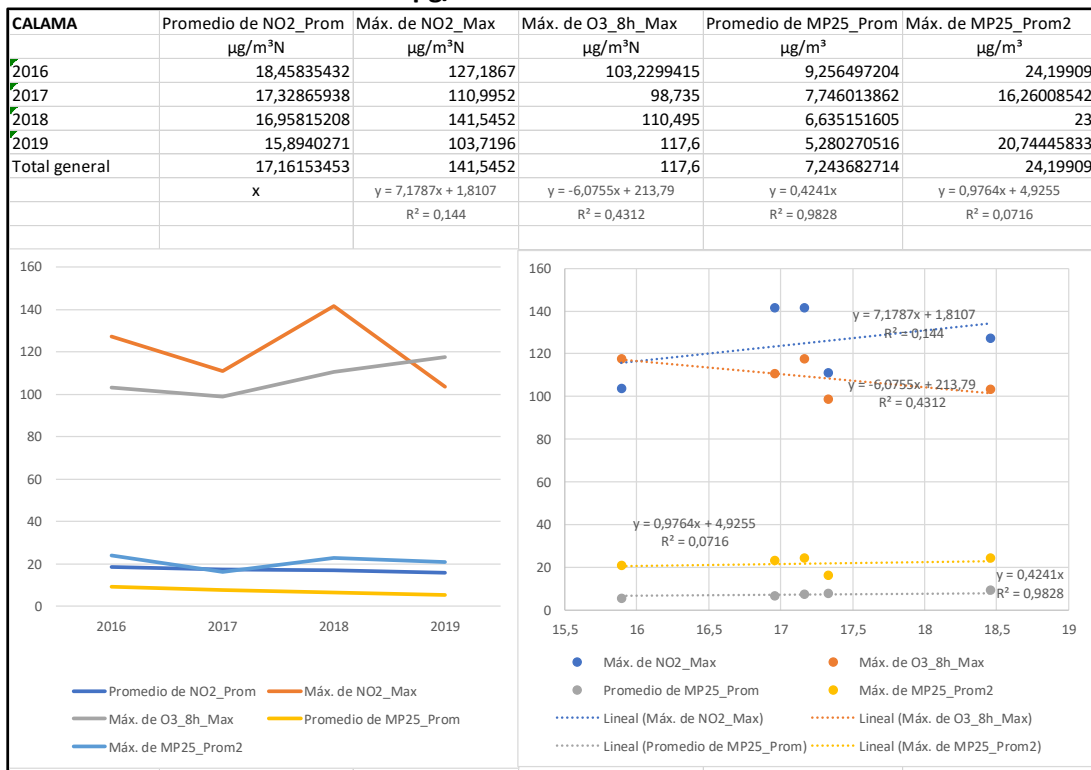
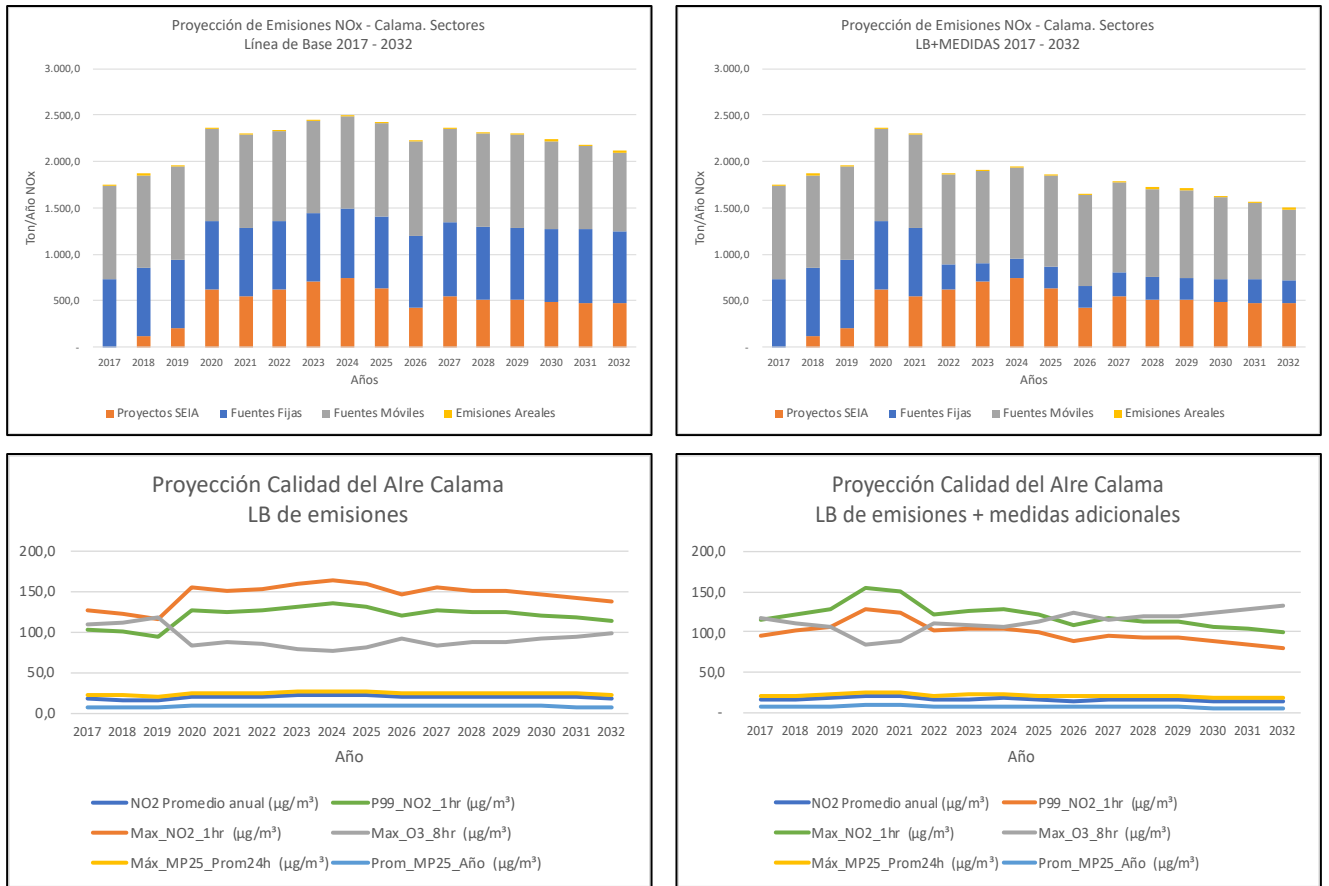


Figura 9-2: Dispersión entre promedio anual de NO₂, máximo horario anual de NO₂, máximo anual O₃ 8hr, promedio anual MP_{2.5} y máximo diario anual MP_{2.5}, periodo 2016-2019, valores en µg/m³. Zona 1. Calama



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9-3: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 1. Calama

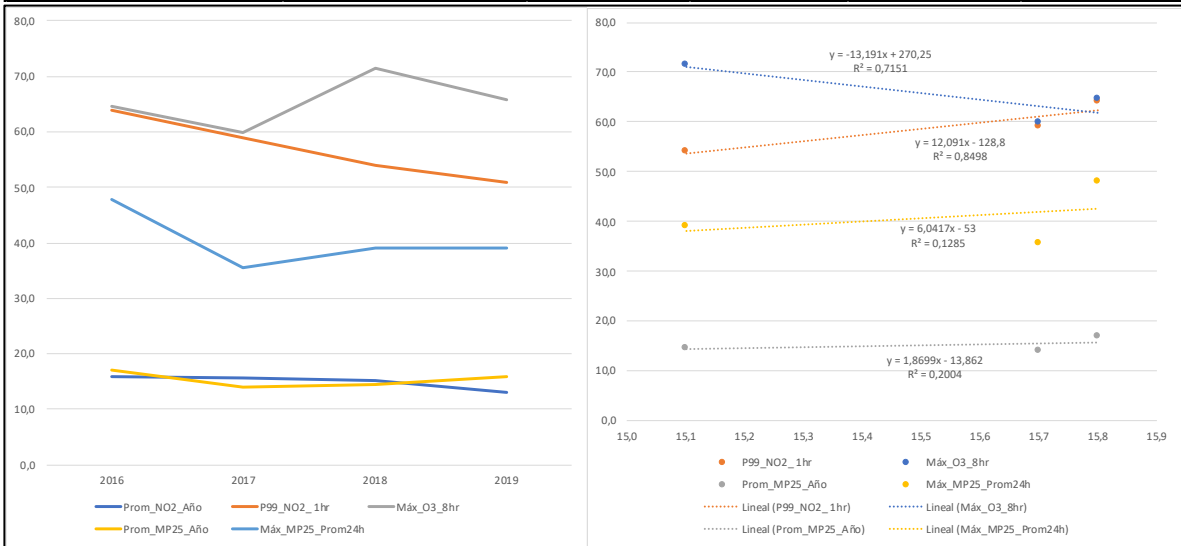


Fuente: Elaboración propia.

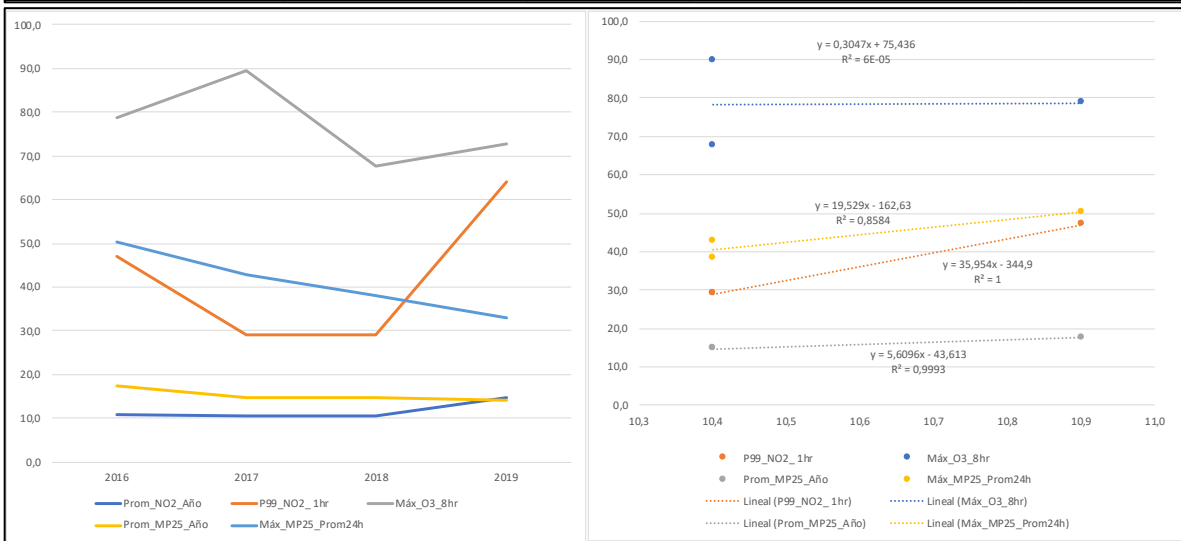
9.3 Zona 2. Concón – Quintero – Puchuncaví

Figura 9-4: Dispersión entre promedio anual de NO₂, máximo horario anual de NO₂, máximo anual O₃ 8hr, promedio anual MP_{2.5} y máximo diario anual MP_{2.5}, periodo 2016-2019, valores en µg/m³. Zona 2. Concon – Quintero - Puchuncaví

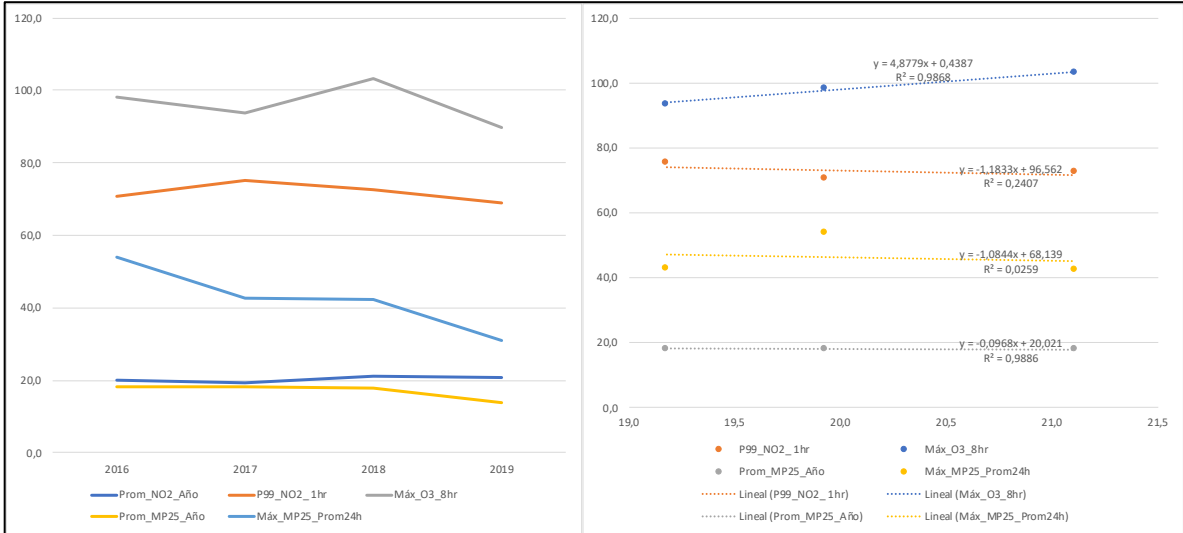
	VENTANAS	2016	2017	2018	2019
NO ₂ (µg/m ³)	Prom_NO2_Año	15,8	15,7	15,1	13,1
	P99_NO2_1hr	64,0	59,0	54,1	50,8
O ₃ (µg/m ³)	Máx_O3_8hr	64,7	59,8	71,5	65,7
	Prom_MP25_Año	17	14	15	16
MP25 (µg/m ³)	Máx_MP25_Prom24h	48	35	39	39



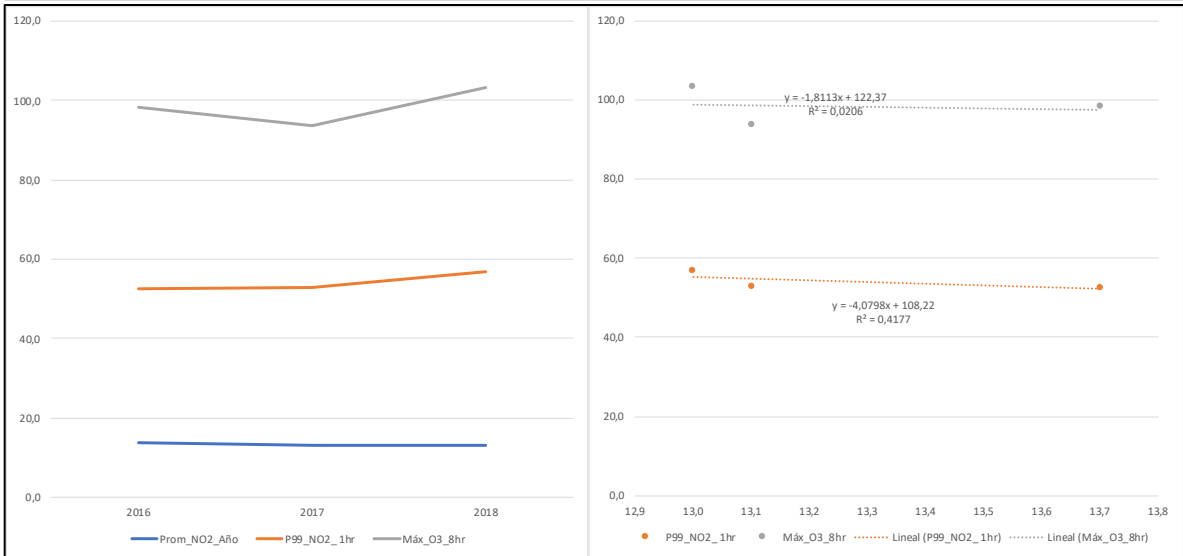
	PUCHUNCAVI	2016	2017	2018	2019
NO ₂ (µg/m ³)	Prom_NO2_Año	10,9	10,4	10,4	14,8
	P99_NO2_1hr	47,0	29,0	29,0	64,1
O ₃ (µg/m ³)	Máx_O3_8hr	78,8	89,6	67,6	72,8
	Prom_MP25_Año	18	15	15	14
MP25 (µg/m ³)	Máx_MP25_Prom24h	50	43	38	33



CONCON		2016	2017	2018	2019
NO ₂ (µg/m ³)	Prom NO ₂ Año	19,9	19,2	21,1	20,7
	P99 NO ₂ 1hr	70,6	75,3	72,5	69,1
O ₃ (µg/m ³)	Máx O ₃ 8hr	98,3	93,6	103,1	89,7
	Prom MP25 Año	18	18	18	14
MP25 (µg/m ³)	Máx MP25 Prom24h	54	43	42	31

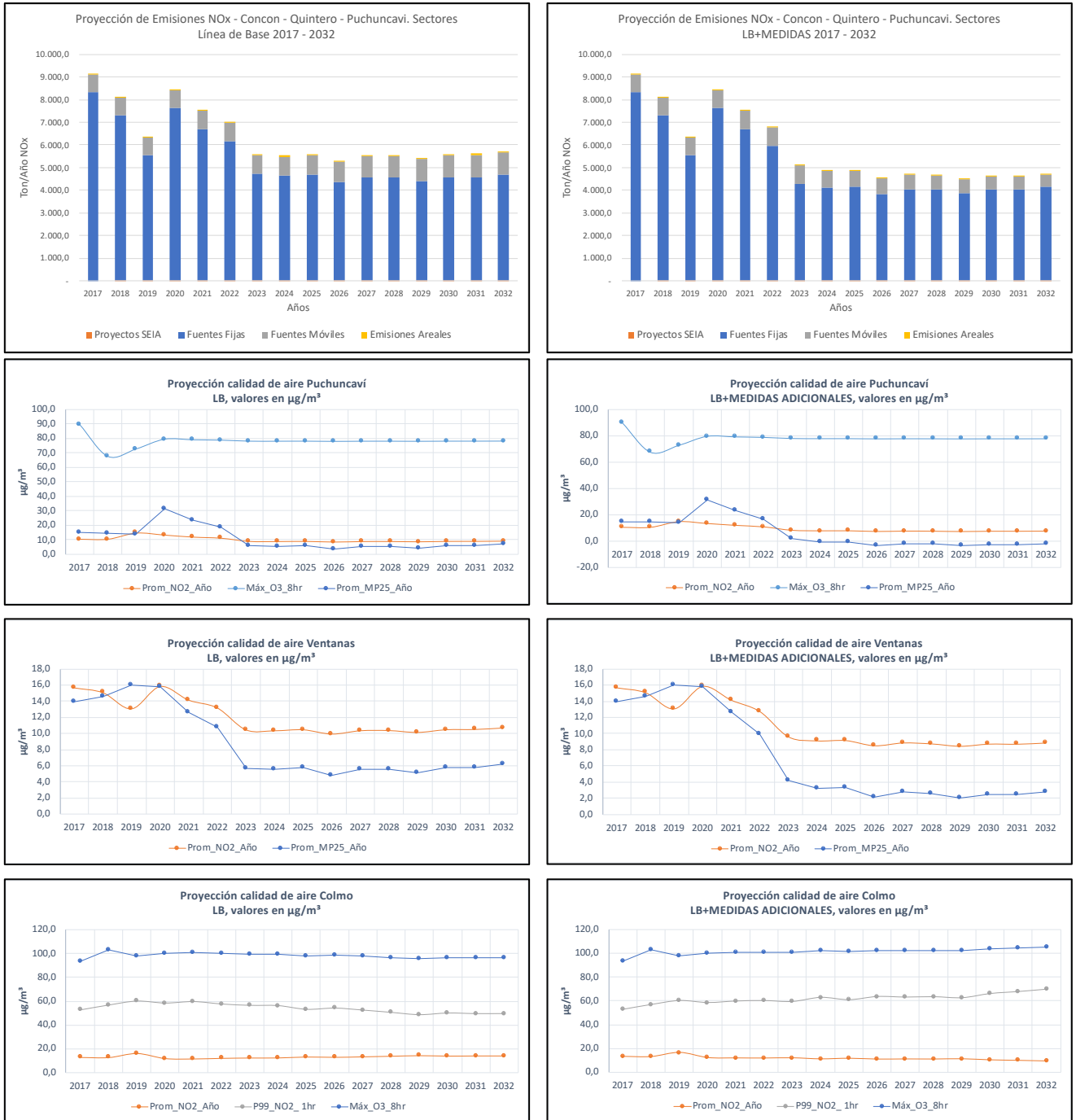


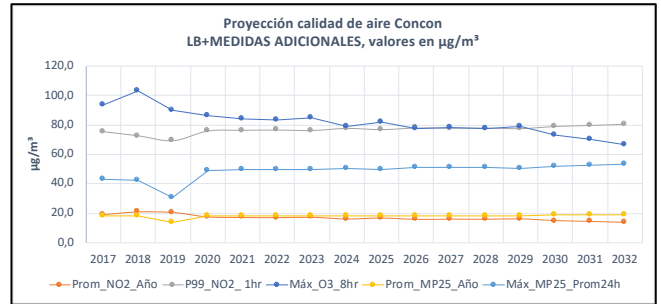
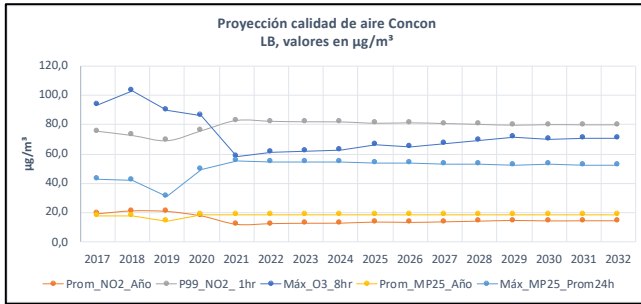
COLMO		2016	2017	2018	2019
NO ₂ (µg/m ³)	Prom NO ₂ Año	13,7	13,1	13,0	16,3
	P99 NO ₂ 1hr	52,6	52,8	56,9	60,1
O ₃ (µg/m ³)	Máx O ₃ 8hr	98,3	93,6	103,1	97,8
	Prom MP25 Año	ND	ND	ND	ND
MP25 (µg/m ³)	Máx MP25 Prom24h	ND	ND	ND	ND



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9-5: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 2. Concón – Quintero – Puchuncaví



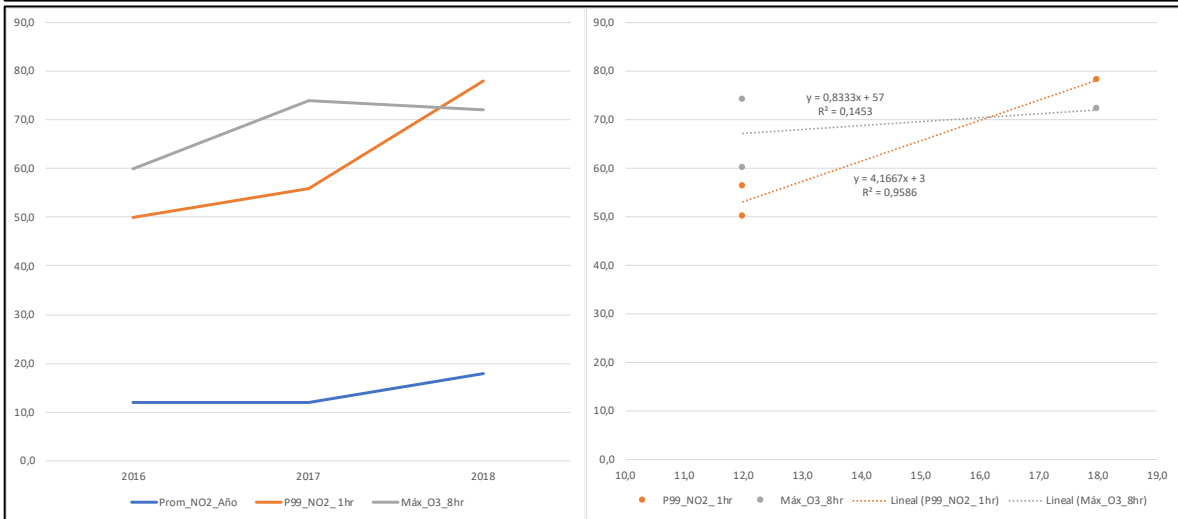


Fuente: Elaboración propia.

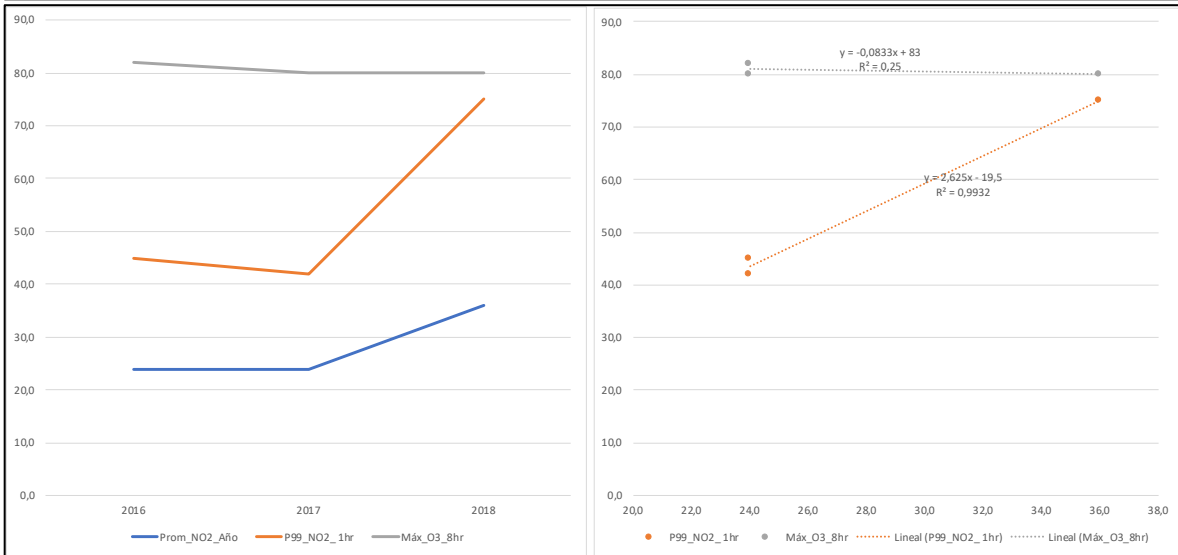
9.4 Zona 3. Valparaíso Interior

Figura 9-6: Dispersión entre promedio anual de NO₂, máximo horario anual de NO₂, máximo anual O₃ 8hr, promedio anual MP_{2.5} y máximo diario anual MP_{2.5}, periodo 2016-2019, valores en µg/m³. Zona 3. Valparaíso Interior

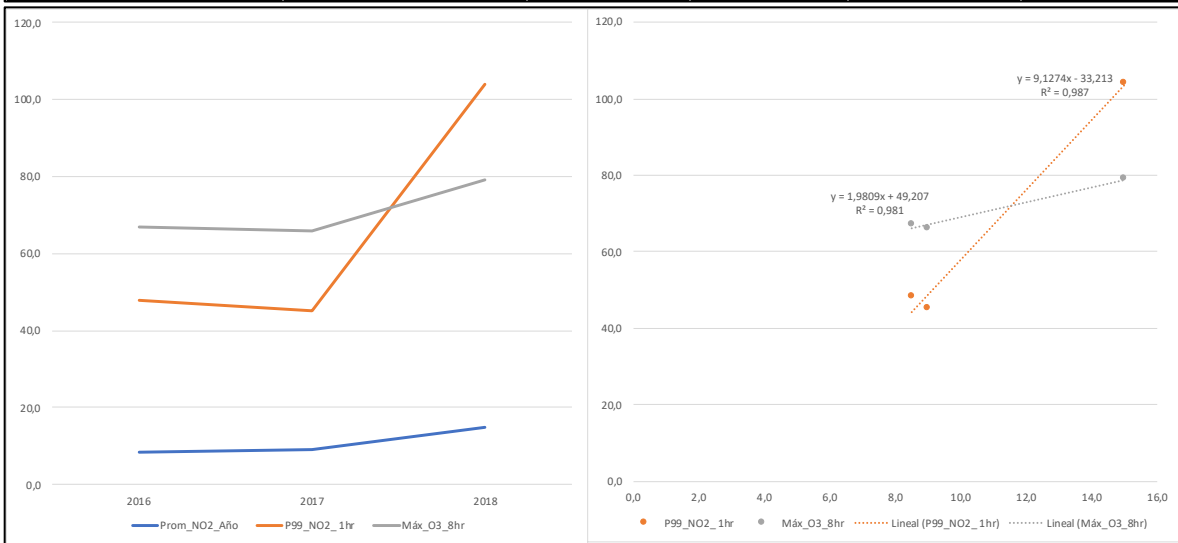
	LA CALERA	2016	2017	2018	2019
NO ₂ (µg/m³)	Prom_NO2_Año	12,0	12,0	18,0	ND
	P99_NO2_1hr	50,0	56,0	78,0	ND
O ₃ (µg/m³)	Máx_O3_8hr	60,0	74,0	72,0	ND
MP ₂₅ (µg/m³)	Prom_MP25_Año	ND	ND	ND	ND
	Máx_MP25_Prom24h	ND	ND	ND	ND



	LA CRUZ	2016	2017	2018	2019
NO ₂ (µg/m ³)	Prom NO ₂ Año	24,0	24,0	36,0	ND
	P99 NO ₂ 1hr	45,0	42,0	75,0	ND
O ₃ (µg/m ³)	Máx O ₃ 8hr	82,0	80,0	80,0	ND
MP25 (µg/m ³)	Prom MP25 Año	ND	ND	ND	ND
	Máx MP25 Prom24h	ND	ND	ND	ND

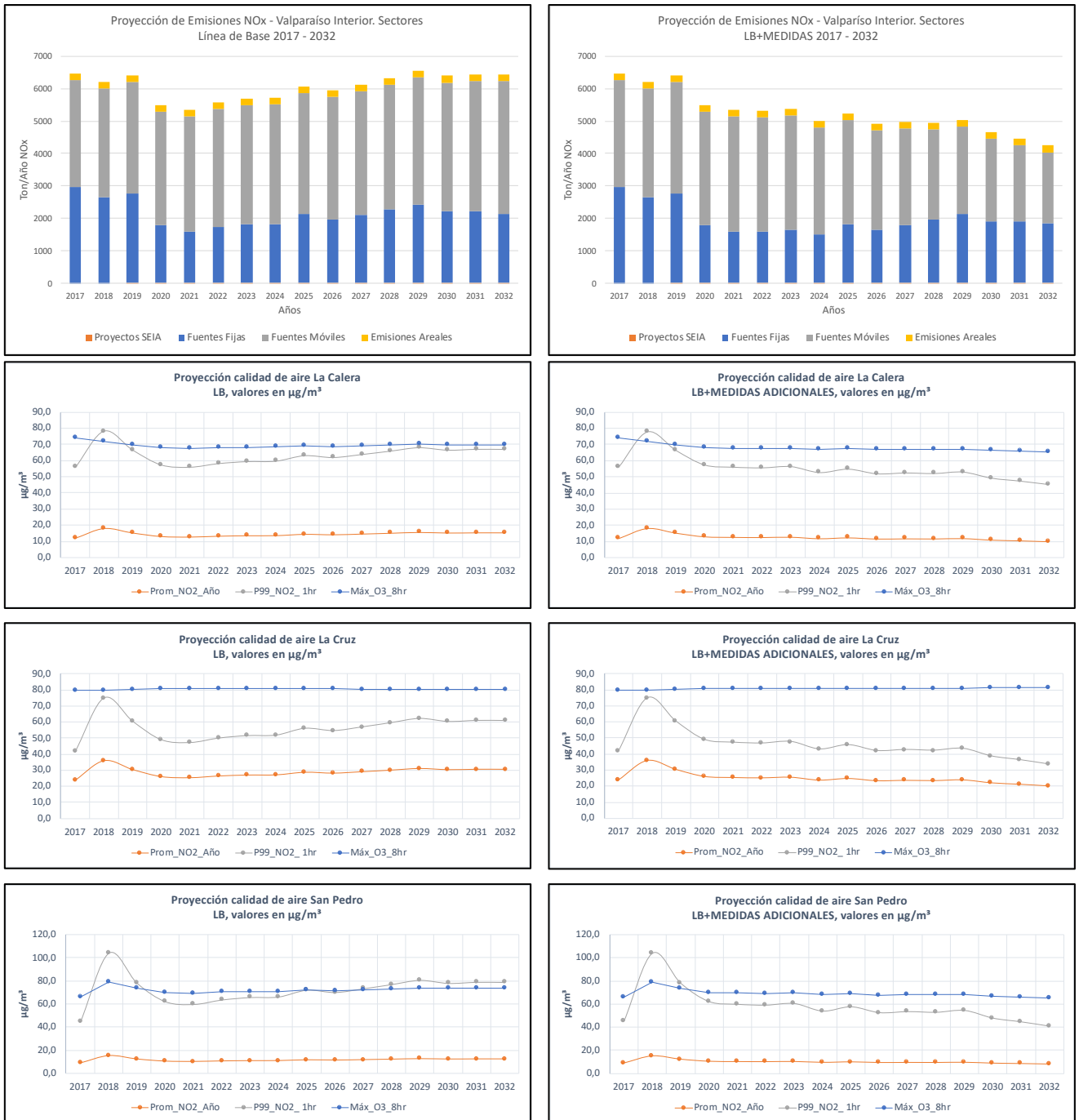


	SAN PEDRO	2016	2017	2018	2019
NO ₂ (µg/m ³)	Prom NO ₂ Año	8,5	9,0	15,0	ND
	P99 NO ₂ 1hr	48,0	45,0	104,0	ND
O ₃ (µg/m ³)	Máx O ₃ 8hr	67,0	66,0	79,0	ND
MP25 (µg/m ³)	Prom MP25 Año	ND	ND	ND	ND
	Máx MP25 Prom24h	ND	ND	ND	ND



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9-7: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 3. Valparaíso Interior

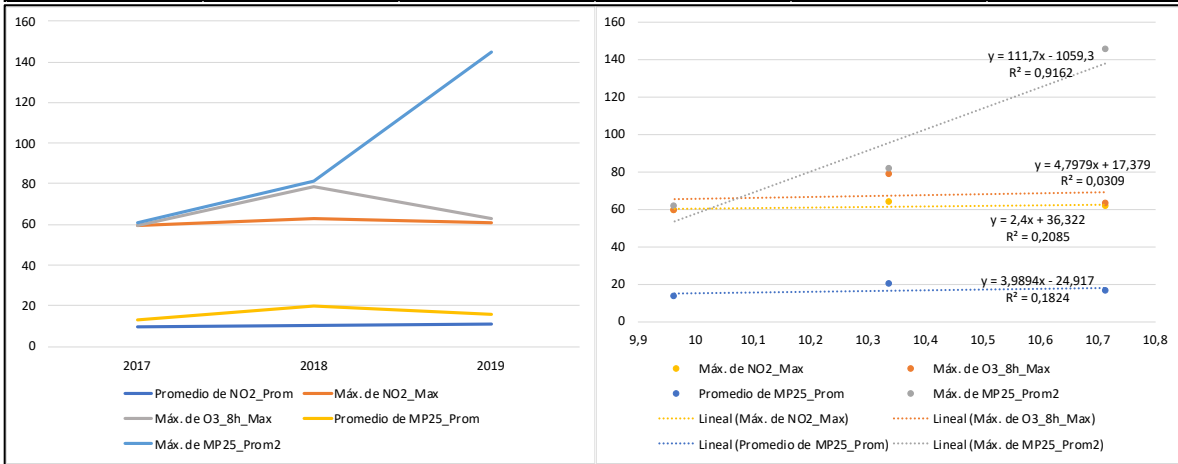


Fuente: Elaboración propia.

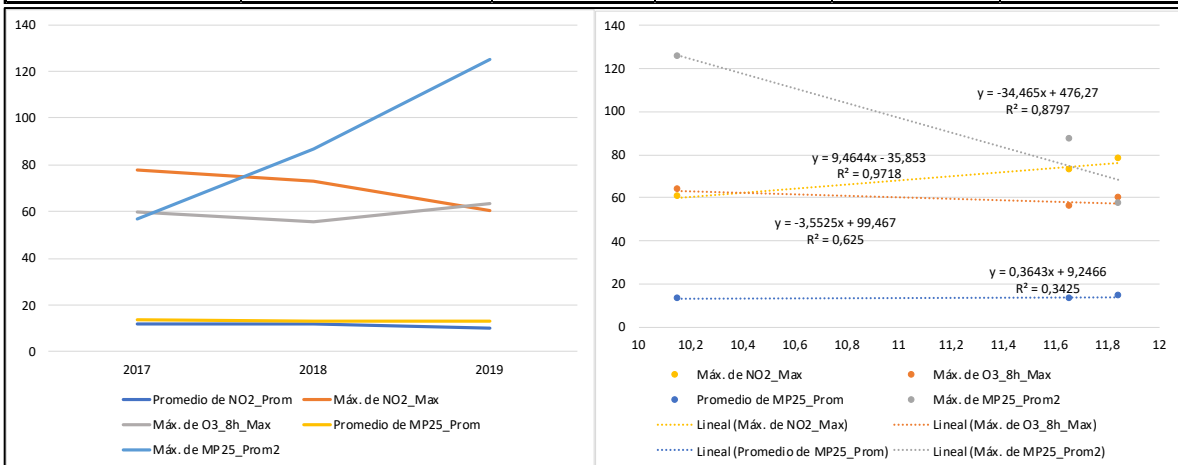
9.5 Zona 4. Concepción Metropolitan

Figura 9-8: Dispersión entre promedio anual de NO₂ , máximo horario anual de NO₂, máximo anual O₃ 8hr, promedio anual MP_{2.5} y máximo diario anual MP_{2.5}, periodo 2016-2019, valores en µg/m³. Zona 4. Concepción Metropolitan

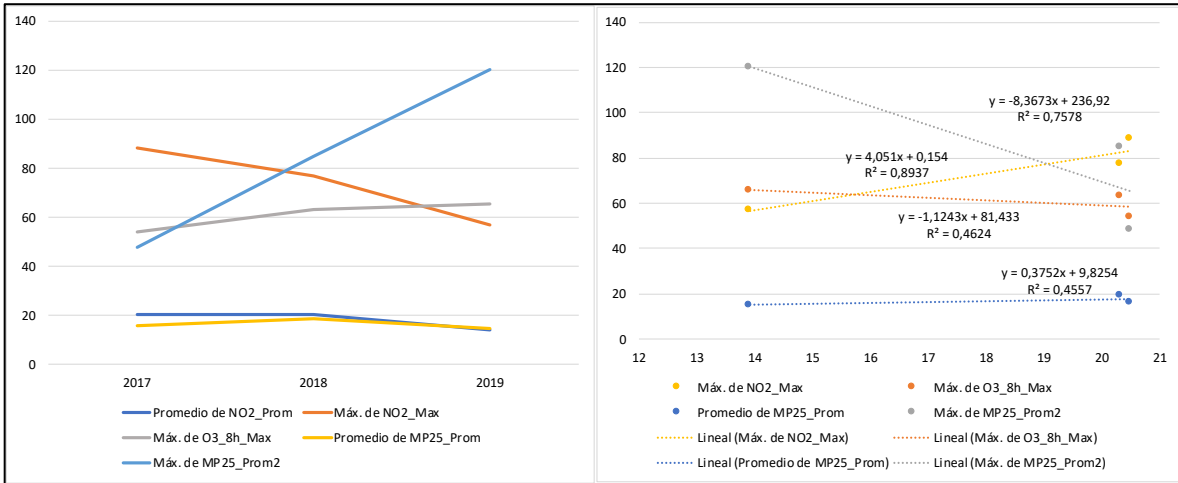
TALCAHUANO	Promedio de NO ₂ _Prom µg/m ³ N	Máx. de NO ₂ _Max µg/m ³ N	Máx. de O ₃ _8h_Max µg/m ³ N	Promedio de MP _{2.5} _Prom µg/m ³	Máx. de MP _{2.5} _Prom2 µg/m ³
2017	9,964	59,22	59,3570075	13	61
2018	10,34	63,168	78,645	20	81
2019	10,716	61,0248	62,965	16	145
		$y = 2,4x + 36,322$ $R^2 = 0,2085$	$y = 4,7979x + 17,379$ $R^2 = 0,0309$	$y = 3,9894x - 24,917$ $R^2 = 0,1824$	$y = 111,7x - 1059,3$ $R^2 = 0,9162$



ENAP-HUALPEN	Promedio de NO ₂ _Prom µg/m ³ N	Máx. de NO ₂ _Max µg/m ³ N	Máx. de O ₃ _8h_Max µg/m ³ N	Promedio de MP _{2.5} _Prom µg/m ³	Máx. de MP _{2.5} _Prom2 µg/m ³
2017	11,844	77,644	59,78	14	57
2018	11,656	72,8876	55,37	13	87
2019	10,152	60,4044	63,7	13	125
	X	$y = 9,4644x - 35,853$ $R^2 = 0,9718$	$y = -3,5525x + 99,467$ $R^2 = 0,625$	$y = 0,3643x + 9,2466$ $R^2 = 0,3425$	$y = -34,465x + 476,27$ $R^2 = 0,8797$

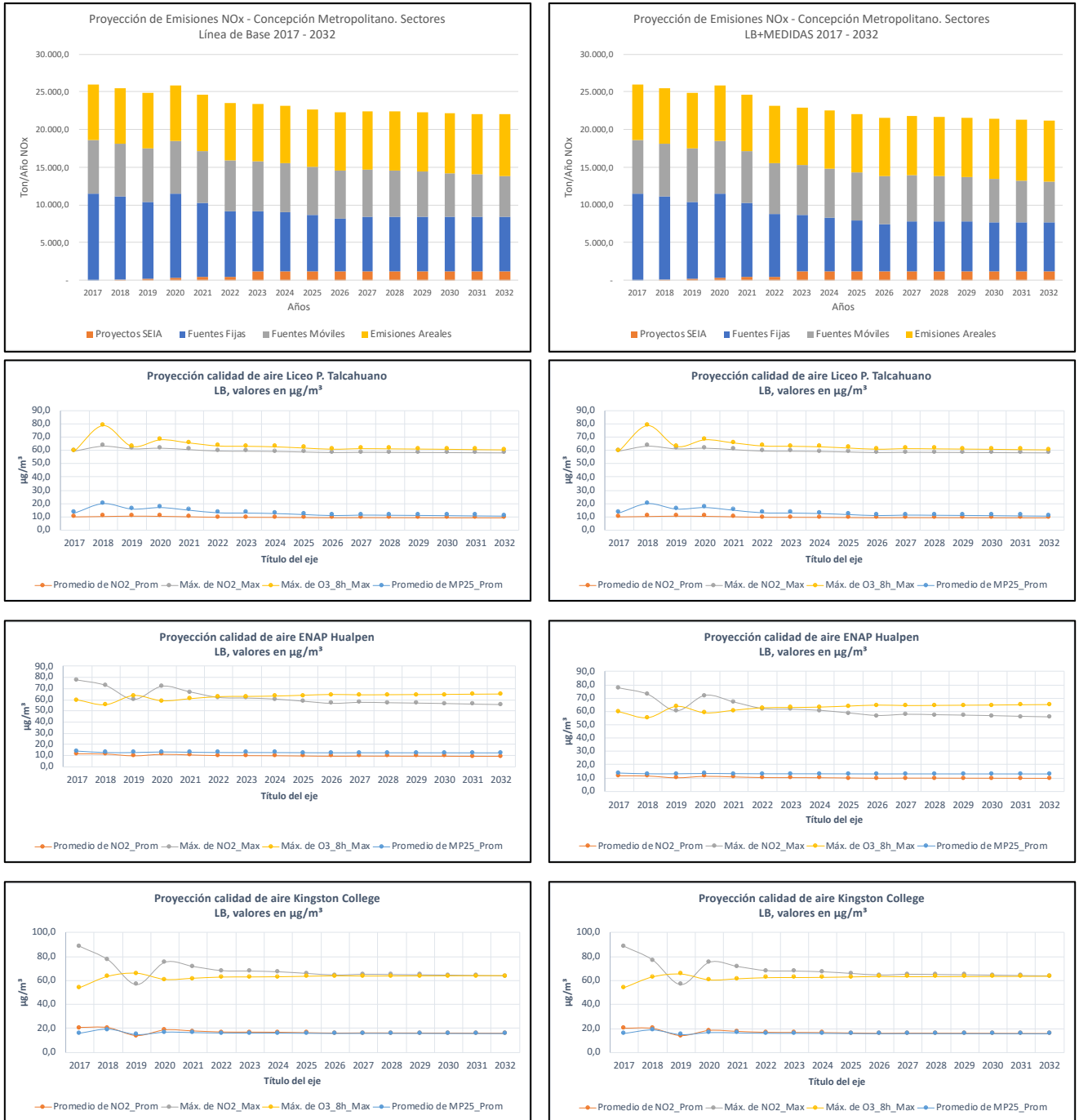


KINGSTON COLLEGE	Promedio de NO ₂ Prom µg/m ³ N	Máx. de NO ₂ Max µg/m ³ N	Máx. de O ₃ 8h Max µg/m ³ N	Promedio de MP25 Prom µg/m ³	Máx. de MP25 Prom2 µg/m ³
2017	20,492	88,3224	53,920132	16	48
2018	20,304	77,0988	63,21	19	85
2019	13,912	56,6632	65,66	15	120
X		$y = 4,051x + 0,154$ $R^2 = 0,8937$	$y = -1,1243x + 81,433$ $R^2 = 0,4624$	$y = 0,3752x + 9,8254$ $R^2 = 0,4557$	$y = -8,3673x + 236,92$ $R^2 = 0,7578$



Fuente: Elaboración propia.

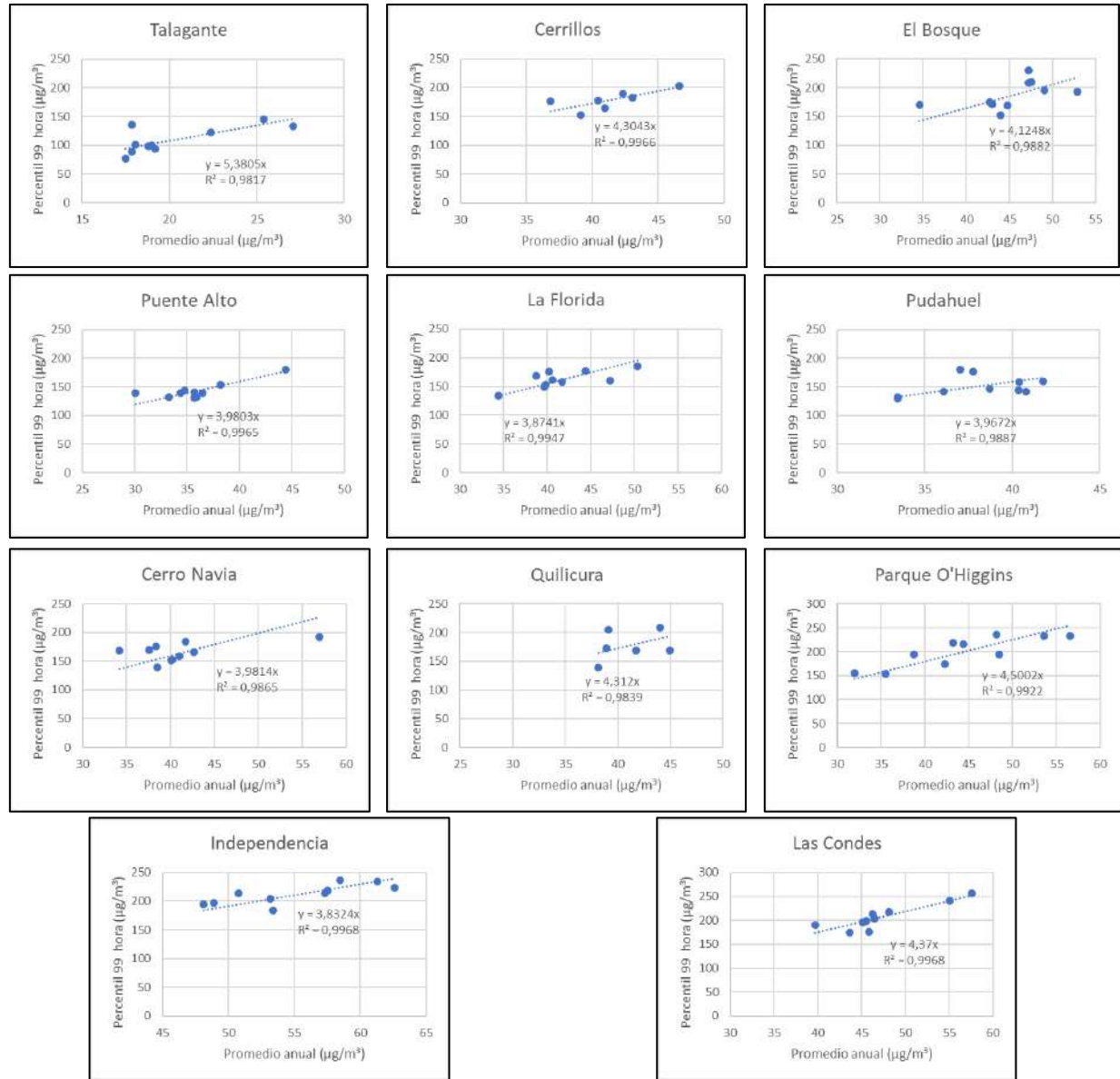
Figura 9-9: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 5. Concepción Metropolitano



Fuente: Elaboración propia.

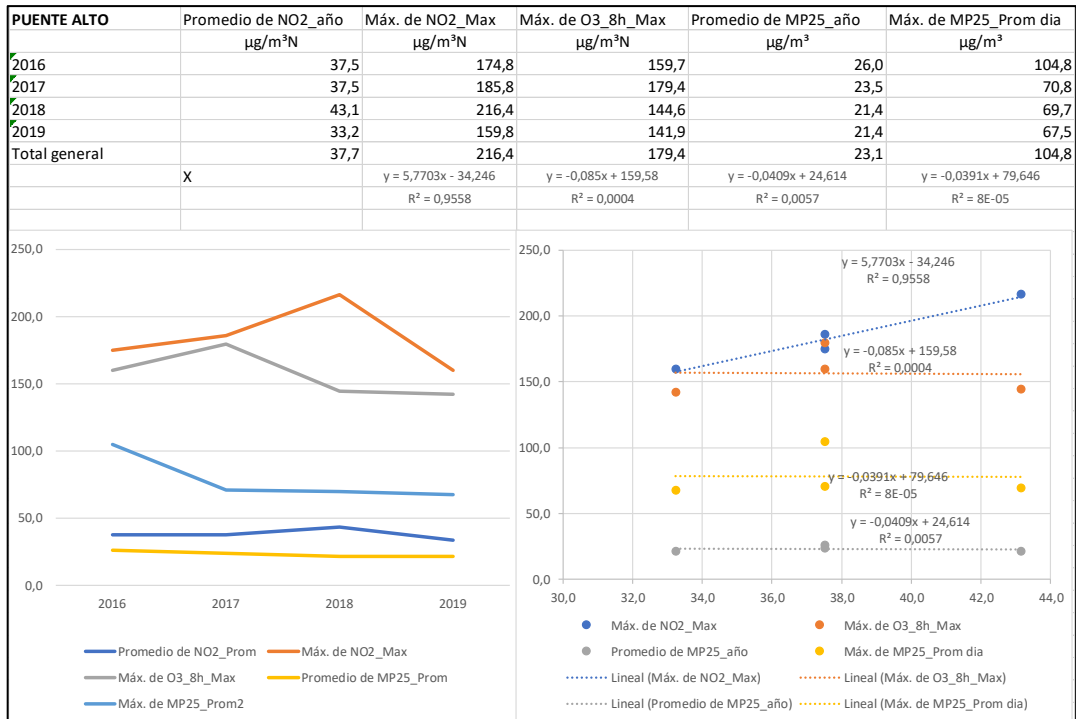
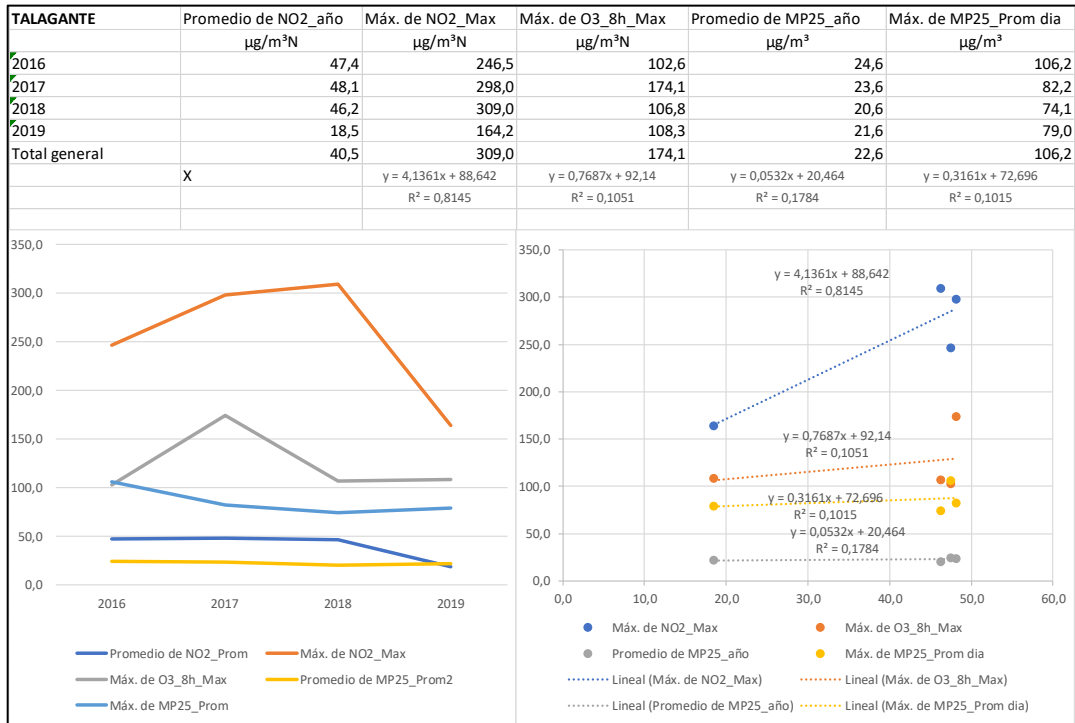
9.6 Zona 5. Región Metropolitana

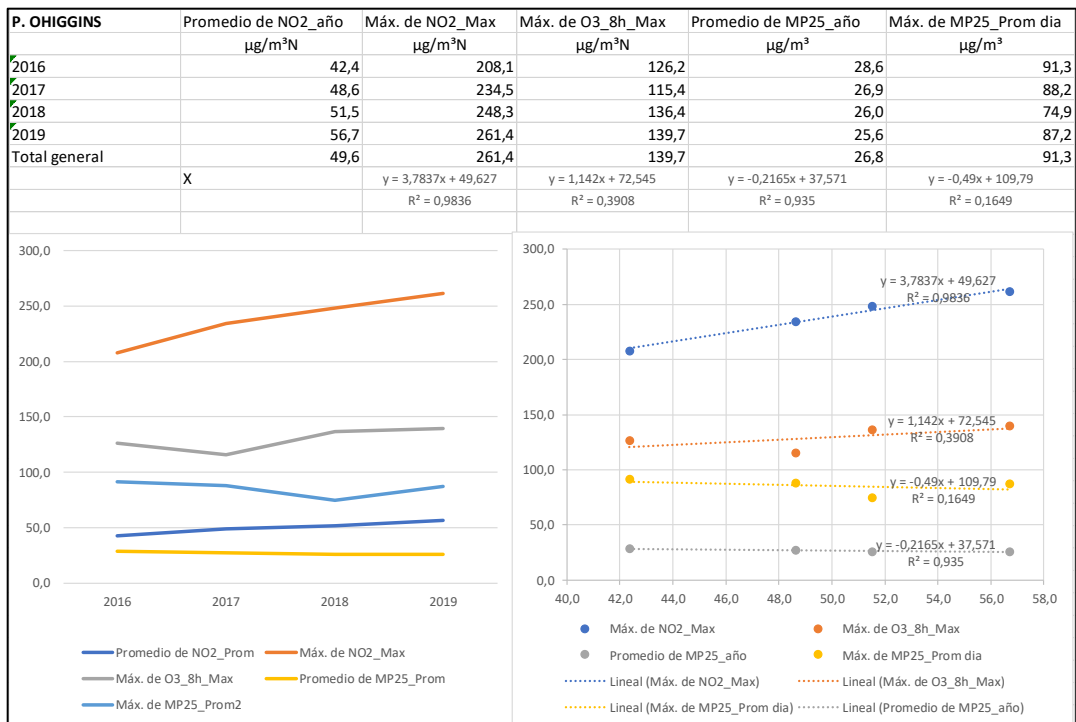
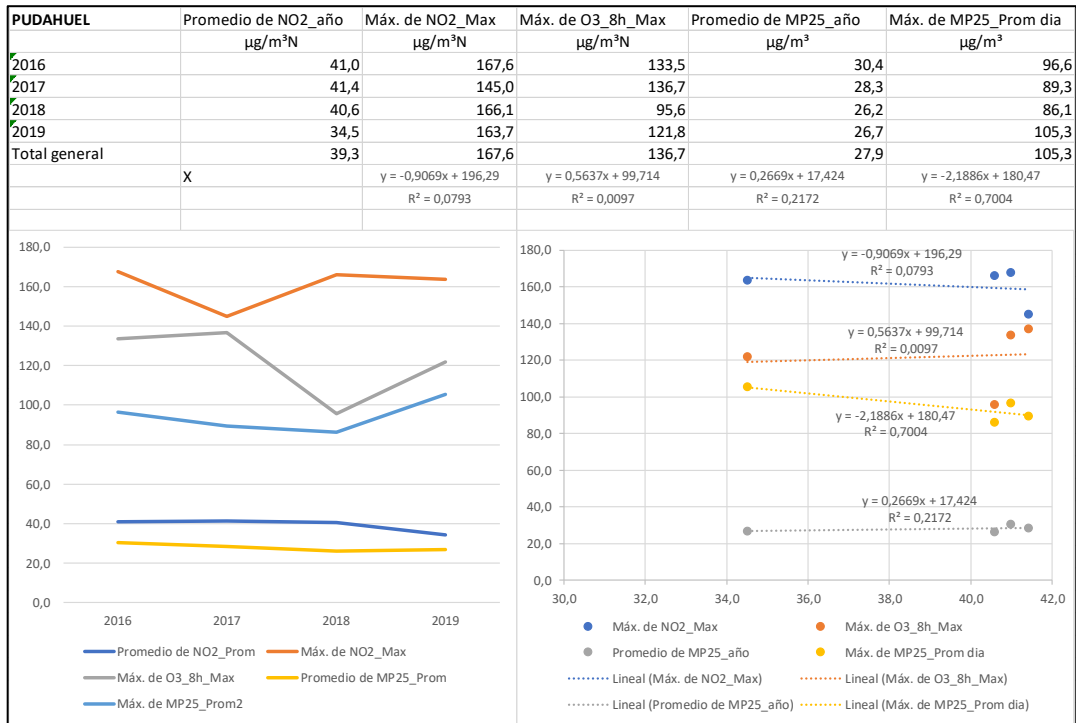
Figura 9-10: Dispersión entre promedio anual de NO₂ y percentil 99 de NO₂, periodo 2010-2019, valores en µg/m³.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9-11: Dispersión entre promedio anual de NO₂, máximo horario anual de NO₂, máximo anual O₃ 8hr, promedio anual MP_{2.5} y máximo diario anual MP_{2.5}, periodo 2016-2019, valores en µg/m³. Zona 5. Región Metropolitana





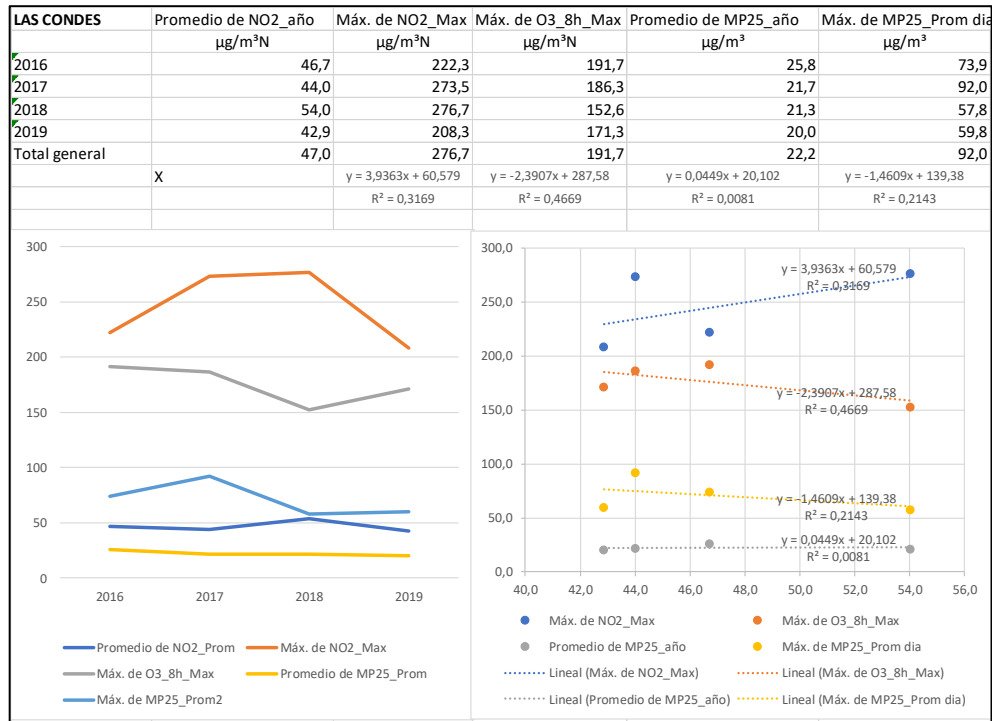
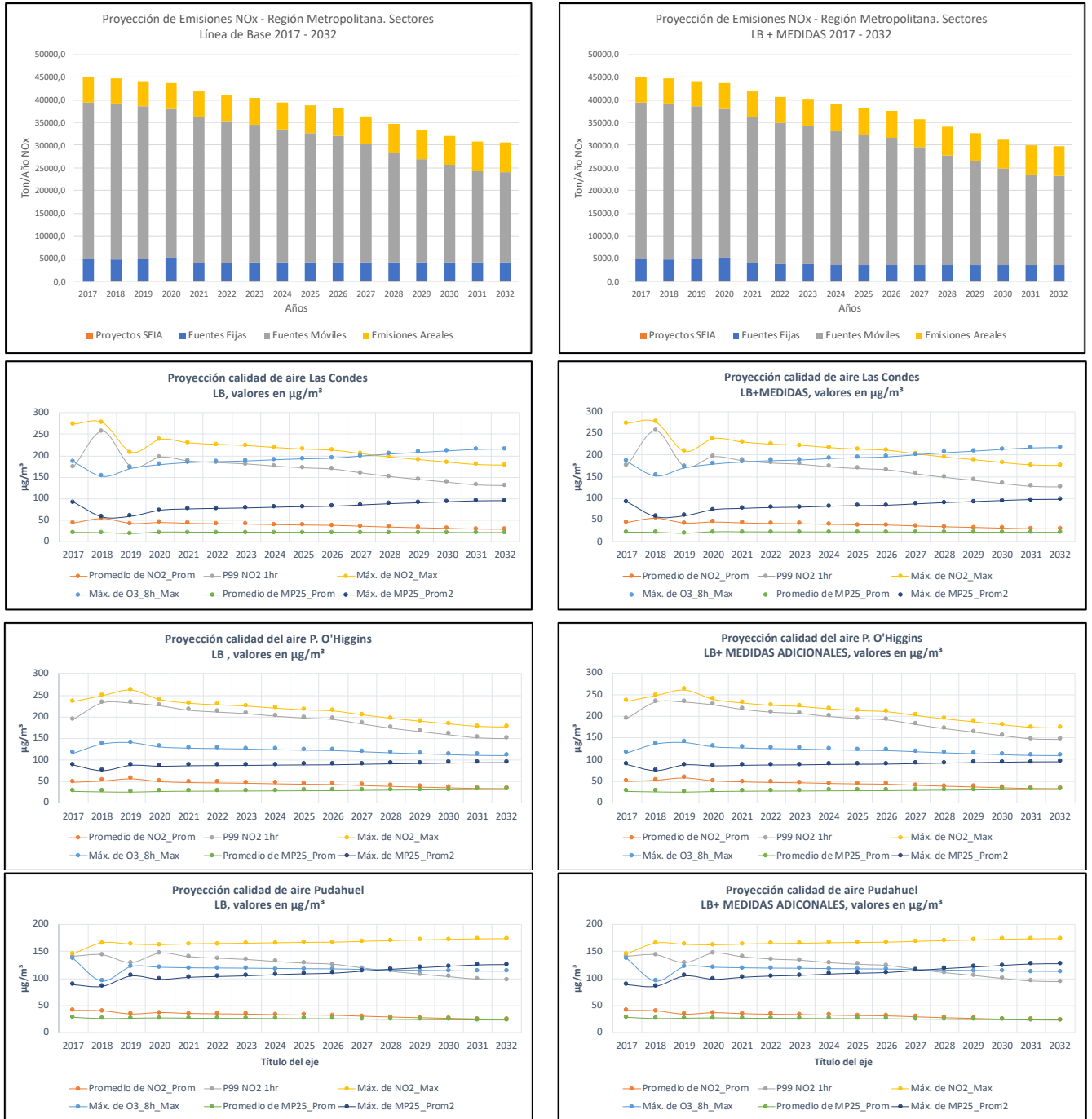
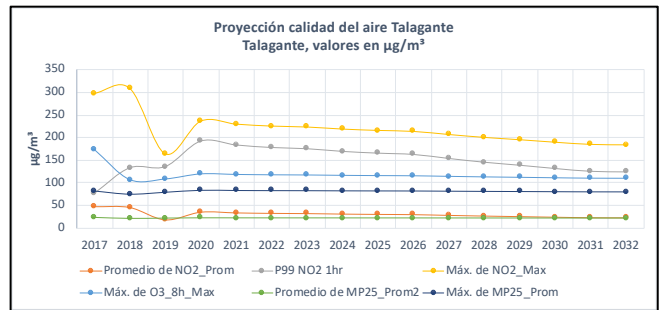
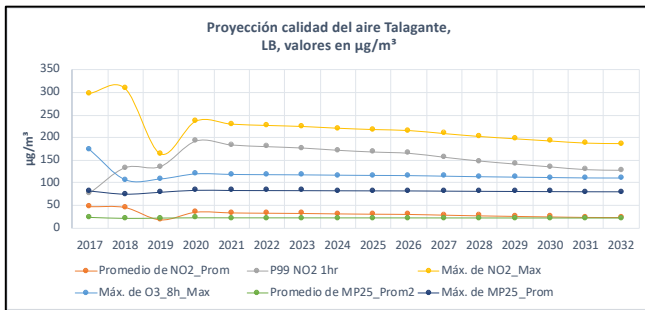
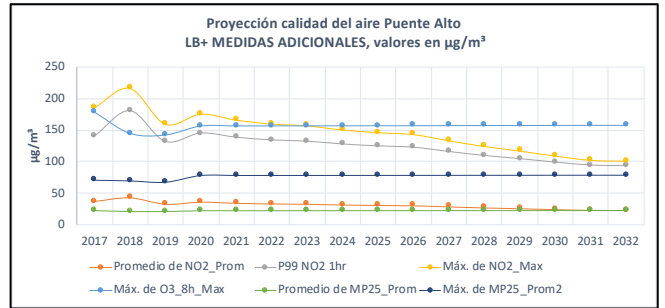
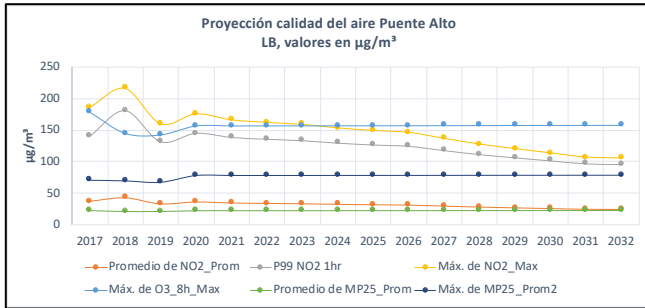


Figura 9-12: Proyección emisiones y calidad de aire. Zona 5. Región Metropolitana





Fuente: Elaboración propia.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 Propuesta de escenarios normativos

El análisis realizado en el presente estudio, concluye que en la línea de base 2017 los niveles modelados de concentración se encuentran bajo los niveles de la norma de calidad nacional para NO₂, situación que también se refleja en los valores medidos que se analizó en capítulos previos. La única zona que presenta valores en el límite o superiores a las recomendaciones de la OMS es la Región Metropolitana.

En materia de las proyecciones de emisiones, se presenta un conjunto de variables que permiten predecir que, en un escenario al año 2032, en la Región Metropolitana principalmente, se producirán reducciones importantes en las emisiones totales anuales de NO_x, mientras algunas zonas tendrán disminuciones más leves. Entre las principales medidas que mayormente contribuyen a esta reducción de emisiones se encuentran:

- Revisión de normas nacionales de emisión vehicular
- Nuevas normas nacionales que regulan las emisiones de fuentes estacionarias
- Medidas que forman parte de Planes de Descontaminación y Prevención.

Por otra parte, desde el punto de vista de la salud de la población, la revisión de la evidencia más reciente indica que, no existen niveles umbral para la exposición a NO₂, lo cual es relevante a la hora de considerar el enfoque preventivo en la definición de los niveles de exposición de la población.

En el contexto de lo señalado, resultan relevantes tres aspectos que se deben tener presente a efectos de definir nuevos valores para la norma de calidad:

- El análisis de costo-efectividad de la modificación normativa hacia valores más restrictivos
- Las proyecciones de emisiones para los próximos años
- Las proyecciones de calidad de aire.

Escenario 1: Mantener los niveles actualmente vigentes para NO₂, con los siguientes valores:

- Como concentración horaria: 400 µg/m³
- Como concentración anual: 100 µg/m³
- Incorporar las recomendaciones del numeral 6.4 para un ICA.

El análisis realizado en materia de calidad de aire y emisiones, indica que, no existen antecedentes que a la fecha y en la proyección futura se pudieran superar los niveles actualmente definidos en la regulación nacional, y por el contrario, todo indica que los niveles de emisión de NO₂ debieran reducirse con el mejoramiento de los índices de calidad.

Por otro lado, resulta indispensable que la revisión normativa se haga cargo de lo señalado en materia de gestión de episodios críticos, puesto que es una actual deficiencia que se visualiza en cualquier escenario de revisión de la norma, que resulte consistente con la evidencia en salud, en particular para la población susceptible, como así mismo con las tendencias a nivel internacional en materia de regulación de NO₂.

Escenario 2: Establecer un nivel intermedio entre los niveles actualmente vigentes y los estándares sugeridos por la Organización Mundial de las Salud. Los niveles propuestos para este escenario serían equivalentes a mantener una condición de latencia (80% del valor de norma) considerando las mediciones disponibles de la estación que exhibe los niveles ambientales más altos de NO₂ a nivel del país.

- Como concentración horaria: 280 µg/m³
- Como concentración anual: 66 µg/m³
- Incorporar las recomendaciones del numeral 6.4 para un ICA.

El fundamento de esta propuesta es esencialmente preventivo y gradual, apuntando a que, bajo cualquier nuevo escenario regulatorio, la condición de exposición actual de la población más expuesta no puede deteriorarse, aumentando los riesgos para la salud.

Se considera como referencia los máximos observados a nivel nacional (parque O'Higgins), con estos valores en el nivel de latencia.

Cabe señalar que los niveles propuestos en este escenario representan un 140% del valor horario y un 165% del estándar anual del estándar OMS.

Sin embargo, resulta indispensable que la revisión normativa se haga cargo de lo señalado en materia de gestión de episodios críticos, puesto que es una actual deficiencia que se visualiza en cualquier escenario de revisión de la norma, que resulte consistente con la evidencia en salud, en particular para la población susceptible, como así mismo con las tendencias a nivel internacional en materia de regulación de NO₂.

Escenario tres: Establecer gradualidad entre un escenario intermedio para alcanzar la meta de niveles propuestos por la OMS en un plazo de 10 años:

- Como concentración horaria: 280 µg/m³ al año 2025 y 200 µg/m³ al año 2030
- Como concentración anual: 66 µg/m³ al año 2025 y 40 µg/m³ al año 2030
- Incorporar las recomendaciones del numeral 6.4 para un ICA y un ISCA.

La razón de establecer esta gradualidad se fundamenta en el hecho que el conjunto de medidas establecidas en la revisión normativa así como aquellas contempladas en los PPDA comienzan a tener plena vigencia en el año 2025, tal como se indicó en la proyección de la línea de base. De esta forma, se garantiza que no existen esfuerzos adicionales que se debieran realizar para el cumplimiento de los nuevos niveles de calidad de aire.

10.2 Niveles de emergencia

La recomendación de escenarios para los niveles de emergencia para el contaminante NO₂ debe tomar en consideración la evidencia de los efectos agudos en la salud de la población expuesta a niveles elevados por periodos cortos (horas, días). Los antecedentes epidemiológicos son claros en mostrar la inexistencia de valor umbral para dichos efectos, por lo que no hay una concentración que no muestre riesgo.

Por otra parte, no hay antecedentes científicos nuevos que modifiquen los valores de niveles de daño significativo (NDS)⁸⁷, de los cuales se derivan los niveles criterio de episodios, y entregan el marco para los planes de contingencias.

Además, según lo analizado en materia de gestión de episodios, es evidente la ausencia de indicaciones en la regulación actual para la protección de población susceptible en niveles ambientales de NO₂ comprendidos entre el valor norma de promedio horario (400 µg/mg³) y el nivel 1 (1130 µg/mg³) contemplado como nivel de Alerta.

Por lo anterior, la propuesta para los niveles que den origen a situaciones de emergencia ambiental para dióxido de nitrógeno en concentración de una hora, es complementar los niveles señalados en el artículo 5 del D.S 114/2003, incorporando niveles intermedios de actuación entre los valores comprendidos por el valor de norma para una hora y el primer nivel de alerta ambiental. Con ello se avanzaría en la implementación de un ICA que de cuenta a la población susceptible de los riesgos ante situaciones de episodio.

En relación a la recomendación de avanzar en el establecimiento de un Índice de Calidad del Aire en Salud, en el que sobre las bases de riesgos locales y/o nacionales se informa a la población de la cuantía y tipo de riesgo presente para que se tomen medidas de disminución de la exposición, es pertinente la realización de estudios específicos que permitan el desarrollo de indicadores de este tipo. Atendido lo anterior es que este tipo de instrumento se ha propuesto para el tercer escenario considerando el esfuerzo en investigación científica, técnica y jurídica para su desarrollo.

10.3 Recomendaciones gestión de episodios en Chile

10.3.1 Para un ICA

- En general, los rangos umbral de concentración que se establecen en la regulación de NO₂ para efectos de gestión de episodios son todos más altos que a experiencia internacional analizada, la cual es consistente con el análisis de efectos en salud humana de niveles altos de concentración.
- La regulación actual para NO₂ no distingue condiciones particulares de actuación para el rango de niveles comprendido entre el valor norma de promedio horario (400 µg/mg³) y el nivel 1 (1130 µg/mg³) contemplado como nivel de Alerta. Esta consideración es importante para la

⁸⁷ Appendix L to Part 51 - Example Regulations for Prevention of Air Pollution Emergency Episodes, USA EPA

protección de la población susceptible, tales como niños, adultos mayores y personas con problemas cardíacos y respiratorios. Se sugiere avanzar hacia la definición de herramientas de gestión para este rango.

- De acuerdo a lo anterior, se recomienda desagregar, en el nivel 1 nacional, tres niveles de acuerdo a lo que indica la experiencia internacional, incluyendo en esta definición cuales son las actuaciones para la superación de cada uno de ellos.
- La asociación de gestión de episodios a Planes de Descontaminación o Prevención establece una limitación a la capacidad de actuación temprana ante eventos peaks en zonas que no cuentan con dicho instrumento regulatorio.
- En el contexto anterior, el levantamiento de esta restricción, así como un mayor desarrollo de estaciones de monitoreo con representatividad poblacional, constituyen una importante contribución a los procesos de gestión.

10.3.2 Para un ISCA

El dióxido de nitrógeno y el ozono provocan efectos agudos, por lo mismo, tratar de evitar la exposición de la población una vez objetivado el ascenso de los niveles de contaminantes, es una medida necesaria para minimizar los impactos a la salud pública.

Respecto de la gestión de los episodios de alta contaminación por NO₂, se recomienda avanzar en mediano plazo hacia en los estudios científicos, técnicos y jurídicos necesarios para la elaboración de un ISCA con un enfoque preventivo y educativo, incorporando el NO₂ junto con el resto de los contaminantes criterio⁸⁸ en un enfoque de indicador que integre los aspectos de salud.

Este enfoque implica reconocer y educar a la población de ciudades con más de 50.000 habitantes que se encuentran expuestas a contaminantes ubicuos, que no tienen un nivel límite de seguridad y que se acompañan siempre de una mezcla de contaminantes, por medio de una política de educación y prevención sobre la contaminación atmosférica.

10.4 Recomendación en materia de mediciones y monitoreo.

- El monitoreo de NO₂ se está realizando con equipamiento que cumple las exigencias de la USEPA o CEE.
- Considerando que la mayoría de las estaciones que miden NO₂, además miden MP10 y/o MP2,5 y que los criterios de instalación para cabezales de MP10 y MP2,5 son muy similares a los criterios recomendados para NO₂ no debería haber inconvenientes para la inclusión de dichos criterios en futura revisión de Norma de NO₂.
- En algunas estaciones de monitoreo de calidad de aire se realizan auditorías por compromisos de resoluciones de calificación ambiental (RCA) y la SMA ha fiscalizado a algunas estaciones que tienen Representatividad Poblacional, pero no existe un programa de fiscalización permanente

⁸⁸ Se denominan contaminantes criterio a los contaminantes presentes en toda cuenca atmosférica urbana. Estos son el material particulado (MP₁₀ y MP_{2,5}), los óxidos de nitrógeno y azufre, el monóxido de carbono y el ozono.

o de auditoría que permita verificar el funcionamiento de los monitores y la calidad de la información en forma sistemática.

- A la fecha no se ha incluido el alcance Calidad de Aire en las Entidades Técnicas de Fiscalización Ambiental⁸⁹ (ETFA) las cuales son autorizadas por la SMA
- No se cuenta con un Centro de Referencia para supervisar las calibraciones de los monitores de NO₂.
- Si bien existe el Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire (SINCA), que reúne datos de muchas estaciones conectadas a nivel nacional, con la posibilidad de visualización y extracción de información, esta plataforma no constituye una base homogénea de datos históricos **validados y oficiales** de calidad de aire.
- Se deben establecer criterios que permitan realizar un monitoreo de NO₂ **oportuno, confiable y representativo**. Es decir, será **oportuno** si la información de las estaciones de monitoreo esta disponible en tiempo real y la información validada es entregada por los operadores en plazos inferiores a 1 mes. Será **confiable** si la operación y mantención de la estación cuenta con un programa documentado de control y aseguramiento de calidad y será **representativa** si se fiscaliza continuamente el cumplimiento de las condiciones de instalación de la estación y que no se produzcan cambios en su entorno que alteren tanto la exposición (crecimiento de árboles y construcciones cercanas) como las concentraciones esperadas (aumento de flujo en calles cercanas, fuentes emisoras locales). Para estos efectos, se recomienda incluir los criterios anteriores en una actualización del Reglamento de monitoreo (D.S. N°61/2008) siguiendo el ejemplo de la Comunidad Económica Europea que mediante la directiva 2008/20/CE establece para NO₂ seguir la Norma técnica UNE-EN 14211:2013 disponibles en a “EUROPEAN STANDARDS (<https://www.en-standard.eu/>).

⁸⁹ <https://entidadestecnicas.sma.gob.cl/Home/RegistroPublico>

11 ANEXO 1: ANTECEDENTES PARA LA DEFINICIÓN DE LA QUINTA ZONA DE ESTUDIO

En los términos de referencia (objetivos específicos 3 y 4) se indican como zonas para el estudio, particularmente para el diagnóstico de calidad de aire y la elaboración de inventarios de emisiones, la Región Metropolitana, Gran Concepción, el núcleo Concón-Quintero-Puchuncaví, Calama y **otro por definir**.

En esta sección se desarrolla la definición de la quinta zona para efectos de este estudio. Para ello, se han considerado los siguientes criterios:

- Zonas del país (distintas a las ya definidas en los TDR) en condición actual de saturación por algún contaminante;
- Existencia de mediciones disponibles de calidad ambiental de NO₂ y O₃ y
- Existencia de megafuentes emisoras de NO₂.

De estos criterios resulta la siguiente lista:

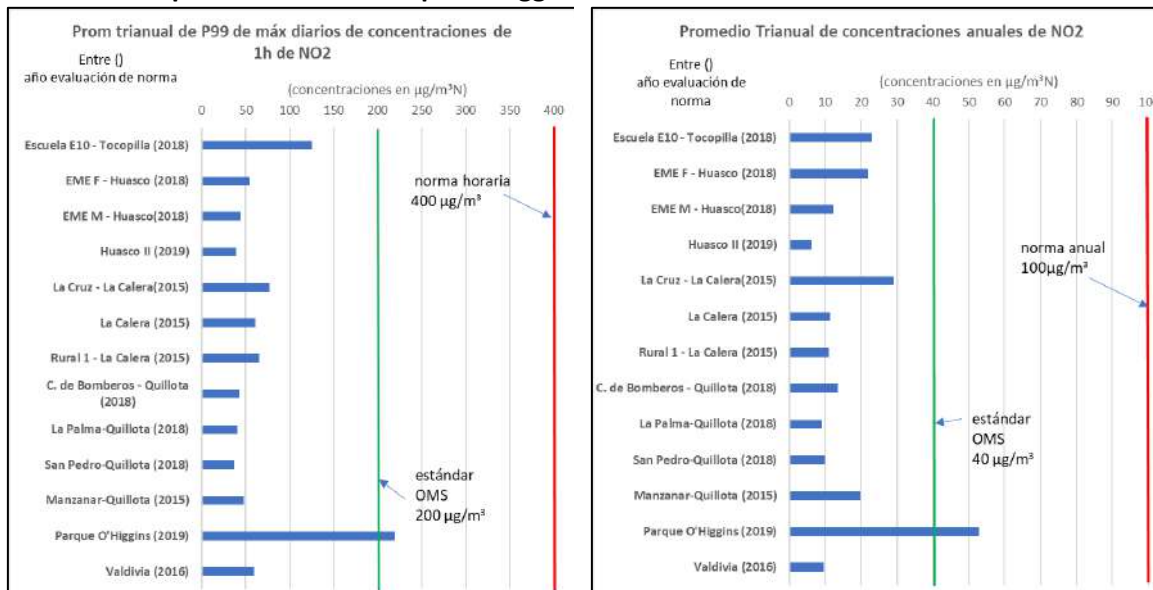
Opciones para definir quinta zona de estudio

Central	Comuna de Central	Variables y Decreto de Zona Latente (ZL) o Saturada (ZS)	PPDA
Termoeléctrica Norgener	Tocopilla	ZS por concentración anual de MP10 D.S. N°81/2007 de MINSEGPRES	D.S. N°79/2010 MINSEGPRES
Tocopilla Engie			
Guacolda	Huasco	ZL por concentración anual de MP10 D.S. N°25/2011 de MMA	D.S. N°38/2017 MMA
San Isidro II	Quillota	ZS por concentración anual de MP10 y ZL por concentración diaria de MP10 D.S. N°107/2018 de MMA	RE N°1105/2019 MMA, Anteproyecto en elaboración
Nehuenco I			
Antilhue TG	Valdivia	ZS por concentración diaria y anual de MP10 y MP2,5 D.S. N°17/2014 de MMA	D.S. N°25/2017

Fuente: Elaboración propia

Del conjunto de zonas en condición de saturación, en todos los casos es por MP₁₀ y sólo en Valdivia adicionalmente por MP_{2,5}.

Comparativa de niveles actuales de calidad de aire para definición de quinta zona de estudio. Se incorpora la estación Parque O'Higgins de la RM como la referencia más alta.



Fuente: Elaboración propia

Desde la perspectiva comparativa de calidad de aire entre las zonas, donde se incluye como referencia la estación Parque O'Higgins de la RM como el nivel más alto a nivel nacional, muestra que los niveles más altos a nivel diario y anual se encuentran en Tocopilla y La Calera.

Tocopilla, fue declarada zona saturada de MP10 en el 2007 (DS N°50, 2007) y cuenta con un PPDA vigente desde el año 2010 (DS N°79, 2010). En esta ciudad se localizan fuentes importantes de generación termoeléctrica a carbón, petróleo y gas, además de un puerto de embarque.

En el caso de Quillota, fue declarada zona saturada de MP10 en junio de 2019, latente por MP_{2,5}, y se encuentra en proceso de elaboración el anteproyecto de PPDA para la provincia de Quillota y las comunas de Catemu, Panquehue y Llayllay de la provincia de San Felipe. En esta zona se encuentran instalaciones de ciclos combinados a gas natural que aportan en forma significativa al Sistema Eléctrico Nacional, la fundición de cobre de Chagres y una importante actividad agrícola.

Se aprecia que Quillota y Tocopilla están por debajo del 30% de las normas de NO₂ vigentes en Chile, y menores al 60% de los valores recomendados por la OMS.

Por otra parte, desde la perspectiva de las proyecciones de emisiones, fuertemente moldeadas por las políticas de descarbonización y la incorporación creciente de fuentes renovables, en los escenarios energéticos futuros se observan cambios importantes en el nivel de actividad de estas megafuentes. El desarrollo del sector termoeléctrico ha experimentado modificaciones notorias en los últimos diez años, por lo que para analizar la evolución de las emisiones de NO₂ y definir cuáles serán aquellas zonas de mayor relevancia futura, se requiere dar una mirada al desarrollo esperado de este sector.

La siguiente tabla muestra la capacidad térmica en el 2019 y las proyecciones al año 2024⁹⁰, y la participación de estas fuentes de generación para el año 2019. Se incluye el conjunto de unidades en construcción y las unidades declaradas en construcción, junto con la implementación de la primera fase del plan de descarbonización, según los compromisos formales de retiro de unidades a carbón tomados por las empresas que participan en la mesa de descarbonización⁹¹.

Los principales acuerdos de los generadores con el Ministerio de Energía son los siguientes:

- Acuerdo de desconexión y cese de operaciones unidades a carbón Ventanas 1 y Ventanas 2 entre: Ministerio de Energía de la República de Chile y AES GENER S.A.
- Acuerdo de retiro de centrales termoeléctricas a carbón entre: ENEL Generación Chile S.A., GASATACAMA Chile S.A. y Ministerio de Energía.
- Acuerdo de retiro de centrales termoeléctricas a carbón entre Engie Energía Chile S.A. y Ministerio de Energía
- Acuerdo de descarbonización entre Colbún S.A. y Ministerio de Energía
- Decreto exento N° 50, de 13 de marzo de 2020, que Aprueba Acuerdos de retiro de centrales termoeléctricas a carbón

Capacidad instalada (MW) y generación 2019 de la matriz en Chile.

Combustible	Capacidad Instalada (MW)		Generación 2019 % del total
	2019	2024	
Otros(*)	12.307	18.436	44,07
Carbón	5.192	3.797	37,27
Petróleo	2.797	3.353	0,37
Gas	4.916	4.916	18,29
Total	25.212	32.527	

Otros: No térmicos (hidro – renovables – biomasa)

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia, la capacidad térmica sólo crece en combustible diésel, manteniéndose estable en gas natural y reduciendo la capacidad en generación a carbón en todas las zonas de emplazamiento de estas unidades (Tocopilla, Mejillones, Ventanas y Coronel).

En el caso de Tocopilla, Engie dio de baja las unidades 12 y 13 (173 MW) en junio del año 2019 y anunció el compromiso de retiro de las unidades 14 y 15 (268 MW) con fecha límite en mayo de 2024⁹². Mientras que en el caso de la central Nueva Tocopilla (unidades NT01 y NT02) de AES Gener, no hay un comunicado explícito de su fecha de salida. No obstante, en el escenario Escenario A planteado por el Coordinador Eléctrico Nacional en los estudios más recientes de la operación del

⁹⁰ Fuentes: Capacidad instalada: Coordinador Eléctrico Nacional.

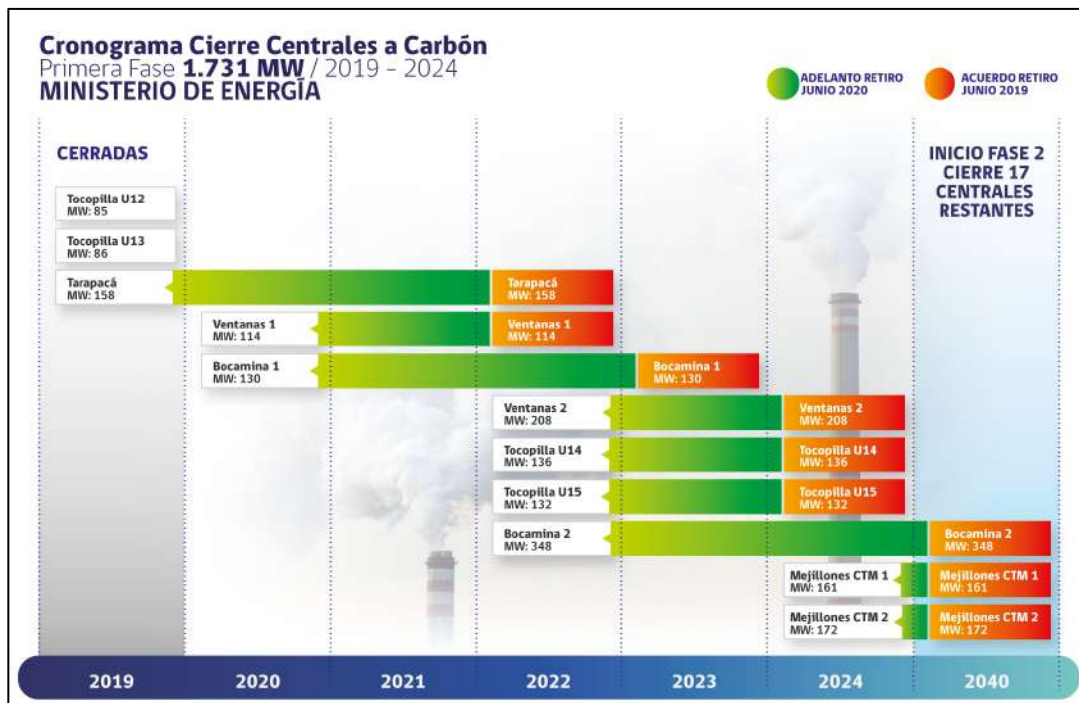
Unidades en construcción, unidades declaradas en construcción y plan de descarbonización: Informe Técnico Preliminar de Precio de Nudo – Junio 2020 – Comisión Nacional de Energía.

⁹¹ Mesa de trabajo de descarbonización <https://www.energia.gob.cl/panel/mesa-de-trabajo-descarbonizacion>

⁹² Acuerdo de retiro de centrales termoeléctricas a carbón entre Engie Energía Chile S.A. y Ministerio de Energía. https://energia.gob.cl/sites/default/files/acuerdo_engie.pdf

sistema en el marco del plan de descarbonización^{93 94}, que supone un cronograma de retiro de centrales termoeléctricas a carbón por cumplimiento de vida útil técnica o económica de las centrales, la desconexión sería el año 2027 para NT01 (140 MW) y el año 2029 NT02 (136 MW). De este modo, en un escenario conservador, al año 2030 en Tocopilla ya se habrán retirado un total de 718 MW de capacidad a carbón respecto al escenario 2018.

Por otro lado, es relevante realizar un análisis preliminar e histórico de los niveles de generación, a efectos de evaluar la relevancia de las diferentes fuentes. Al respecto, la generación en petróleo, a pesar de que su nivel de capacidad instalada es relevante (11% del total), la generación de este tipo de fuentes es muy baja, así, la información para el año 2019 indica que la generación de estas fuentes fue de tan sólo un 0,37% del total generado⁹⁵.



Fuente: <https://www.energia.gob.cl/mini-sitio/estrategia-de-transicion-justa-en-energia>

⁹³ Estudio de Operación y Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional sin centrales a carbón. CEN, diciembre 2018

⁹⁴ Análisis de la Operación y Abastecimiento del Sistema Eléctrico Nacional de Chile en un escenario de retiro total de centrales a carbón al año 2025. CEN, septiembre 2020.

⁹⁵ Fuente: Reporte Anual 2018 – Generadoras de Chile.

UNIDAD GENERADORA	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	FUENTE	REGIÓN	AÑO PUESTA EN SERVICIO	AÑOS DE SERVICIO	Fecha Esc A	Fecha Esc D
Ventanas 1	120	Carbón	Valparaíso	1964	54	2021	2021
Bocamina	130	Carbón	Biobío	1970	48	2022	2021
Ventanas 2	220	Carbón	Valparaíso	1977	41	2023	2021
Termoeléctrica Tocopilla - U12	87	Carbón	Antofagasta	1983	35	2024	2022
Termoeléctrica Tocopilla - U13	86	Carbón	Antofagasta	1985	33	2025	2022
Termoeléctrica Tocopilla - U14	136	Carbón	Antofagasta	1987	31	2026	2023
Termoeléctrica Tocopilla - U15	132	Carbón	Antofagasta	1987	31	2026	2023
Termoeléctrica Norgener - NTO1	140	Carbón	Antofagasta	1995	23	2027	2024
Guacolda - U1	152	Carbón - Petcoke	Atacama	1995	23	2027	2024
Termoeléctrica Mejillones - CTM1	160	Carbón	Antofagasta	1995	23	2028	2025
Guacolda - U2	152	Carbón - Petcoke	Atacama	1996	22	2028	2025
Termoeléctrica Norgener - NTO2	136	Carbón	Antofagasta	1997	21	2029	2026
Termoeléctrica Mejillones - CTM2	174	Carbón	Antofagasta	1998	20	2030	2026
Termoeléctrica Tarapacá	158	Carbón	Tarapacá	1999	19	2031	2027
Guacolda - U3	152	Carbón - Petcoke	Atacama	2009	9	2033	2028
Nueva Ventanas	272	Carbón	Valparaíso	2010	8	2034	2028
Guacolda - U4	152	Carbón - Petcoke	Atacama	2010	8	2034	2028
Termoeléctrica Andina	177	Carbón	Antofagasta	2011	7	2035	2029
Termoeléctrica Angamos - ANG1	277	Carbón	Antofagasta	2011	7	2035	2029
Termoeléctrica Angamos - ANG2	281	Carbón	Antofagasta	2011	7	2036	2030
Termoeléctrica Hornitos	178	Carbón	Antofagasta	2011	7	2036	2030
Santa María	370	Carbón	Biobío	2012	6	2037	2031
Bocamina II	350	Carbón	Biobío	2012	6	2037	2031
Campiche	272	Carbón	Valparaíso	2013	5	2038	2032
Guacolda - U5	152	Carbón - Petcoke	Atacama	2015	3	2038	2032
Cochrane - CCH1	275	Carbón	Antofagasta	2016	2	2038	2033
Cochrane - CCH2	275	Carbón	Antofagasta	2016	2	2038	2033

Nota: En destacado las centrales localizadas en Tocopilla a efectos de ilustrar la salida en esa comuna.

Fuente: Estudio de Operación y Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional sin centrales a carbón. Presentación del Coordinador Eléctrico Nacional a la Comisión de Minería y Energía del Senado, diciembre 2018⁹⁶.

⁹⁶ Es escenario A corresponde al retiro de unidades por cumplimiento de vida útil técnica o económica de las centrales en el plan de descarbonización y el D escenario de adelantamiento del retiro.

Por lo anterior, para los efectos del presente estudio, resulta más relevante el análisis de la generación termoeléctrica que la potencia instalada y considerar la evolución que esta generación tendrá en el análisis de mediano plazo. El siguiente cuadro muestra las principales zonas de emplazamiento de la capacidad de generación a gas natural, puesto que ésta será la fuente de generación termoeléctrica relevante en el mediano plazo (esto en base a las señales regulatorias de la CNE). Como se observa, la zona en la cual se produce más generación en base a gas natural es Quillota con las centrales Nehuenco y San Isidro.

Capacidad instalada (MW) y generación 2018 (MWh) en zonas escogidas.

Zona	Centrales	Cap. Instalada (MW)	Generación (MWh)
Tocopilla	Tocopilla	256	994.136
Mejillones	KELAR	554	2.242.655
	Atacama	732	
	Mejilones	238	
Quillota	Nehuenco I	368	7.191.727
	Nehuenco II	368	
	San Isidro I	310	
	San Isidro II	387	

Fuente: Elaboración propia con información de CNE

En consecuencia, desde la perspectiva futura de emisiones de NO_x, comparativamente Quillota es la zona que tendrá más emisiones locales de NO_x, y por ello la considerada para los efectos de los siguientes capítulos del estudio.

12 ANEXO 2: SINTESIS REVISION BIBLIOGRAFICA EVIDENCIA EN SALUD

Ying Zeng, Ruoheng Lin, Li Liu, Yiting Liu, Yamin Li Ambient air pollution exposure and risk of depression: A systematic review and meta-analysis of observational studies <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2019.04.019>:

Estudios recientes han informado una asociación entre la exposición a la contaminación del aire y la depresión, con resultados inconsistentes. Para abordar esta controversia, realizamos una revisión sistemática y un metaanálisis de estudios observacionales publicados que investigaron la contaminación del aire exterior y la depresión. Se realizaron búsquedas en cinco bases de datos electrónicas y finalmente se identificaron quince artículos. Los riesgos de probabilidades agrupadas se calcularon por separado según el tipo de contaminante, la duración de la exposición y el resultado. Los análisis de subgrupos se realizaron en función del diseño, la población, los posibles factores de confusión importantes y los niveles de contaminantes. Encontramos un riesgo significativamente mayor de depresión con la exposición a largo plazo a PM_{2.5} y la exposición a corto plazo a PM₁₀, NO₂, SO₂, CO. No se encontraron pruebas en la asociación entre la exposición a O₃ y la depresión. Además, la exposición a altos niveles de contaminantes indica un mayor riesgo de depresión. Nuestros resultados destacan la necesidad de controlar la contaminación del aire para la depresión. Sin embargo, aún se requieren más estudios con métodos estandarizados para respaldar los resultados debido a los resultados inconsistentes en los análisis estratificados y las limitaciones metodológicas de los estudios incluidos.

Le qian GUO, Yu CHEN, Bai-bing MI, Shao-nong DANG, Dou-dou ZHAO, Rong LIU, Hong-li WANG, Hong YAN. Ambient air pollution and adverse birth outcomes: a systematic review and meta-analysis. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1800122>.

Varias revisiones han evaluado la relación entre la exposición a la contaminación del aire ambiente y los resultados adversos del parto durante el embarazo, pero los resultados siguen siendo controvertidos. El objetivo de este estudio fue evaluar esta correlación cuantitativamente y explorar fuentes de heterogeneidad. Se incluyeron todos los estudios de cohortes o de casos y controles publicados que evaluaron la correlación entre la contaminación del aire ambiente y el bajo peso al nacer (LBW), el parto prematuro (PTB) y los pequeños para la edad gestacional (SGA). Los métodos analíticos y los criterios de inclusión se proporcionaron en el sitio web de PROSPERO (CRD42018085816). Evaluamos los efectos combinados y la heterogeneidad. También se realizaron análisis de subgrupos (agrupados por período de exposición, configuración del estudio, diseño del estudio, tipos de exposición, fuente de datos, puntaje de calidad Newcastle-Ottawa (NOS) y ajuste por fumar o factores meteorológicos) y se examinó el sesgo de publicación. La herramienta de riesgo de sesgo en las revisiones sistemáticas (ROBIS) se utilizó para evaluar el riesgo general de sesgo en esta revisión. Cuarenta estudios cumplieron los criterios de inclusión. Observamos odds ratios (OR) agrupados de 1.03–1.21 para LBW y 0.97–1.06 para PTB cuando las madres estuvieron expuestas a CO, NO₂, NO_x, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀ o SO₂ durante todo el embarazo. Para SGA, la estimación agrupada fue de 1,02 en relación con las concentraciones de NO₂. El análisis de subgrupos y el análisis de sensibilidad disminuyeron la heterogeneidad en cierta medida, como los subgrupos de medidas continuas (OR = 0,98 (0,97–0,99), I² = 0,0%) y NOS > 7 (OR = 0,98 (0,97–0,99), I² = 0,0%) al evaluar la asociación entre PTB y NO₂. Esta revisión se completó con un bajo riesgo de sesgo. Las altas

concentraciones de contaminación del aire se relacionaron significativamente con el mayor riesgo de resultados adversos de nacimiento. Sin embargo, las fuentes de heterogeneidad entre los estudios deben explorarse más a fondo.

Virginia Arroyo, Cristina Linares, Julio Díaz Premature births in Spain: Measuring the impact of air pollution using time series analyses. *Science of the Total Environment* 660 (2019) 105–114

Antecedentes: el parto prematuro (37 semanas de gestación) es el principal indicador de muerte neonatal durante el primer mes de vida y la segunda causa de muerte de niños menores de cinco años. Hay 15 millones de nacimientos prematuros (PTB) en todo el mundo. La contaminación del aire en las ciudades, principalmente como resultado del tráfico urbano, tiene un gran impacto en los PTB, aunque hay pocos estudios realizados sobre este tema a nivel de país. El objetivo de este estudio es cuantificar los riesgos relativos (RR) y el riesgo atribuible de la población (PAR) de las concentraciones de contaminantes en los PTB en España, y analizar los trimestres más susceptibles. Métodos: para cada provincia se calcularon los PTB semanales promedio (CIE-10: P07.2-P07.3) durante el período 2001–2009, así como las concentraciones promedio semanales de PM₁₀, NO₂ y O₃. Se realizaron estimaciones de RR y PAR utilizando modelos lineales generalizados con enlace de Poisson, controlando la tendencia, la estacionalidad, la naturaleza autorregresiva de la serie y la influencia de la temperatura en períodos de olas de calor y / o frío. Se llevó a cabo un metaanálisis para estimar RR y PAR a nivel global en función del RR obtenido para cada una de las provincias. Resultados: para toda España, el RR global de PTB debido al impacto de PM₁₀ fue 1.071 (1.049, 1.093) y 1.150 (1.084, 1.220) para NO₂, sin asociación detectada para O₃. Por lo tanto, con disminuciones de 10 µg/m³ en las concentraciones de PM₁₀ y NO₂, se podría haber evitado alrededor del 12.5% y 4.5% de los PTB respectivamente. Conclusiones: alrededor del 1,35% de los PTB que ocurrieron en España durante el período de estudio pueden atribuirse a la contaminación del aire. La adopción de medidas estructurales para reducir estos contaminantes del aire debería dar como resultado una disminución en el número de PTB en España.

Cheng-Yang Hu, Yuan Fang, Feng-Li Li, Bao Dong, Xiao-Guo Hua, Wen Jiang, Heng Zhang, Yong Lyu, Xiu-Jun Zhang. Association between ambient air pollution and Parkinson's disease: Systematic review and meta-analysis. *Environmental Research* 168 (2019) 448–459:

La contaminación del aire se ha evaluado como un posible factor de riesgo para la enfermedad de Parkinson (EP), pero los resultados actuales son inconsistentes y no se han combinado. Realizamos una revisión sistemática y un metaanálisis para estimar la asociación entre la exposición a largo plazo a la contaminación del aire ambiente y la EP, dada la naturaleza de la etiología de la enfermedad. Se identificaron un total de 10 estudios buscando en Web of Science, Science Direct y PubMed antes de octubre de 2017. Encontramos un riesgo significativamente mayor de EP con 10 partes por billón (ppb) de aumento en la exposición a los óxidos de nitrógeno (NO_x) (riesgo relativo (RR) = 1,06; intervalo de confianza (IC) del 95%: 1,04, 1,09). El RR agrupado para la asociación entre la exposición al monóxido de carbono (CO), el incremento de 1 parte por millón (ppm) y el riesgo de EP fue de 1.65 (IC 95%: 1.10, 2.48). Los RR agrupados para la asociación entre la exposición al dióxido de nitrógeno (NO₂) y al ozono (O₃) por incremento de 1 ppb, y el riesgo de EP fueron 1.01 (IC 95%: 1.00, 1.03) y 1.01 (IC 95%: 1.00, 1.02), respectivamente. Hubo una heterogeneidad significativa en el metaanálisis de partículas finas (PM_{2.5}), NO₂, dióxido de azufre (SO₂) y CO. Llegamos a la conclusión

de que la exposición a NO₂, NO_x, CO y O₃ se asociaron con un mayor riesgo de EP, aunque existe un alto riesgo de sesgo. Se necesitan los efectos dosis-respuesta evaluados por estudios de alta calidad. Las investigaciones deben ampliarse a países de ingresos bajos y / o medios donde la contaminación del aire interior y exterior es alta.

Newell et al. Cardiorespiratory health effects of gaseous ambient air pollution exposure in low- and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis *Environmental Health* (2018) 17:41

Antecedentes: falta de investigación sobre los efectos de los contaminantes gaseosos (óxidos de nitrógeno [NO_x], dióxido de azufre [SO₂], monóxido de carbono [CO] y ozono [O₃]) en el medio ambiente en los resultados de salud de los países de ingresos bajos y medianos (LMIC) está llevando a depender de los resultados de estudios realizados en países de altos ingresos (HIC). Esta revisión sistemática y metaanálisis examina los efectos sobre la salud cardiorrespiratoria de los contaminantes gaseosos en los LMIC exclusivamente.

Métodos: Se realizó una búsqueda sistemática y estimaciones agrupadas por contaminante, retraso y resultado, y se presentaron como un riesgo relativo en exceso por 10 µg/m³ (NO_x, SO₂, O₃) o 1 ppm (CO) de contaminante. Se realizó un análisis de subgrupos examinando estimaciones por resultados específicos, ciudad y ajuste de contaminantes.

Resultados: Sesenta estudios cumplieron los criterios de inclusión, la mayoría (44) de la región de Asia Oriental y el Pacífico. Un aumento de 10 µg/m³ en el mismo día NO_x se asoció con 0.92% (IC 95%: 0.44, 1.39) y 0.70% (0.01, 1.40) aumentos en la mortalidad cardiovascular y respiratoria respectivamente, el mismo día NO_x no se asoció con la morbilidad. El mismo día, el dióxido de azufre se asoció con un aumento del 0,73% (0,04, 1,42) y del 0,50% (0,01, 1,00) en la morbilidad respiratoria y en la mortalidad cardiovascular, respectivamente.

Conclusiones: la exposición aguda a la contaminación gaseosa del aire ambiente (AAP) se asocia con aumentos en la morbilidad y mortalidad en los LMIC, con las mayores asociaciones observadas para la mortalidad cardiorrespiratoria.

Cheng-Yang Hu et al Maternal air pollution exposure and congenital heart defects in offspring: A systematic review and meta-analysis. *Chemosphere* 253 (2020) 126668

Antecedentes: los defectos cardíacos congénitos (CHD) tienen una causa multifactorial con un fuerte componente genético y muchos desencadenantes ambientales. El cuerpo emergente de estudios empíricos sugiere que la contaminación del aire es un contribuyente importante para el desarrollo de CHD, sin embargo, todavía existe cierta controversia sobre la evidencia actual y, según el conocimiento de los autores, ningún estudio ha revisado la evidencia más reciente.

Objetivos: Realizamos una revisión sistemática y un metanálisis de la literatura epidemiológica para investigar la relación entre la exposición materna a la contaminación del aire y el riesgo de

cardiopatía coronaria en la descendencia. También se examinó la presencia de heterogeneidad y sesgo de publicación en los estudios disponibles.

Métodos: Se realizó una extensa búsqueda bibliográfica de estudios epidemiológicos relacionados con la contaminación del aire y las enfermedades del corazón, publicados en inglés, hasta el 1 de agosto de 2019.

Las combinaciones de resultados se calcularon para i) riesgo por incremento específico de concentración y ii) riesgo a un nivel de exposición alto versus bajo en cada estudio usando el modelo de efectos fijos o el modelo de efectos aleatorios. Resultados: finalmente se incluyeron un total de 26 estudios. En los metanálisis, la exposición a monóxido de carbono (CO) alta versus baja se asoció con un mayor riesgo de tetralogía de Fallot [odds ratio (OR) 1/4 1.21, intervalo de confianza (IC) del 95%: 1.04e1.41], Sin embargo, la exposición a partículas de 5 mm (PM_{2.5}) se asoció marginalmente con ella. Se encontró un mayor riesgo de defectos del tabique auricular (ASD) por cada incremento de 10 mg/m³ y 10 ppb en exposición a partículas de 10 mm (PM₁₀) y ozono (O₃), respectivamente (OR 1/4 1.04, IC 95%: 1.00e1.09; OR 1/4 1.09, IC 95%: 1.02e1.17). La exposición categórica al dióxido de nitrógeno (NO₂) se asoció con un mayor riesgo de coartación de la aorta (OR para alto versus bajo 1/4 1.14, IC 95%: 1.02e1.26). Los análisis para otras combinaciones no arrojaron asociaciones estadísticamente significativas. Los análisis sensibles mostraron hallazgos similares.

Conclusiones: Las estimaciones resumidas del efecto de este estudio sugieren asociaciones estadísticamente significativas entre el aumento del riesgo de subtipos de CHD específicos y las exposiciones a PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, CO y O₃. Se necesitan más estudios, especialmente realizados en países en desarrollo, con mejoras en la evaluación de la exposición, la armonización de resultados y la comprensión mecanicista para elaborar las asociaciones sugestivas.

Mei-Yi Wu et al. Association between air pollutants and development of chronic kidney disease: A systematic review and meta-analysis. M.-Y. Wu et al. / Science of the Total Environment 706 (2020) 135522

Background: The association between incident chronic kidney disease (CKD) or end-stage renal disease (ESRD) and exposure to outdoor air pollution is under debate. We aimed to examine this relationship based on a systematic review with random-effects meta-analysis. Methods: We screened the literature on long-term air pollution exposure assessment in the general population using an electronic search of PubMed, Medline, Embase, and Cochrane Library from inception to 20 October 2019. Observational studies investigating the association between long-term exposure to gaseous (CO, SO₂, NO₂, O₃) or particulate (PM_{2.5} or PM₁₀) outdoor air pollutants and CKD, ESRD, or renal dysfunction were included, and summary risks were estimated.

Results: Of 4419 identified articles, 23 met our inclusion criteria after screening and 14 were included in the meta-analysis. Pooled effect estimates had the following summary risk ratios (RRs) for CKD: 1.10 (95% confidence intervals [CI] 1.00, 1.21; derived from four studies) per 10 µg/m³ increase in PM_{2.5} and 1.16 (95% CI 1.05, 1.29; derivado de cuatro estudios) para PM₁₀; 1,31 (IC del 95%: 0,86 a 2,00; derivado de dos estudios) por aumento de 10 ppm en CO; y 1.11 (IC 95% 1.09,

1.14; derivado de tres estudios) por 10 ppb de aumento en NO₂. Para el efecto agrupado sobre eGFR, los aumentos en PM₁₀ y PM_{2.5} (de 10 µg/m³) se asociaron con una disminución de eGFR en -0.83 (IC 95% - 1.54, -0.12; derivado de dos estudios) y -4.11 (95% IC -12,64, 4,42; derivado de dos estudios) ml / min / 1,73 m², respectivamente.

Conclusiones: se observó que la contaminación del aire estaba asociada con ERC y disminución de la función renal. Aunque se requieren estudios más largos, argumentamos que la contaminación del aire es pernicioso para la salud renal.

Bo-Yi Yang et al Global association between ambient air pollution and blood pressure: A systematic review and meta-analysis. Environmental Pollution 235 (2018) 576e588

Aunque numerosos estudios han investigado la asociación de la contaminación del aire ambiente con la hipertensión y la presión arterial (PA), los resultados fueron inconsistentes. Realizamos una revisión sistemática integral y un metanálisis de estos estudios. Se buscaron en siete bases de datos internacionales y chinas estudios que examinaran las asociaciones de partículas (diámetro <2.5 µm (PM_{2.5}), 2.5-10µm (PM_{2.5-10}) o > 10 µm (PM₁₀)) y gaseoso (dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO)) contaminantes del aire con hipertensión o presión arterial. Se calcularon los odds ratios (OR), los coeficientes de regresión (b) y sus intervalos de confianza del 95% para evaluar la fuerza de las asociaciones. También se realizaron análisis de subgrupos, análisis de sensibilidad y análisis de metarregresión. El metanálisis general mostró asociaciones significativas de exposiciones a largo plazo a PM_{2.5} con hipertensión (OR 1/4 1.05), y de PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂ con DBP (valores b: 0.47e0.86 mmHg). Además, las exposiciones a corto plazo a cuatro (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂), dos (PM_{2.5} y SO₂) y cuatro contaminantes del aire (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y NO₂), se asociaron significativamente con hipertensión (OR: 1.05e1.10), SBP (valores b: 0.53 e0.75 mmHg) y DBP (valores b: 0.15e0.64 mmHg), respectivamente. Los análisis estratificados mostraron una relación generalmente más fuerte entre los estudios de hombres, asiáticos, norteamericanos y áreas con niveles más altos de contaminantes del aire. En conclusión, nuestro estudio indica una asociación positiva entre la contaminación del aire ambiente y el aumento de la presión arterial y la hipertensión. Los factores geográficos y sociodemográficos pueden modificar los efectos prohipertensivos de los contaminantes del aire.

Bo-Yi Yang Ambient air pollution and diabetes: A systematic review and meta-analysis Environmental Research 180 (2020) 108817

Antecedentes: se sugiere que los contaminantes del aire están relacionados con la diabetes tipo 2 (T2D). Dado que se han publicado varios artículos de alta calidad sobre contaminantes del aire y T2D más allá de las últimas revisiones, se justifica una revisión sistemática extendida. Revisamos los estudios epidemiológicos para cuantificar la asociación entre los contaminantes del aire y la diabetes tipo 2, y para responder si los pacientes con diabetes son más vulnerables a los contaminantes del aire.

Métodos: Revisamos sistemáticamente las bases de datos de PubMed y Web of Science con base en las pautas de los elementos de informes preferidos para la revisión sistemática y el metanálisis (PRISMA). Calculamos los odds ratios (OR) o los cocientes de riesgos (HR) y sus intervalos de

confianza (IC) del 95% para evaluar la fuerza de las asociaciones entre contaminantes del aire [p. Ej., Material particulado con diámetro $\leq 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}), material particulado con diámetro $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM₁₀) y dióxido de nitrógeno (NO₂)] y T2D. Evaluamos la calidad y el riesgo de sesgo de los estudios incluidos y calificamos la credibilidad de la evidencia combinada utilizando varias herramientas recomendadas. También realizamos análisis de sensibilidad, análisis de metarregresión y prueba de sesgo de publicación.

Resultados: De 716 artículos identificados, 86 se utilizaron para esta revisión y metanálisis. Los metanálisis mostraron asociaciones significativas de PM_{2.5} con incidencia de T2D (11 estudios; HR = 1.10; IC del 95% = 1.04–1.17 por incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; I₂ = 74.4%) y prevalencia (11 estudios; OR = 1.08; IC 95% = 1.04–1.12 por incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; I₂ = 84.3%), de PM₁₀ con prevalencia T2D (6 estudios; OR = 1.10; IC 95% = 1.03–1.17 por incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; I₂ = 89.5 %) e incidencia (6 estudios; HR = 1.11; IC 95% = 1.00–1.22 por incremento de $\mu\text{g}/\text{m}^3$; I₂ = 70.6%), y de NO₂ con prevalencia T2D (11 estudios; OR = 1.07; IC 95% = 1.04 –1,11 por incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; I₂ = 91,1%). La mayoría de los estudios sobre marcadores de homeostasis de glucosa también mostraron un mayor riesgo con niveles más altos de contaminantes del aire, pero los estudios fueron demasiado heterogéneos para el metanálisis. En general, los pacientes con diabetes pueden ser más vulnerables a la MP.

Conclusiones: publicaciones recientes fortalecieron la evidencia de los efectos adversos de la exposición a los contaminantes del aire ambiente (especialmente para PM) en la diabetes tipo 2 y que los pacientes diabéticos podrían ser más vulnerables a la exposición a los contaminantes del aire.

Huanhuan Zhang et al. Ambient air pollution and gestational diabetes mellitus: A review of evidence from biological mechanisms to population epidemiology.

La diabetes mellitus gestacional (DMG) es una complicación grave del embarazo que podría causar efectos adversos para la salud tanto de las madres como de los fetos, y su prevalencia ha aumentado en todo el mundo. Los estudios experimentales y epidemiológicos sugieren que la contaminación del aire puede ser un factor de riesgo importante de la DMG, pero las conclusiones son inconsistentes. Para proporcionar una descripción completa de la contaminación del aire ambiente en GDM, resumimos la evidencia existente sobre los vínculos biológicos entre la exposición materna a los contaminantes del aire y la GDM con base en estudios de mecanismos. También realizamos un metanálisis cuantitativo basado en estudios epidemiológicos en humanos mediante búsquedas en bases de datos en inglés (Pubmed, Web of Science and Embase) y en bases de datos chinas (Wanfang, CNKI). Como resultado, los estudios de mecanismo limitado indicaron que la disfunción de las células β , la alteración neurohormonal, la inflamación, el estrés oxidativo, el desequilibrio del microbioma intestinal y la resistencia a la insulina pueden estar involucrados en la contaminación del aire y la relación GDM, pero se realizaron pocos estudios para explorar el enlace biológico directo. Además, se incluyeron un total de 13 estudios epidemiológicos en el metanálisis, y los contaminantes atmosféricos considerados incluyeron PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ y O₃. La mayoría de los estudios fueron retrospectivos y se realizaron principalmente en regiones desarrolladas. Los resultados del metanálisis indicaron que la exposición materna del primer trimestre a SO₂ aumentó el riesgo de DMG (odds ratio (OR) estandarizado = 1.392, intervalos de confianza (IC) del 95%: 1.010,

1.773), mientras que O₃ antes del embarazo la exposición se asoció inversamente con el riesgo de DMG (OR estandarizado = 0.981, IC 95%: 0.977, 0.985). No se observaron efectos significativos para PM_{2.5}, PM₁₀ y NO₂. En conclusión, se necesitan estudios de mecanismos adicionales a nivel molecular para proporcionar una lógica persuasiva subyacente a la relación contaminación del aire-GDM. Además, otros factores de riesgo importantes de la DMG, incluido el estilo de vida materno y la exposición al ruido del tráfico que pueden modificar la relación contaminación del aire-DMG, deben considerarse en futuros estudios epidemiológicos. Más estudios prospectivos de cohorte también están garantizados en países en desarrollo con altos niveles de contaminación del aire.

Shu-Jun Fan et al Ambient air pollution and depression: A systematic review with meta- analysis up to 2019. Science of the Total Environment 701 (2020) 134721

Aunque los estudios epidemiológicos han evaluado las asociaciones de la contaminación del aire ambiente con la depresión, los resultados permanecieron mixtos. Para aclarar la naturaleza de la asociación, realizamos una revisión sistemática integral y un metanálisis con el modelo de heterogeneidad de varianza inversa (IVhet) para estimar el efecto de la contaminación del aire ambiente en la depresión. Se realizaron búsquedas en tres bases de datos en inglés y cuatro en chino para estudios epidemiológicos que investigan las asociaciones de partículas ambientales (diámetro 2.5 µg (PM_{2.5}), 10 µg (PM₁₀)) y contaminantes gaseosos (óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y ozono (O₃)) con depresión. Se calcularon los odds ratios (OR) y los correspondientes intervalos de confianza (IC) del 95% para evaluar la fuerza de las asociaciones. Identificamos 22 estudios elegibles de 10 países del mundo. Bajo el modelo IVhet, por aumento de 10 mg/m³ en la exposición a largo plazo a PM_{2.5} (OR: 1.12, IC 95%: 0.97–1.29, I²: 51.6), PM₁₀ (OR: 1.04, IC 95%: 0.88–1.25, I²: 85.7) y NO₂ (OR: 1.05, IC 95%: 0.83–1.34, I²: 83.6), así como también exposición a corto plazo a PM_{2.5} (OR: 1.01, IC 95%: 0.99–1.04, I²: 51.6), PM₁₀ (OR: 1.01, IC 95%: 0.98–1.04, I²: 86.7), SO₂ (OR: 1.03, IC 95%: 0.99–1.07, I²: 71.2) y O₃ (OR: 1.01, IC 95%: 0.99–1.03, I²: 82.2) no se asoció significativamente con depresión. Sin embargo, observamos una asociación significativa entre la exposición a corto plazo de NO₂ (por aumento de 10 mg/m³) y la depresión (OR: 1.02, IC 95%: 1.00–1.04, I²: 65.4). Sin embargo, la heterogeneidad fue alta para todas las estimaciones agrupadas, lo que redujo la credibilidad de la evidencia acumulada. Además, se detectó sesgo de publicación en seis de las ocho metaestimaciones. En conclusión, la exposición a corto plazo al NO₂, pero no a otros contaminantes del aire, se asoció significativamente con la depresión. Dadas las limitaciones, un metanálisis más amplio que incorpore futuros estudios longitudinales bien diseñados, y las investigaciones sobre posibles mecanismos biológicos serán necesarias para obtener un resultado más definitivo.

Robert Dales, MD; Claudia Blanco-Vidal, MA; and Sabit Cakmak, PhD The Association Between Air Pollution and Hospitalization of Patients With Idiopathic Pulmonary Fibrosis in Chile. A Daily Time Series Analysis.

Antecedentes: La fibrosis pulmonar idiopática (FPI) causa disnea progresiva, hipoxemia y muerte en unos pocos años. Poco se sabe sobre el efecto de la contaminación del aire en las exacerbaciones de enfermedades.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN: ¿Son los aumentos agudos de la contaminación del aire un factor de riesgo para la hospitalización de pacientes con un diagnóstico primario de FPI?

DISEÑO Y MÉTODOS DEL ESTUDIO: Los ingresos hospitalarios por IPF están codificados como J84.1 por la Clasificación Internacional de Enfermedades, 10ª Revisión. Utilizando la contaminación del aire ambiental y los datos climáticos de siete estaciones de monitoreo del aire distribuidas en los siete centros urbanos de Santiago, Chile, junto con datos de hospitalización diaria de pacientes de 2001 a 2012, se estableció una asociación lineal entre la contaminación del aire ambiental diaria y los ingresos hospitalarios diarios J84.1. probado usando modelos lineales generalizados.

RESULTADOS: Los niveles promedio de contaminantes para todas las regiones fueron los siguientes: el monóxido de carbono fue de 0.96 ppm, el ozono fue de 64 ppb, el dióxido de nitrógeno (NO₂) fue de 43 ppb, el dióxido de azufre fue de 9 ppb, el material particulado <2.5 mm de diámetro fue de 29 mg/m³ y las partículas <10 mm de diámetro (PM₁₀) fueron 67 mg/m³. Para el área combinada de Santiago, las estimaciones de riesgo relativo de hospitalizaciones J84.1 para todos los contaminantes (excepto el ozono), ajustadas por edad, sexo y clima fueron estadísticamente significativas. En los modelos de dos contaminantes, la importancia de NO₂ y PM₁₀ persistió a pesar de los ajustes para cada uno de los otros contaminantes medidos.

INTERPRETACIÓN: Nuestros resultados sugieren que los aumentos agudos de la contaminación del aire son un factor de riesgo para la hospitalización de pacientes con un diagnóstico primario de FPI.

Hongxi Yang et al. Smog and risk of overall and type-specific cardiovascular diseases: A pooled analysis of 53 cohort studies with 21.09 million participants. Environmental Research 172 (2019) 375–383

Las asociaciones informadas de smog con el riesgo de enfermedad cardiovascular (ECV) y los subtipos de ECV fueron inconsistentes. Se realizaron búsquedas sistemáticas en las bases de datos Pubmed (Medline) y Embase (desde el inicio hasta el 25 de abril de 2018) para identificar los estudios de cohortes que investigan la asociación entre el smog y las ECV y los tipos específicos de ECV. Realizamos un metanálisis para diferentes tipos de contaminantes del aire (PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ y O₃) en el smog con el riesgo de tipos específicos de ECV por separado. Resumimos las estimaciones de efectos específicos del estudio utilizando tanto el modelo de efectos fijos como el modelo de efectos aleatorios. El metanálisis incluyó 35 publicaciones con 53 estudios de cohortes. En general, las asociaciones entre cada aumento de 10 µg/m³ en la exposición a PM_{2.5} y el riesgo de eventos de ECV, eventos de accidente cerebrovascular, eventos de cardiopatía isquémica (IHD) fueron significativas, con riesgos relativos (RR) de 1.11 (intervalo de confianza del 95% : 1.07–1.15), 1.12

(IC 95%: 1.08–1.16) y 1.14 (IC 95%: 1.08–1.21), respectivamente. La exposición a PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ y O₃ se asoció con un mayor riesgo de mortalidad por ECV, con RR de 1.11 (IC del 95%: 1.07–1.15), 1.09 (IC del 95%: 1.02–1.16), 1.23 (95% IC: 1.15–1.31) y 1.03 (IC 95%: 1.02–1.05), respectivamente. En comparación con la exposición a PM₁₀, NO₂ y O₃, la exposición a PM_{2.5} tuvo un mayor riesgo de incidencia de accidente cerebrovascular y de CI (RR 1,12; IC del 95%: 1,05-1,19 para la incidencia de accidente cerebrovascular; 1,19, 1,09-1,30 para la CI). Sin embargo, no se observó evidencia clara de las asociaciones de exposición a PM₁₀ con riesgo de incidencia de ECV, incidencia de accidente cerebrovascular e incidencia de CI. Este metanálisis confirma la evidencia de que la exposición a PM_{2.5} se asoció significativamente con un mayor riesgo de ECV, accidente cerebrovascular y CI. La exposición a PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ y O₃ se asociaron por separado con un mayor riesgo de mortalidad por ECV. Hubo una asociación más fuerte entre la exposición a PM_{2.5} y el riesgo de accidente cerebrovascular y la incidencia de CI. Necesita urgentemente estudios bien diseñados para elaborar los mecanismos biológicos y epidemiológicos que vinculan el smog con las enfermedades cardiovasculares.

Hallazgos principales: en comparación con las exposiciones a PM₁₀, NO₂ y O₃, la exposición a PM_{2.5} se asoció positivamente con un mayor riesgo de accidente cerebrovascular e incidencia de CI. Para los contaminantes del aire y los eventos de ECV, la asociación de NO₂ con el riesgo de mortalidad por ECV es más significativa.

Orellano P, Quaranta N, Reynoso J, Balbi B, Vasquez J (2017) Effect of outdoor air pollution on asthma exacerbations in children and adults: Systematic review and multilevel meta-analysis. PLoS ONE 12(3): e0174050. [https://doi.org/ 10.1371/journal.pone.0174050](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174050)

Las búsquedas en la base de datos recuperaron 208 registros, y finalmente se seleccionaron 22 estudios para el análisis cuantitativo. Todos los contaminantes, excepto SO₂ y PM₁₀, mostraron una asociación significativa con las exacerbaciones del asma (NO₂: 1.024; IC del 95%: 1.005,1.043, SO₂: 1.039; IC del 95%: 0.988,1.094), PM₁₀: 1.024; IC 95%: 0.995,1.053, PM_{2.5}: 1.028; IC 95%: 1.009,1.047, CO: 1.045; 95% CI 1.005, 1.086, O₃: 1.032; IC 95%: 1.005,1.060. En niños, la asociación fue significativa para NO₂, SO₂ y PM_{2.5}.

Global association between ambient air pollution and blood pressure: a systematic review and meta-analysis

Yang, B. Y., Qian, Z., Howard, S. W., Vaughn, M. G., Fan, S. J., Liu, K. K., & Dong, G. H. (2018). Global association between ambient air pollution and blood pressure: A systematic review and meta-analysis. *Environmental pollution* (Barking, Essex : 1987), 235, 576–588. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.001>

Aunque numerosos estudios han investigado la asociación de la contaminación del aire ambiental con la hipertensión y la presión arterial (PA), los resultados han sido inconsistentes. Realizamos una revisión sistemática integral y un metanálisis de estos estudios. Se realizaron búsquedas en siete bases de datos internacionales y chinas en busca de estudios que examinaran las asociaciones de partículas (diámetro <2,5 µm (PM_{2,5}), 2,5-10 µm (PM_{2,5-10}) o > 10 µm (PM₁₀)) y gaseosas (dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), monóxido de

carbón (CO)) contaminantes del aire con hipertensión o BP. Se calcularon los odds ratios (OR), los coeficientes de regresión (β) y sus intervalos de confianza del 95% para evaluar la fuerza de las asociaciones. También se realizaron análisis de subgrupos, análisis de sensibilidad y análisis de metarregresión. El metanálisis general mostró asociaciones significativas de exposiciones a largo plazo a PM_{2.5} con hipertensión (OR = 1.05), y de PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂ con DBP (valores β : 0.47-0.86 mmHg). Además, las exposiciones a corto plazo a cuatro (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂), dos (PM_{2.5} y SO₂) y cuatro contaminantes del aire (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y NO₂) se asociaron significativamente con hipertensión (ORs: 1,05-1,10), PAS (valores β : 0,53-0,75 mmHg) y PAD (valores β : 0,15-0,64 mmHg), respectivamente. Los análisis estratificados mostraron una relación generalmente más fuerte entre los estudios de hombres, asiáticos, norteamericanos y áreas con niveles más altos de contaminantes del aire. En conclusión, nuestro estudio indica una asociación positiva entre la contaminación del aire ambiental y el aumento de la PA e hipertensión. Los factores geográficos y sociodemográficos pueden modificar los efectos prohipertensivos de los contaminantes del aire.

Ambient air pollution and pregnancy-induced hypertensive disorders: a systematic review and meta-analysis

Pedersen, M., Stayner, L., Slama, R., Sørensen, M., Figueras, F., Nieuwenhuijsen, M. J., Raaschou-Nielsen, O., & Dadvand, P. (2014). Ambient air pollution and pregnancy-induced hypertensive disorders: a systematic review and meta-analysis. *Hypertension* (Dallas, Tex. : 1979), 64(3), 494–500. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.114.03545>

Los trastornos hipertensivos inducidos por el embarazo pueden provocar morbilidad y mortalidad materna y perinatal, pero la causa de estas afecciones no se comprende bien. Hemos revisado y realizado sistemáticamente un metanálisis de estudios epidemiológicos que investigan la asociación entre la exposición a la contaminación del aire ambiental y los trastornos hipertensivos inducidos por el embarazo, incluida la hipertensión gestacional y la preeclampsia. Se realizaron búsquedas en bases de datos electrónicas de estudios en inglés que informaron asociaciones entre la contaminación del aire ambiental y los trastornos hipertensivos inducidos por el embarazo publicados entre diciembre de 2009 y diciembre de 2013. Se calcularon estimaciones de riesgo combinadas utilizando modelos de efectos aleatorios para cada exposición que se había examinado en ≥ 4 estudios. Se evaluó la heterogeneidad y el sesgo de publicación. Un total de 17 artículos que evaluaron el impacto de los óxidos de nitrógeno (NO₂, NO_x), el material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}), el monóxido de carbono (CO), el ozono (O₃), la proximidad a las carreteras principales y la densidad del tráfico cumplieron con nuestros criterios de inclusión. . La mayoría de los estudios informaron que la contaminación del aire aumentaba el riesgo de trastornos hipertensivos inducidos por el embarazo. Hubo heterogeneidad significativa en el metanálisis, que incluyó 16 estudios que informaron sobre la hipertensión gestacional y la preeclampsia como resultados separados o combinados; hubo menos heterogeneidad en los hallazgos de los diez estudios que informaron únicamente sobre la preeclampsia. Los metanálisis mostraron un mayor riesgo de trastornos hipertensivos en el embarazo para todos los contaminantes excepto el CO. La razón de posibilidades combinada del metanálisis de efectos aleatorios asociado con un aumento de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{2.5} fue de 1.57 (intervalo de confianza del 95%, 1.26-1.96) para los trastornos hipertensivos combinados inducidos por el embarazo y 1,31 (intervalo de confianza del 95%, 1,14-1,50) para la preeclampsia .

Nuestros resultados sugieren que la exposición a la contaminación del aire aumenta el riesgo de trastornos hipertensivos inducidos por el embarazo.

Global Association of air pollution and conjunctivitis disease: a systematic review and meta-analysis

Chen, R., Yang, J., Zhang, C., Li, B., Bergmann, S., Zeng, F., Wang, H., & Wang, B. (2019). Global Associations of Air Pollution and Conjunctivitis Diseases: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International journal of environmental research and public health*, 16(19), 3652. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193652>

(1) Antecedentes: como la enfermedad ocular más común diagnosticada en los servicios de urgencias, la conjuntivitis ha causado graves cargas sanitarias y económicas en todo el mundo. Sin embargo, si la contaminación del aire puede ser un factor de riesgo de conjuntivitis sigue siendo inconsistente en la evidencia actual. (2) Métodos: se realizaron búsquedas en la literatura sobre la relación entre la contaminación del aire y la conjuntivitis en múltiples bases de datos en inglés antes del 18 de marzo de 2019. Se utilizaron metanálisis, metarregresión y gráficos de embudo para integrar los datos, identificar las fuentes de sesgo, y determinar el sesgo de publicación, respectivamente. (3) Resultados: Se encontraron un total de 2450 artículos, de los cuales finalmente se incluyeron 12. El riesgo relativo agrupado por cada aumento de 10 µg/m³ de contaminación del aire en conjuntivitis fue 1.0006 (IC 95%: 0.9993-1.0019) para CO, 1.0287 (1.0120-1.0457) para NO₂, 1.0089 (1.0030-1.0149) para O₃, 1.0004 (0.9976-1.0032) para PM_{2.5}, 1.0033 (0.9982-1.0083) para PM₁₀ y 1.0045 (0.9908-1.0185) para SO₂. En el subgrupo, PM_{2.5} y O₃ tuvieron un mayor impacto en el riesgo de conjuntivitis en mujeres que en hombres, y en personas <18 años que en las ≥ 18 años. La humedad relativa modificó significativamente el riesgo de O₃ en la conjuntivitis (p = 0.023), lo que explica el 45% de la heterogeneidad entre estudios. (4) Conclusión: a nivel mundial, la contaminación del aire tiene considerables riesgos para la salud ocular. Las mujeres y los jóvenes eran más vulnerables a PM_{2.5}, NO₂ y O₃. Aún se justifica la reducción de los niveles de contaminación del aire para proteger a las poblaciones vulnerables.

Effect of outdoor air pollution on asthma exacerbations in children and adults: systematic review and multilevel meta-analysis

Orellano, P., Quaranta, N., Reynoso, J., Balbi, B., & Vasquez, J. (2017). Effect of outdoor air pollution on asthma exacerbations in children and adults: Systematic review and multilevel meta-analysis. *PLoS one*, 12(3), e0174050. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174050>

Antecedentes: varios estudios observacionales han sugerido que la contaminación del aire exterior puede inducir o agravar el asma. Sin embargo, los resultados epidemiológicos no son concluyentes debido a la presencia de numerosos moduladores que influyen en esta asociación. El objetivo de este estudio fue evaluar la relación entre los contaminantes del aire exterior y las exacerbaciones moderadas o graves del asma en niños y adultos a través de una revisión sistemática y un metanálisis multinivel.

Material y métodos: Se realizaron búsquedas de estudios publicados en inglés en PubMed, Scopus y Google Scholar entre enero de 2000 y octubre de 2016. Estudios que siguieron un diseño de casos cruzados con registros de departamentos de emergencia y / o ingresos hospitalarios como sustitutos del asma moderada o grave. Se seleccionaron las exacerbaciones. Se empleó un metanálisis multinivel, teniendo en cuenta los posibles efectos de agrupamiento dentro de los estudios que examinaban más de un rezago. Se estimaron las odds ratios (OR) y los intervalos de confianza del 95%. Se realizó un análisis de subgrupos en niños de 0 a 18 años y un análisis de sensibilidad basado en la calidad de los estudios incluidos según se define en la Escala de Newcastle-Ottawa. El sesgo de publicación se evaluó mediante la inspección visual de los gráficos en embudo y mediante una búsqueda complementaria de literatura gris. (Número de registro Prospero CRD42015032323).

Resultados: Las búsquedas en las bases de datos recuperaron 208 registros y finalmente se seleccionaron 22 estudios para el análisis cuantitativo. Todos los contaminantes excepto SO₂ y PM₁₀ mostraron una asociación significativa con las exacerbaciones del asma (NO₂: 1.024; IC 95%: 1.005,1.043, SO₂: 1.039; IC 95%: 0.988,1.094), PM₁₀: 1.024; IC del 95%: 0,995, 1,053, PM_{2,5}: 1,028; IC del 95%: 1,009, 1,047, CO: 1,045; IC del 95%: 1,005, 1,086, O₃: 1,032; IC del 95%: 1.005,1.060. En los niños, la asociación fue significativa para NO₂, SO₂ y PM_{2.5}.

Conclusión: este metanálisis proporciona evidencia de la asociación entre los contaminantes del aire seleccionados y las exacerbaciones del asma para diferentes retrasos.

Association between ambient air pollution and Parkinson's disease: a systematic review and meta-analysis

Hu, C. Y., Fang, Y., Li, F. L., Dong, B., Hua, X. G., Jiang, W., Zhang, H., Lyu, Y., & Zhang, X. J. (2019). Association between ambient air pollution and Parkinson's disease: Systematic review and meta-analysis. *Environmental research*, 168, 448–459. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.008>

La contaminación del aire ha sido evaluada como un posible factor de riesgo para la enfermedad de Parkinson (EP), pero los resultados actuales son inconsistentes y no se han combinado. Realizamos una revisión sistemática y un metanálisis para estimar la asociación entre la exposición a largo plazo a la contaminación del aire ambiental y la EP, dada la naturaleza de la etiología de la enfermedad. Se identificó un total de 10 estudios mediante búsquedas en Web of Science, Science Direct y PubMed antes de octubre de 2017. Encontramos un riesgo significativamente mayor de EP con un aumento de 10 partes por mil millones (ppb) en la exposición a óxidos de nitrógeno (NO_x) (riesgo relativo (RR) = 1,06; intervalo de confianza (IC) del 95%: 1,04, 1,09). El RR combinado para la asociación entre la exposición al monóxido de carbono (CO), incremento de 1 parte por millón (ppm) y el riesgo de EP fue 1,65 (IC del 95%: 1,10, 2,48). Los RR combinados para la asociación entre la exposición al dióxido de nitrógeno (NO₂) y al ozono (O₃) por incremento de 1 ppb y el riesgo de EP fueron 1,01 (IC del 95%: 1,00, 1,03) y 1,01 (IC del 95%: 1,00, 1,02) , respectivamente. Hubo una heterogeneidad significativa en el metanálisis de partículas finas (PM_{2.5}), NO₂, dióxido de azufre (SO₂) y CO. Concluimos que la exposición a NO₂, NO_x, CO y O₃ se asociaron con un mayor riesgo de EP , aunque existe un alto riesgo de sesgo. Se necesitan los efectos dosis-respuesta evaluados mediante estudios de alta calidad. Las investigaciones deben expandirse a países de ingresos bajos y / o medianos donde la contaminación del aire interior y exterior es alta. CÁPSULA: La exposición

prolongada al NO₂, NO_x, CO y O₃ ambientales puede aumentar el riesgo de enfermedad de Parkinson.

Short-term association between ambient air pollution and pneumonia in children: a systematic review and meta-analysis of time-series and case-crossover studies

Nhung, N., Amini, H., Schindler, C., Kutlar Joss, M., Dien, T. M., Probst-Hensch, N., Perez, L., & Künzli, N. (2017). Short-term association between ambient air pollution and pneumonia in children: A systematic review and meta-analysis of time-series and case-crossover studies. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 230, 1000–1008. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.063>

La contaminación del aire ambiental se ha asociado con enfermedades respiratorias en los niños. Sin embargo, sus efectos sobre la neumonía pediátrica no se han metaanalizado. Realizamos una revisión sistemática y un metanálisis de la asociación a corto plazo entre la contaminación del aire ambiental y la hospitalización de niños debido a neumonía. Se realizaron búsquedas en Web of Science y PubMed en busca de publicaciones indexadas hasta enero de 2017. El porcentaje de riesgo excesivo (ER%) y los intervalos de confianza (IC) específicos de contaminantes se estimaron mediante modelos de efectos aleatorios para material particulado (PM) con diámetro ≤ 10 (PM₁₀) y ≤ 2.5 μm (PM_{2.5}), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO). Los resultados se estratificaron adicionalmente por subgrupos (niños menores de cinco años, visitas de emergencia versus ingresos hospitalarios, nivel de ingresos de la ubicación del estudio y período de exposición). Se incluyeron diecisiete estudios en el metanálisis. El% de ER por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aumento de contaminantes fue del 1,5% (IC del 95%: 0,6% -2,4%) para PM₁₀ y del 1,8% (IC del 95%: 0,5% -3,1%) para PM_{2,5}. Los valores correspondientes por incremento de 10 ppb de contaminantes gaseosos fueron 2.9% (95% CI: 0.4% -5.3%) para SO₂, 1.7% (95% CI: 0.5% -2.8%) para O₃ y 1.4% (95% CI : 0,4% -2,4%) para NO₂. El porcentaje de ER por 1000 ppb de incremento de CO fue del 0,9% (IC del 95%: 0,0% -1,9%). Las asociaciones no fueron sustancialmente diferentes entre los subgrupos. Este metanálisis muestra una asociación positiva entre los niveles diarios de marcadores de contaminación del aire ambiental y la hospitalización de niños por neumonía. Sin embargo, la falta de estudios de países de ingresos bajos y medianos limita la generalización cuantitativa dado que las susceptibilidades a los efectos adversos de la contaminación del aire pueden ser diferentes en esas poblaciones. La metarregresión de nuestro análisis demostró además un fuerte efecto del nivel de ingresos del país sobre la heterogeneidad.

The impact of prenatal exposure to air pollution on childhood wheezing and asthma: a systematic review

Hehua, Z., Qing, C., Shanyan, G., Qijun, W., & Yuhong, Z. (2017). The impact of prenatal exposure to air pollution on childhood wheezing and asthma: A systematic review. *Environmental research*, 159, 519–530. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.038>

Antecedentes y objetivos: No ha habido un consenso claro sobre si la exposición prenatal a la contaminación del aire contribuye al desarrollo de sibilancias y asma en los niños. Realizamos una revisión sistemática para analizar la asociación entre la exposición a diferentes contaminantes durante el embarazo y el desarrollo de sibilancias y asma infantil.

Métodos: Revisamos sistemáticamente los estudios epidemiológicos publicados hasta el 6 de junio de 2017 disponibles en las bases de datos MEDLINE y Web of Science. Se incluyeron estudios que examinaron la asociación entre la exposición prenatal a cualquier contaminante del aire, excepto el humo del tabaco, y la incidencia o prevalencia de "sibilancias" o "asma" desde el nacimiento hasta los 14 años de edad. Extrajimos las características clave de cada estudio incluido mediante una plantilla de elementos de datos predefinidos. Usamos las listas de verificación del Programa de Habilidades de Evaluación Crítica para evaluar la validez de cada estudio incluido. Realizamos metanálisis generales y de subgrupos para cada asociación resumen exposición-resultado. Se calcularon los odds ratios (OR) agrupados con intervalos de confianza (IC) del 95% mediante un modelo de efectos aleatorios.

Resultados: Dieciocho estudios cumplieron nuestros criterios de elegibilidad. Hubo una notable variabilidad en los métodos de evaluación de la exposición. Las estimaciones generales de riesgo de efectos aleatorios (IC del 95%) de diferentes contaminantes fueron 1.04 (0.94-1.15) hidrocarburos aromáticos (PAH), 1.04 (1.01-1.07) NO₂, 1.4 (0.97-2.03) PM_{2.5} para sibilancias infantiles y 1.07 (1.01-1.14) NO₂, 1 (0.97-1.03) PM_{2.5}, 1.02 (0.98-1.07) SO₂, 1.08 (1.05-1.12) PM₁₀ para el asma infantil. Se observó una heterogeneidad mínima para PAH y SO₂, mientras que se observó cierta heterogeneidad para PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂.

Conclusiones: Las estimaciones de riesgo general y de subgrupos de los metanálisis mostraron asociaciones estadísticamente significativas entre las exposiciones prenatales a NO₂, SO₂ y PM₁₀ y el riesgo de sibilancias y desarrollo de asma en la infancia. No hay pruebas suficientes para demostrar un efecto de la exposición prenatal a BC, CO y O₃ sobre las sibilancias y el asma infantiles. Se necesitan más estudios para examinar los efectos de los compuestos individuales.

Ambient air pollution exposure and risk of depression: a systematic review and meta-analysis of observational studies

Zeng, Y., Lin, R., Liu, L., Liu, Y., & Li, Y. (2019). Ambient air pollution exposure and risk of depression: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Psychiatry research*, 276, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2019.04.019>

Estudios recientes han informado una asociación entre la exposición a la contaminación del aire y la depresión, con resultados inconsistentes. Para abordar esta controversia, realizamos una revisión sistemática y un metanálisis de estudios observacionales publicados que investigaron la contaminación del aire exterior y la depresión. Se realizaron búsquedas en cinco bases de datos electrónicas y finalmente se identificaron quince artículos. Los riesgos de probabilidades agrupados se calcularon por separado en función del tipo de contaminante, la duración de la exposición y el resultado. Los análisis de subgrupos se realizaron en función del diseño, la población, los posibles factores de confusión importantes y los niveles de contaminantes. Encontramos un riesgo significativamente mayor de depresión con la exposición a largo plazo a PM_{2.5} y la exposición a corto plazo a PM₁₀, NO₂, SO₂, CO. No se encontró evidencia en la asociación entre la exposición al O₃ y la depresión. Además, la exposición a altos niveles de contaminantes indica un mayor riesgo de depresión. Nuestros resultados destacan la necesidad de controlar la contaminación del aire para la depresión. Sin embargo, aún se necesitan más estudios con métodos estandarizados para respaldar

los resultados debido a los resultados inconsistentes en los análisis estratificados y las limitaciones metodológicas de los estudios incluidos.

Childhood autism spectrum disorders and exposure to nitrogen dioxide, and particulate matter air pollution: a systematic review and meta-analysis

Flores-Pajot, M. C., Ofner, M., Do, M. T., Lavigne, E., & Villeneuve, P. J. (2016). Childhood autism spectrum disorders and exposure to nitrogen dioxide, and particulate matter air pollution: A review and meta-analysis. *Environmental research*, 151, 763–776. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.030>

Antecedentes y objetivo: Se ha reconocido que los factores genéticos y ambientales desempeñan un papel importante en el autismo. La posibilidad de que la exposición a la contaminación del aire exterior aumente el riesgo de trastorno del espectro autista (TEA) ha sido un área de investigación emergente. A continuación, presentamos una revisión sistemática y un metanálisis de los estudios epidemiológicos publicados que han investigado estas asociaciones.

Métodos: llevamos a cabo una estrategia de búsqueda integral para identificar estudios que investigaran la contaminación del aire exterior y el autismo en niños. En general, siete cohortes y cinco estudios de casos y controles cumplieron los criterios de inclusión para el metanálisis. Resumimos las asociaciones entre la exposición a la contaminación del aire y el TEA en función de las siguientes ventanas de exposición críticas: (i) primer, segundo y tercer trimestre del embarazo, (ii) todo el embarazo y (iii) período posnatal. Se realizó un modelo de metanálisis de efectos aleatorios para derivar estimaciones de riesgo agrupadas para estas exposiciones en todos los estudios.

Resultados: Las metaestimaciones para el cambio en el TEA asociado con un aumento de 10 µg/m³ en la exposición a PM_{2.5} y un aumento de 10 ppb en NO₂ durante el embarazo fueron 1.34 (IC del 95%: 0.83, 2.17) y 1.05 (IC del 95%: 0,99, 1,11), respectivamente. Se observaron asociaciones más fuertes para las exposiciones recibidas después del nacimiento, pero estas estimaciones fueron inestables ya que se basaron en solo dos estudios. La exposición al O₃ se asoció débilmente con el TEA durante el tercer trimestre del embarazo y durante todo el embarazo; sin embargo, estas estimaciones también se basaron en solo dos estudios.

Conclusión: Nuestro metanálisis respalda la hipótesis de que la exposición a la contaminación del aire ambiental está asociada con un mayor riesgo de autismo. Nuestros hallazgos deben interpretarse con cautela debido al número relativamente pequeño de estudios y varios estudios no pudieron controlar otros factores de riesgo clave.

Association between air pollutants and asthma emergency room visits and hospital admissions in time series studies: a systematic review and meta-analysis

Zheng, X. Y., Ding, H., Jiang, L. N., Chen, S. W., Zheng, J. P., Qiu, M., Zhou, Y. X., Chen, Q., & Guan, W. J. (2015). Association between Air Pollutants and Asthma Emergency Room Visits and Hospital

Admissions in Time Series Studies: A Systematic Review and Meta-Analysis. PloS one, 10(9), e0138146. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138146>

Antecedentes: la contaminación del aire constituye un estímulo significativo de las exacerbaciones del asma; sin embargo, los impactos de la exposición a los principales contaminantes del aire en las admisiones hospitalarias relacionadas con el asma y las visitas a la sala de emergencias (ERV) no se han determinado completamente.

Objetivo: Buscamos cuantificar las asociaciones entre la exposición a corto plazo a contaminantes del aire [ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y partículas ≤10 μm (PM₁₀) y PM_{2.5}] y las visitas a la sala de emergencias relacionadas con el asma (ERV) y hospitalizaciones.

Métodos: Se realizaron búsquedas informatizadas sistemáticas sin limitación de idioma. Los riesgos relativos (RR) agrupados y los intervalos de confianza del 95% (IC del 95%) se calcularon mediante modelos de efectos aleatorios. También se realizaron análisis de sensibilidad y análisis de subgrupos.

Resultados: Después de la selección de 246 estudios, 87 se incluyeron en nuestros análisis. Los contaminantes del aire se asociaron con un riesgo significativamente mayor de ERV por asma y hospitalizaciones [O₃: RR (IC del 95%), 1,009 (1,006, 1,011); I² = 87,8%, fracción atribuible a la población (FAP) (IC del 95%): 0,8 (0,6, 1,1); CO: RR (IC del 95%), 1,045 (1,029, 1,061); I² = 85,7%, PAF (IC del 95%): 4,3 (2,8, 5,7); NO₂: RR (IC del 95%), 1,018 (1,014, 1,022); I² = 87,6%, PAF (IC del 95%): 1,8 (1,4, 2,2); SO₂: RR (IC del 95%), 1,011 (1,007, 1,015); I² = 77,1%, PAF (IC del 95%): 1,1 (0,7, 1,5); PM₁₀: RR (IC del 95%), 1,010 (1,008, 1,013); I² = 69,1%, PAF (IC del 95%): 1,1 (0,8, 1,3); PM_{2.5}: RR (IC del 95%), 1,023 (1,015, 1,031); I² = 82,8%, PAF (IC del 95%): 2,3 (1,5, 3,1)]. Los análisis de sensibilidad arrojaron resultados compatibles en comparación con los análisis generales sin sesgo de publicación. Se encontraron asociaciones más fuertes en varones hospitalizados, niños y pacientes ancianos en estaciones cálidas con un retraso de 2 días o más.

Conclusión: Las exposiciones a corto plazo a los contaminantes del aire representan un mayor riesgo de ERV relacionados con el asma y hospitalizaciones que constituyen una considerable utilización de la atención médica y una carga socioeconómica.

Association of short-term and long-term exposure to ambient air pollutants with hypertension: a systematic review and meta-analysis

Cai, Y., Zhang, B., Ke, W., Feng, B., Lin, H., Xiao, J., Zeng, W., Li, X., Tao, J., Yang, Z., Ma, W., & Liu, T. (2016). Associations of Short-Term and Long-Term Exposure to Ambient Air Pollutants With Hypertension: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Hypertension* (Dallas, Tex. : 1979), 68(1), 62–70. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.116.07218>

La hipertensión es una de las principales enfermedades de carga en todo el mundo. Estudios anteriores han indicado que la contaminación del aire podría ser un factor de riesgo de hipertensión, pero los resultados fueron controvertidos. Para llenar este vacío, realizamos un metanálisis de estudios epidemiológicos para investigar las asociaciones de la exposición a corto y largo plazo a los

contaminantes del aire ambiental con la hipertensión. Se realizaron búsquedas en todos los estudios publicados antes del 1 de septiembre de 2015 sobre las asociaciones de ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO₂ y NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) con hipertensión en las bases de datos electrónicas inglesas. Se calculó una razón de probabilidades (OR) agrupada para la hipertensión en asociación con cada aumento de 10 µg/m³ en el contaminante del aire mediante un modelo de efectos aleatorios (para estudios con heterogeneidad significativa) o un modelo de efectos fijos (para estudios sin heterogeneidad). Se identificaron un total de 17 estudios que examinaron los efectos de la exposición a corto plazo (n = 6) y a largo plazo (n = 11) a los contaminantes del aire. Exposición a corto plazo a SO₂ (OR = 1.046, intervalo de confianza [IC] del 95%: 1.012-1.081), PM_{2.5} (OR = 1.069, IC del 95%: 1.003-1.141) y PM₁₀ (OR = 1.024, 95% IC: 1.016-1.032) se asociaron significativamente con la hipertensión. La exposición a largo plazo (un aumento de 10 µg / m (3)) a NO₂ (OR = 1.034, IC del 95%: 1.005-1.063) y PM₁₀ (OR = 1.054, IC del 95%: 1.036-1.072) tuvo asociaciones significativas con la hipertensión. La exposición a otros contaminantes del aire ambiente (exposición a corto plazo a NO₂, O₃ y CO y exposición a largo plazo a NO_x, PM_{2.5} y SO₂) también tuvo relaciones positivas con la hipertensión, pero careció de significación estadística. Nuestros resultados sugieren que la exposición a corto o largo plazo a algunos contaminantes del aire puede aumentar el riesgo de hipertensión.

Ambient air pollution and depression: a systematic review and meta-analysis up to 2019

Fan, S. J., Heinrich, J., Bloom, M. S., Zhao, T. Y., Shi, T. X., Feng, W. R., Sun, Y., Shen, J. C., Yang, Z. C., Yang, B. Y., & Dong, G. H. (2020). Ambient air pollution and depression: A systematic review with meta-analysis up to 2019. *The Science of the total environment*, 701, 134721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134721>

Aunque los estudios epidemiológicos han evaluado las asociaciones de la contaminación del aire ambiental con la depresión, los resultados siguen siendo mixtos. Para aclarar la naturaleza de la asociación, realizamos una revisión sistemática integral y un metanálisis con el modelo de heterogeneidad de varianza inversa (IVhet) para estimar el efecto de la contaminación del aire ambiental sobre la depresión. Se realizaron búsquedas en tres bases de datos en inglés y cuatro en chino para obtener estudios epidemiológicos que investiguen las asociaciones de partículas ambientales (diámetro ≤ 2.5 µm (PM_{2.5}), ≤10 µm (PM₁₀)) y gaseosas (óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), carbono monóxido (CO), dióxido de azufre (SO₂) y ozono (O₃)) contaminantes del aire con depresión. Se calcularon los odds ratios (OR) y los correspondientes intervalos de confianza (IC) del 95% para evaluar la fuerza de las asociaciones. Identificamos 22 estudios elegibles de 10 países del mundo. Bajo el modelo IVhet, por cada 10 µg/m³ de aumento en la exposición a largo plazo a PM_{2.5} (OR: 1.12, 95% CI: 0.97-1.29, I²: 51.6), PM₁₀ (OR: 1.04, 95% CI: 0.88- 1.25, I²: 85.7) y NO₂ (OR: 1.05, IC del 95%: 0.83-1.34, I²: 83.6), así como la exposición a corto plazo a PM_{2.5} (OR: 1.01, IC del 95%: 0.99-1.04, I²: 51.6), PM₁₀ (OR: 1.01, IC del 95%: 0.98-1.04, I²: 86.7), SO₂ (OR: 1.03, IC del 95%: 0.99-1.07, I²: 71.2) y O₃ (OR: 1.01, IC del 95%: 0.99-1.03, I²: 82.2) no se asoció significativamente con la depresión. Sin embargo, observamos una asociación significativa entre la exposición a NO₂ a corto plazo (por cada aumento de 10 µg/m³) y la depresión (OR: 1.02, IC del 95%: 1.00-1.04, I²: 65.4). Sin embargo, la heterogeneidad fue alta para todas las estimaciones agrupadas, lo que redujo la credibilidad de la evidencia acumulada. Además, se detectó sesgo de publicación en seis de las ocho metaestimaciones. En conclusión, la exposición a corto plazo al NO₂, pero no a

otros contaminantes del aire, se asoció significativamente con la depresión. Dadas las limitaciones, será necesario un metanálisis más amplio que incorpore futuros estudios longitudinales bien diseñados e investigaciones sobre los posibles mecanismos biológicos para obtener un resultado más definitivo.

Ambient air pollution and gestational diabetes mellitus: a review of evidence from biological mechanisms to population epidemiology

Zhang, H., Wang, Q., He, S., Wu, K., Ren, M., Dong, H., Di, J., Yu, Z., & Huang, C. (2020). Ambient air pollution and gestational diabetes mellitus: A review of evidence from biological mechanisms to population epidemiology. *The Science of the total environment*, 719, 137349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137349>

Gestational diabetes mellitus (GDM) is a serious complication of pregnancy that could cause adverse health effects on both mothers and fetuses, and its prevalence has been increasing worldwide. Experimental and epidemiological studies suggest that air pollution may be an important risk factor of GDM, but conclusions are inconsistent. To provide a comprehensive overview of ambient air pollution on GDM, we summarized existing evidence concerning biological linkages between maternal exposure to air pollutants and GDM based on mechanism studies. We also performed a quantitative meta-analysis based on human epidemiological studies by searching English databases (Pubmed, Web of Science and Embase) and Chinese databases (Wanfang, CNKI). As a result, the limited mechanism studies indicated that β -cell dysfunction, neurohormonal disturbance, inflammation, oxidative stress, imbalance of gut microbiome and insulin resistance may be involved in air pollution-GDM relationship, but few studies were performed to explore the direct biological linkage. Additionally, a total of 13 epidemiological studies were included in the meta-analysis, and the air pollutants considered included PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ and O₃. Most studies were retrospective and mainly conducted in developed regions. The results of meta-analysis indicated that maternal first trimester exposure to SO₂ increased the risk of GDM (standardized odds ratio (OR) = 1.392, 95% confidence intervals (CI): 1.010, 1.773), while pre-pregnancy O₃ exposure was inversely associated with GDM risk (standardized OR = 0.981, 95% CI: 0.977, 0.985). No significant effects were observed for PM_{2.5}, PM₁₀ and NO₂. In conclusion, additional mechanism studies on the molecular level are needed to provide persuasive rationale underlying the air pollution-GDM relationship. Moreover, other important risk factors of GDM, including maternal lifestyle and road traffic noise exposure that may modify the air pollution-GDM relationship should be considered in future epidemiological studies. More prospective cohort studies are also warranted in developing countries with high levels of air pollution.

Major air pollutants and risk of COPD exacerbations: a systematic review and meta-analysis

Li, J., Sun, S., Tang, R., Qiu, H., Huang, Q., Mason, T. G., & Tian, L. (2016). Major air pollutants and risk of COPD exacerbations: a systematic review and meta-analysis. *International journal of chronic obstructive pulmonary disease*, 11, 3079–3091. <https://doi.org/10.2147/COPD.S122282>

Antecedentes: la exposición a corto plazo a los principales contaminantes del aire (O₃, CO, NO₂, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}) se ha asociado con riesgo respiratorio. Sin embargo, la evidencia sobre el riesgo de

exacerbaciones de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) es aún limitada. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar las asociaciones entre la exposición a corto plazo a los principales contaminantes del aire y el riesgo de exacerbaciones de la EPOC.

Métodos: Después de una búsqueda sistemática hasta el 30 de marzo de 2016, en bases de datos electrónicas en inglés y chino como PubMed, EMBASE y CNKI, se estimaron los riesgos relativos combinados y los intervalos de confianza del 95% mediante el uso del modelo de efectos aleatorios. Además, también se calcularon las fracciones atribuibles a la población (FAP) y se realizó un análisis de subgrupos. La heterogeneidad se evaluó mediante I².

Resultados: Se incluyeron 59 estudios en total. En el modelo de un solo contaminante, los riesgos de EPOC se calcularon por cada aumento de 10 µg/m³ en las concentraciones de contaminantes, con la excepción del CO (100 µg/m³). Hubo una asociación significativa entre la exposición a corto plazo y el riesgo de exacerbación de la EPOC para todos los contaminantes gaseosos y particulados. Las asociaciones fueron más fuertes en lag0 y lag3 para los contaminantes atmosféricos gaseosos y particulados, respectivamente. El análisis de subgrupos no solo confirmó aún más los efectos adversos generales, sino que también redujo las heterogeneidades obviamente. Cuando se asumió una exposición del 100%, los PAF variaron de 0,60% a 4,31%, dependiendo de los contaminantes. Los efectos adversos para la salud de la exposición al SO₂ y NO₂ fueron más significativos en los países de ingresos bajos / medianos que en los países de ingresos altos: SO₂, riesgo relativo: 1.012 (intervalo de confianza del 95%: 1.001, 1.023); y NO₂, riesgo relativo: 1.019 (intervalo de confianza del 95%: 1.014, 1.024).

Conclusión: La exposición a corto plazo a los contaminantes del aire aumenta significativamente la carga de riesgo de exacerbaciones agudas de la EPOC. Controlar la contaminación del aire ambiente proporcionaría beneficios a los pacientes con EPOC.

Short-term exposure to air pollution and morbidity of COPD and asthma in East Asian area: a systematic review and meta-analysis

Zhang, S., Li, G., Tian, L., Guo, Q., & Pan, X. (2016). Short-term exposure to air pollution and morbidity of COPD and asthma in East Asian area: A systematic review and meta-analysis. *Environmental research*, 148, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.03.008>

Antecedentes: la asociación entre la exposición a corto plazo a la contaminación del aire y la morbilidad de la EPOC y el asma se ha observado en muchos estudios. Sin embargo, existe una falta de revisión sistemática de las razones de riesgo generales en el área de Asia oriental para proporcionar evidencia científica para la evaluación de riesgos para la salud.

Métodos: Se llevó a cabo una búsqueda sistemática de la literatura en diciembre de 2014. Los resultados de los estudios elegibles se estratificaron por contaminantes, enfermedades, tipos de utilización del hospital y grupos de edad del sujeto. Para cada par de contaminante-resultado, se realizó un metanálisis para calcular los cocientes de riesgo (RR) agrupados con intervalos de confianza del 95% por cada aumento de 10 µg/m³ de contaminantes (1 mg/m³ en CO). También se

realizó una metarregresión para explorar la fuente de heterogeneidad y los gráficos en embudo para detectar el sesgo de publicación.

Resultados: Según los resultados de 26 estudios, los RR combinados estadísticamente significativos de diferentes contaminantes y grupos de edad variaron de 1,007 (SO₂ en todas las edades) a 1,028 (O₃ en todas las edades) para los ingresos hospitalarios generales por EPOC, 1,011 (SO₂ en todas las edades) a 1.028 (O₃ en todas las edades) para ingresos hospitalarios de emergencia por EPOC, 1.013 (PM₁₀ en todas las edades) a 1.141 (CO en niños) para uso hospitalario de asma de todo tipo, 1.010 (PM₁₀ en todas las edades) a 1.141 (CO en niños) para ingresos hospitalarios generales por asma, y 1,009 (SO₂ en todas las edades) a 1,040 (NO₂ en niños) para los ingresos hospitalarios de emergencia por asma. La asociación entre la contaminación del aire y la morbilidad por asma fue generalmente más fuerte en los niños, pero no significativa en las personas de 15 a 64 años.

Conclusiones: Se encontró evidencia de que la exposición a corto plazo a la contaminación del aire se asoció con un mayor riesgo de uso hospitalario por EPOC y asma en toda la población, ancianos y niños, pero no en personas de 15 a 64 años. Los niños tienden a ser más susceptibles al efecto de la contaminación del aire sobre la morbilidad por asma.

Prenatal ambient air pollution exposure and the risk of stillbirth: a systematic review and meta-analysis of the empirical evidence

Siddika, N., Balogun, H. A., Amegah, A. K., & Jaakkola, J. J. (2016). Prenatal ambient air pollution exposure and the risk of stillbirth: systematic review and meta-analysis of the empirical evidence. *Occupational and environmental medicine*, 73(9), 573–581.

Métodos: Realizamos una búsqueda sistemática en tres bases de datos: PubMed, Scopus y Web of Science, desde su inicio hasta mediados de abril de 2015. Se incluyeron estudios originales de cualquier diseño epidemiológico. Dos investigadores extrajeron los datos de los estudios elegibles. Para calcular las estimaciones de efecto de resumen (EE), se utilizó el modelo de efectos aleatorios con su correspondiente IC del 95%.

Resultados: 13 estudios cumplieron los criterios de inclusión. Aunque no alcanzaron significación estadística, todas las estimaciones del efecto resumido para el riesgo de muerte fetal fueron sistemáticamente elevadas en relación con la exposición prenatal media a NO₂ por 10 ppb (EE = 1.066, IC del 95%: 0.965 a 1.178, n = 3), CO por 0.4 ppm (EE = 1.025, 95% CI 0.985 a 1.066, n = 3), SO₂ por 3 ppb (EE = 1.022, 95% CI 0.984 a 1.062, n = 3), PM_{2.5} por 4 µg / m (3) (EE = 1,021, IC del 95%: 0,996 a 1,046, n = 2) y PM₁₀ por 10 µg / m (3) (EE = 1,014, IC del 95%: 0,948 a 1,085, n = 2). Las estimaciones del efecto para SO₂, CO, PM₁₀ y O₃ fueron más altas para la exposición del tercer trimestre. Dos estudios de series de tiempo utilizaron un período de retraso de no más de 6 días antes de la muerte fetal, y ambos encontraron estimaciones de efectos aumentados para algunos contaminantes.

Conclusiones: El conjunto de pruebas sugiere que la exposición a la contaminación del aire ambiental aumenta el riesgo de muerte fetal. Se necesitan más estudios para fortalecer la evidencia.

Impact of ambient air pollution and wheeze-associated disorders in children in Southeast Asia: a systematic review and meta-analysis

Luong, L., Sly, P. D., Thai, P. K., & Phung, D. (2019). Impact of ambient air pollution and wheeze-associated disorders in children in Southeast Asia: a systematic review and meta-analysis. *Reviews on environmental health*, 34(2), 125–139. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0079>

Hasta ahora se han realizado varias revisiones sistemáticas para examinar el efecto de la contaminación del aire en las enfermedades respiratorias, pero no se ha realizado un metanálisis correspondiente para estimar los tamaños del efecto de las enfermedades / trastornos asociados a las sibilancias, que es una de las principales causas de visitas al departamento de emergencias y hospitalizaciones para niños en todo el mundo. El objetivo de esta revisión es evaluar sistemáticamente la relación entre la contaminación del aire y el riesgo de trastornos asociados a las sibilancias en los niños del sudeste asiático. Se realizaron búsquedas en las bases de datos informatizadas relevantes (PubMed, EMBASE, Web of Science, Scopus y Cochrane library) para publicaciones indexadas hasta julio de 2018. Finalmente, ocho estudios se calificaron para realizar un metanálisis de efectos aleatorios para calcular los tamaños del efecto agrupado. Los resultados muestran que cada aumento de 10 µg/m³ en las concentraciones de PM_{2.5}, PM₁₀ se asoció con un aumento del 1-2% en el riesgo de trastornos asociados con las sibilancias. Se encontraron asociaciones positivas para PM₁₀, SO₂, NO₂, NO_x pero no se encontró asociación para CO y O₃. Confirmamos el fuerte efecto de las partículas finas en la salud respiratoria y recomendamos que se realice un metanálisis actualizado cuando haya más estudios disponibles.

Effects of air pollution on the risk of congenital anomalies: a systematic review and meta-analysis

Chen, E. K., Zmirou-Navier, D., Padilla, C., & Deguen, S. (2014). Effects of air pollution on the risk of congenital anomalies: a systematic review and meta-analysis. *International journal of environmental research and public health*, 11(8), 7642–7668. <https://doi.org/10.3390/ijerph110807642>

Las anomalías congénitas son las principales causas de mortalidad y morbilidad pretérmino y neonatal. Investigamos la asociación entre anomalías congénitas y la exposición de las madres a la contaminación del aire durante el embarazo mediante la combinación de estimaciones de riesgo para una variedad de contaminantes del aire (SO₂, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, CO y O₃) y resultados de anomalías. En la revisión sistemática se incluyeron diecisiete artículos y en el metanálisis se tuvieron en cuenta trece estudios. Las estimaciones combinadas se calcularon por separado según si la métrica de exposición era continua o categórica. Sólo una combinación significativa fue; Las concentraciones de NO₂ se asociaron significativamente con la coartación de la aorta (OR = 1,20 por 10 ppb, IC del 95%, (1,02, 1,41)). Este hallazgo podría deberse a una fuerte heterogeneidad en los diseños de los estudios. Se recomienda encarecidamente mejorar los métodos de evaluación de la exposición, en particular mediciones o modelos espaciales más precisos, una definición estandarizada de casos y un mejor control de los factores de confusión para futuras investigaciones sobre anomalías congénitas en esta área.

Effect modification of the short-term effects of air pollution on morbidity by season: a systematic review and meta-analysis

Bergmann, S., Li, B., Pilot, E., Chen, R., Wang, B., & Yang, J. (2020). Effect modification of the short-term effects of air pollution on morbidity by season: A systematic review and meta-analysis. *The Science of the total environment*, 716, 136985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136985>

Los estudios de los efectos de la contaminación del aire en la salud tradicionalmente han controlado la temperatura ambiente como un factor de confusión y viceversa. Sin embargo, la temporada puede ser un factor importante que contribuya a los efectos adversos para la salud de la contaminación del aire. Dadas las inconsistencias actuales en los resultados de estudios previos sobre el efecto de la modificación de la contaminación del aire sobre la morbilidad por temporada, se realizó una revisión sistemática y un metanálisis para sintetizar la evidencia actual sobre los efectos de la temporada en la contaminación del aire y la morbilidad. Las bases de datos electrónicas que incluyen PubMed, Web of Science, Embase, CNKI y Wanfang se utilizaron para identificar los artículos publicados hasta el 30 de noviembre de 2019. Identificamos 4284 artículos, después de la selección, ochenta artículos cumplieron los criterios de inclusión. Se observó una modificación significativa del efecto de CO, O₃, SO₂ y NO₂ sobre la morbilidad por temporada, con la correspondiente razón de riesgo relativo de 1.0009 (IC del 95%: 1.0001-1.0018), 1.0080 (IC del 95%: 1.0021-1.0138), 0.9828 (95% % CI: 0.9697-0.9962) y 0.9896 (95% CI: 0.9824-0.9968), respectivamente. La estacionalidad modificó significativamente el efecto del CO sobre la neumonía, el efecto del SO₂ sobre la enfermedad cardiovascular, el efecto de PM₁₀ sobre el accidente cerebrovascular y el efecto del O₃ sobre el accidente cerebrovascular, el asma y la neumonía. Las modificaciones del efecto de la contaminación del aire por estación fueron similares entre hombres y mujeres, mientras que las estimaciones del efecto parecen ser mayores entre los niños menores de 18 años y los ancianos de 75 años o más. Se necesitan más investigaciones para comprender mejor los mecanismos subyacentes a la variación estacional del efecto de los contaminantes del aire sobre la morbilidad.

The impact of long-term exposure to ambient air pollution and second-hand smoke on the onset of Parkinson disease: a systematic review and meta-analysis

Han, C., Lu, Y., Cheng, H., Wang, C., & Chan, P. (2020). The impact of long-term exposure to ambient air pollution and second-hand smoke on the onset of Parkinson disease: a review and meta-analysis. *Public health*, 179, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2019.09.020>

Objetivos: La exposición a largo plazo a la contaminación del aire (AP) por partículas y gases puede desencadenar el desarrollo de la enfermedad de Parkinson (EP), pero esta asociación sigue siendo controvertida. La relación entre el humo de segunda mano (SS) y el riesgo de EP tampoco es concluyente. Nuestro objetivo fue revisar sistemáticamente los estudios epidemiológicos que investigan la asociación entre estas exposiciones a AP y el riesgo de EP.

Diseño del estudio: esta fue una revisión sistemática y un metanálisis de estudios que investigaban la relación de la PA y la SS ambientales con el riesgo de EP.

Métodos: Se realizaron búsquedas en las bases de datos PubMed, Embase, Web of Science, Cochrane Library y Google Scholar. Usamos un modelo de efectos aleatorios para derivar estimaciones agrupadas del riesgo relativo (RR) y los correspondientes intervalos de confianza (IC) del 95% por incremento en la concentración de contaminantes. El AP estudiado incluyó material particulado con diámetro aerodinámico <2.5 µm (PM_{2.5}), <10 µm (PM₁₀), dióxidos de nitrógeno (NO₂, NO_x), ozono (O₃) y monóxido de carbono (CO).

Resultados: En total, 21 estudios con 222,051 pacientes con EP fueron elegibles para su inclusión. Encontramos un aumento marginalmente significativo del riesgo de EP con un aumento por cada 10 µg/m³ en la concentración de PM_{2.5} (RR = 1.08, IC del 95% = 0.98-1.19), NO₂ (RR = 1.03, IC del 95% = 0.99-1.07) y O₃ (RR = 1,01, IC del 95% = 1,00-1,02). También se detectó una asociación positiva pero no significativa para el CO (RR = 1,32, IC del 95% = 0,82-2,11). Además, se observó una relación inversa PD-SS independientemente de las ocasiones y el momento de exposición (en el hogar: RR = 0,73, IC del 95% = 0,56-0,95; en el trabajo: RR = 0,82, IC del 95% = 0,57-1,17; en niños: RR = 0,91, IC del 95% = 0,76-1,08). Tanto los análisis de sensibilidad como los de subgrupos generaron resultados comparables con los de los análisis generales.

Conclusiones: Nuestro estudio sugirió que la exposición a PM_{2.5}, NO₂ y O₃ podría contribuir a un mayor riesgo de EP, mientras que el SS confiere un menor riesgo de EP. Las estrategias de salud pública y ambiental que tienen como objetivo reducir los niveles de PA al aire libre podrían reducir la carga de la EP. En el futuro se justifican más estudios de cohortes prospectivos con mediciones de exposición personal.

ID: 42. Maternal air pollution exposure and congenital heart defects in offspring: a systematic review and meta-analysis

Hu, C. Y., Huang, K., Fang, Y., Yang, X. J., Ding, K., Jiang, W., Hua, X. G., Huang, D. Y., Jiang, Z. X., & Zhang, X. J. (2020). Maternal air pollution exposure and congenital heart defects in offspring: A systematic review and meta-analysis. *Chemosphere*, 253, 126668. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126668>

Antecedentes: los defectos cardíacos congénitos (CC) tienen una causa multifactorial con un fuerte componente genético y muchos desencadenantes ambientales. Un cuerpo emergente de estudios empíricos sugiere que la contaminación del aire es un contribuyente importante al desarrollo de las enfermedades del corazón, sin embargo, todavía existe cierta controversia sobre la evidencia actual y, según el conocimiento de los autores, ningún estudio ha revisado la evidencia más reciente.

Objetivos: Realizamos una revisión sistemática y un metanálisis de la literatura epidemiológica para investigar la relación entre la exposición materna a la contaminación del aire y el riesgo de cardiopatía coronaria en la descendencia. También se examinó la presencia de heterogeneidad y sesgo de publicación en los estudios disponibles.

Métodos: Se realizó una extensa búsqueda bibliográfica de estudios epidemiológicos relacionados con la contaminación del aire y las enfermedades del corazón, publicados en idioma inglés, hasta el 1 de agosto de 2019. Se calcularon estimaciones de riesgo resumidas de combinaciones de

contaminación-resultado para i) riesgo por incremento específico de concentración y ii) riesgo a nivel de exposición alto versus bajo en cada estudio utilizando un modelo de efectos fijos o un modelo de efectos aleatorios.

Resultados: finalmente se incluyeron un total de 26 estudios. En los metanálisis, la exposición a monóxido de carbono (CO) alta versus baja se asoció con un mayor riesgo de tetralogía de Fallot [razón de probabilidades (OR) = 1.21, intervalo de confianza (IC) del 95%: 1.04-1.41], pero partículas La exposición $\leq 5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) se asoció marginalmente con ella. Se encontró un mayor riesgo de defectos del tabique auricular (ASD) por cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 10 ppb en la exposición al material particulado $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM₁₀) y al ozono (O₃), respectivamente (OR = 1.04, IC del 95%: 1.00-1.09 ; OR = 1,09, IC del 95%: 1,02-1,17). La exposición categórica al dióxido de nitrógeno (NO₂) se asoció con un mayor riesgo de coartación de la aorta (OR para alto versus bajo = 1,14, IC del 95%: 1,02-1,26). Los análisis de otras combinaciones no arrojaron asociaciones estadísticamente significativas. Los análisis sensibles mostraron hallazgos similares.

Conclusiones: Las estimaciones del efecto resumido de este estudio sugieren asociaciones estadísticamente significativas entre un mayor riesgo de subtipos específicos de CC y las exposiciones a PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, CO y O₃. Se necesitan más estudios, especialmente realizados en países en desarrollo, con mejoras en la evaluación de la exposición, la armonización de resultados y la comprensión mecanicista para elaborar las asociaciones sugerentes.

Association between air pollutants and development of chronic kidney disease: a systematic review and meta-analysis

Wu, M. Y., Lo, W. C., Chao, C. T., Wu, M. S., & Chiang, C. K. (2020). Association between air pollutants and development of chronic kidney disease: A systematic review and meta-analysis. *The Science of the total environment*, 706, 135522. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135522>

Antecedentes: la asociación entre la enfermedad renal crónica incidente (ERC) o la enfermedad renal en etapa terminal (ESRD) y la exposición a la contaminación del aire exterior está en debate. Nuestro objetivo fue examinar esta relación sobre la base de una revisión sistemática con metanálisis de efectos aleatorios.

Métodos: Examinamos la literatura sobre la evaluación de la exposición a la contaminación del aire a largo plazo en la población general mediante una búsqueda electrónica en PubMed, Medline, Embase y Cochrane Library desde el inicio hasta el 20 de octubre de 2019. Estudios observacionales que investigan la asociación entre la exposición a largo plazo a Se incluyeron contaminantes del aire exterior gaseosos (CO, SO₂, NO₂, O₃) o particulados (PM_{2.5} o PM₁₀) y ERC, ESRD o disfunción renal, y se estimaron los riesgos resumidos.

Resultados: de 4419 artículos identificados, 23 cumplieron con nuestros criterios de inclusión después de la selección y 14 se incluyeron en el metanálisis. Las estimaciones del efecto agrupado tenían los siguientes cocientes de riesgos (RR) resumidos para la ERC: 1,10 (intervalos de confianza [IC] del 95%: 1,00; 1,21; derivado de cuatro estudios) por aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{2.5} y 1,16 (IC del 95%: 1,05 , 1,29; derivado de cuatro estudios) para PM₁₀; 1,31 (IC del 95%: 0,86; 2,00; derivado

de dos estudios) por aumento de 10 ppm de CO; y 1,11 (IC del 95%: 1,09; 1,14; derivado de tres estudios) por cada 10 ppb de aumento de NO₂. Para el efecto combinado sobre la TFG_e, los aumentos de PM₁₀ y PM_{2,5} (de 10 µg/m³) se asociaron con una disminución de la TFG_e en -0,83 (IC del 95%: -1,54; -0,12; derivado de dos estudios) y -4,11 (95% IC -12,64, 4,42; derivado de dos estudios) ml / min / 1,73 m², respectivamente.

Conclusiones: Se observó que la contaminación del aire se asocia con ERC y deterioro de la función renal. Aunque se requieren más estudios longitudinales, argumentamos que la contaminación del aire es perniciosa para la salud renal.

The impact of short-term exposure to air pollution on the onset of out-of-hospital cardiac arrest: a systematic review and meta-analysis

Zhao, R., Chen, S., Wang, W., Huang, J., Wang, K., Liu, L., & Wei, S. (2017). The impact of short-term exposure to air pollutants on the onset of out-of-hospital cardiac arrest: A systematic review and meta-analysis. *International journal of cardiology*, 226, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2016.10.053>

Antecedentes: Se consideró que la exposición aguda a la contaminación del aire exterior estaba asociada con la incidencia de paro cardíaco extrahospitalario (OHCA). Pero la relación entre contaminantes atmosféricos específicos y OHCA sigue siendo controvertida. Realizamos una revisión sistemática y un metanálisis para evaluar cuantitativamente los efectos agudos de los contaminantes del aire, incluidas las partículas (PM₁₀ y PM_{2,5}), el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el monóxido de carbono (CO) y el ozono (O₃) en el inicio de OHCA.

Métodos: Se realizaron búsquedas en seis bases de datos para identificar estudios que analizaran la asociación entre OHCA y los principales contaminantes del aire. Resumimos las estimaciones agrupadas mediante modelos de efectos aleatorios. La heterogeneidad dentro de los estudios se evaluó mediante las estadísticas Q e I² de Cochran. Se construyeron gráficos en embudo, la prueba de regresión de Egger y el método de correlación de rango de Begg para evaluar el sesgo de publicación. También se realizaron análisis de subgrupos y análisis de sensibilidad para evaluar las posibles fuentes de heterogeneidad.

Resultados: Un total de 15 estudios cumplieron los criterios de inclusión. Se encontró que PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂ y O₃ estaban significativamente asociados con un aumento en el riesgo de OHCA (PM₁₀ 1.021, IC del 95%: 1.006-1.037; PM_{2,5} 1.041, IC del 95%: 1.012-1.071; NO₂ 1.015, 95% IC: 1,008-1,030 y O₃ 1,016, IC del 95%: 1,008-1,024). La exposición aguda a SO₂ y CO no se asoció con la incidencia de OHCA. Los análisis adicionales verificaron los hallazgos en los análisis generales excepto SO₂ y NO₂. Las fracciones atribuibles a la población de PM₁₀, PM_{2,5} y O₃ fueron 2.1%, 3.9% y 1.6%, respectivamente.

Conclusión: La evidencia actual confirmó las asociaciones entre la exposición a corto plazo a PM_{2,5}, PM₁₀ y O₃ y un alto riesgo de OHCA, observándose la asociación más fuerte para PM_{2,5}.

Premature births in Spain: Measuring the impact of air pollution using time series analyses

Arroyo, V., Linares, C., & Díaz, J. (2019). Premature births in Spain: Measuring the impact of air pollution using time series analyses. *The Science of the total environment*, 660, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.470>

Antecedentes: el parto prematuro (<37 semanas de gestación) es el principal indicador de muerte neonatal durante el primer mes de vida y la segunda causa de muerte en niños menores de cinco años. Hay 15 millones de nacimientos prematuros (PTB) en todo el mundo. La contaminación del aire en las ciudades, principalmente el resultado del tráfico urbano, tiene un gran impacto en los PTB, aunque hay pocos estudios realizados sobre este tema a nivel de país. El objetivo de este estudio es cuantificar los riesgos relativos (RR) y el riesgo atribuible poblacional (RAP) de las concentraciones de contaminantes en los PTB en España, y analizar los trimestres más susceptibles.

Métodos: Para cada provincia se calcularon los PTB promedios semanales (CIE-10: P07.2-P07.3) durante el período 2001-2009 así como las concentraciones promedio semanales de PM₁₀, NO₂ y O₃. Se realizaron estimaciones de RR y PAR utilizando modelos lineales generalizados con enlace de Poisson, controlando por la tendencia, la estacionalidad, la naturaleza autorregresiva de la serie y la influencia de la temperatura en períodos de olas de calor y / o frío. Se realizó un metaanálisis para estimar RR y PAR a nivel global a partir del RR obtenido para cada una de las provincias.

Resultados: Para toda España, el RR global de TBP por impacto de PM₁₀ fue de 1.071 (1.049, 1.093) y 1.150 (1.084, 1.220) para NO₂, sin asociación detectada para O₃. Por lo tanto, con disminuciones de 10 µg/m³ en las concentraciones de PM₁₀ y NO₂, se podrían haber evitado alrededor del 12,5% y el 4,5% de los PTB respectivamente.

Conclusiones: Alrededor del 1,35% de los TBP que se produjeron en España durante el período de estudio pueden atribuirse a la contaminación atmosférica. La adopción de medidas estructurales para reducir estos contaminantes atmosféricos debería traducirse en una disminución del número de PTB en España.

Impact of weather changes on air quality and related mortality in Spain over a 25 year period [1993-2017]

Borge, R., Requía, W. J., Yagüe, C., Jhun, I., & Koutrakis, P. (2019). Impact of weather changes on air quality and related mortality in Spain over a 25 year period [1993-2017]. *Environment international*, 133(Pt B), 105272. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105272>

El cambio climático es un importante problema de salud pública. Además de sus impactos directos sobre los patrones de temperatura y los eventos climáticos extremos, el cambio climático afecta la salud pública indirectamente a través de su influencia en la calidad del aire. Las tendencias de la contaminación no solo se ven afectadas por los cambios en las emisiones, sino también por los cambios climáticos. En este trabajo analizamos la evolución de la calidad del aire en España de importantes contaminantes atmosféricos (C6H6, CO, NO₂, NO_x, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂) registrados durante los últimos 25 años, de 1993 a 2017. Encontramos reducciones sustanciales en los niveles

de concentración ambiental para todos los contaminantes estudiados excepto el O₃. Para evaluar la influencia de los cambios climáticos recientes en las tendencias de la calidad del aire, aplicamos modelos aditivos generalizados (GAM) utilizando suavizado no paramétrico; con y sin ajustar los parámetros meteorológicos, incluida la temperatura, la velocidad del viento, la humedad y la frecuencia de las precipitaciones. La diferencia de pendientes anuales estimada por los modelos sin y con ajuste de estas variables meteorológicas representa el impacto de los cambios climáticos en las tendencias de los contaminantes, es decir, la 'penalización climática'. Los análisis se estratificaron estacional y geográficamente para tener en cuenta las diferencias temporales y regionales en España. Los resultados fueron metanalizados para estimar las sanciones climáticas sobre las tendencias de concentración ambiental a nivel nacional, así como el impacto en la mortalidad de los contaminantes más relevantes. Encontramos sanciones significativas para la mayoría de los contaminantes, lo que implica que la calidad del aire habría mejorado aún más durante nuestro período de estudio si las condiciones climáticas se hubieran mantenido constantes. Las mayores influencias climáticas se encontraron para PM₁₀, con penalizaciones estacionales de hasta 22 µg·m⁻³ acumuladas durante el período de 25 años en algunas regiones. El metanálisis nacional muestra penalizaciones de 0,060 µg·m⁻³ por año (intervalo de confianza del 95%, IC: 0,004, 0,116) en los meses fríos y 0,127 µg·m⁻³ por año (IC del 95%: 0,089, 0,164) en meses cálidos. Sanciones de esta magnitud corresponderían a 129 muertes anuales (IC del 95%: 25, 233), es decir, aproximadamente 3200 muertes durante el período de 25 años en España. Según nuestros resultados, los beneficios para la salud de las recientes reducciones de emisiones de este contaminante en España habrían sido hasta un 10% mayores si las condiciones meteorológicas se hubieran mantenido constantes durante los últimos 25 años.

Smog and risk of overall and type-specific cardiovascular disease: a pooled analysis of 53 cohort studies with 21.09 million participants

Yang, H., Li, S., Sun, L., Zhang, X., Cao, Z., Xu, C., Cao, X., Cheng, Y., Yan, T., Liu, T., & Wang, Y. (2019). Smog and risk of overall and type-specific cardiovascular diseases: A pooled analysis of 53 cohort studies with 21.09 million participants. *Environmental research*, 172, 375–383. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.040>

Las asociaciones informadas de smog con el riesgo de enfermedad cardiovascular (ECV) y los subtipos de ECV fueron inconsistentes. Se realizaron búsquedas sistemáticas en las bases de datos Pubmed (Medline) y Embase (desde el inicio hasta el 25 de abril de 2018) para identificar los estudios de cohortes que investigan la asociación entre el smog y las ECV y tipos específicos de ECV. Realizamos un metanálisis para diferentes tipos de contaminantes del aire (PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ y O₃) en el smog con el riesgo de tipos específicos de ECV por separado. Resumimos las estimaciones del efecto específico del estudio mediante el modelo de efectos fijos y el modelo de efectos aleatorios. El metanálisis incluyó 35 publicaciones con 53 estudios de cohortes. En general, las asociaciones entre por 10 µg/m³ de aumento en la exposición a PM_{2.5} y el riesgo de eventos de ECV, eventos de accidente cerebrovascular, eventos de cardiopatía isquémica (CI) fueron significativas, con riesgos relativos (RR) de 1,11 (intervalo de confianza del 95%: 1,07-1,15), 1,12 (IC del 95%: 1,08-1,16) y 1,14 (IC del 95%: 1,08-1,21), respectivamente. La exposición a PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ y O₃ se asoció con un mayor riesgo de mortalidad por ECV, con RR de 1,11 (IC del 95%: 1,07-1,15), 1,09 (IC del 95%: 1,02-1,16), 1,23 (95% IC: 1,15-1,31) y 1,03 (IC del 95%: 1,02-1,05), respectivamente. En comparación

con la exposición a PM₁₀, NO₂ y O₃, la exposición a PM_{2,5} tuvo un mayor riesgo de incidencia de accidente cerebrovascular e incidencia de CI (RR 1,12; IC del 95%: 1,05-1,19 para la incidencia de accidente cerebrovascular; 1,19; 1,09-1,30 para la CI). Sin embargo, no se observaron pruebas claras de las asociaciones de la exposición a PM₁₀ con el riesgo de incidencia de ECV, incidencia de accidente cerebrovascular e incidencia de CI. Este metanálisis confirma la evidencia de que la exposición a PM_{2,5} se asoció significativamente con un mayor riesgo de ECV, accidente cerebrovascular e IHD. La exposición a PM_{2,5}, PM₁₀, NO₂ y O₃ se asoció por separado con un mayor riesgo de mortalidad por ECV. Hubo una asociación más fuerte entre la exposición a PM_{2,5} y el riesgo de accidente cerebrovascular y la incidencia de CI. Se necesitan con urgencia estudios bien diseñados para seguir elaborando los mecanismos biológicos y epidemiológicos que vinculan el smog con las ECV.

RESULTADOS PRINCIPALES: En comparación con las exposiciones a PM₁₀, NO₂ y O₃, la exposición a PM_{2,5} se asoció positivamente con un mayor riesgo de accidente cerebrovascular e incidencia de IHD. Para los contaminantes del aire y los eventos de ECV, la asociación del NO₂ con el riesgo de mortalidad por ECV es más significativa.

13 ANEXO 3. RECOPIACIÓN DE NORMATIVA A NIVEL INTERNACIONAL POR REGIONES OMS.

Extraído del papper: Time to harmonize national ambient air quality standards for global health equity. Metern Kutlar Joss el al. 2017.

	Ozone (O3) µg/m3				Nitrogen dioxide (NO2) µg/m3				
	O3 1 hour	O3 8-hr daily max	other	year set, revised, or published	NO2 1-h	NO2 24 hours	NO2 1 year	NO2 other	year set, revised, or published
WHO AQGs		100		2006	200		40		2006
WHO REGIONS AQGs									
European Region									
EU Directive 2008/50/EC	N/A	120		2008	200	other	40		2008
<i>Austria</i>	other	other	Target value 8hmax 120	2010	200	other	30	24h target 80	2012
<i>Belgium</i>	other	120		!	200	other	40		!
<i>Bulgaria</i>	N/A	N/A		2011	N/A	N/A	N/A		2011
<i>Croatia</i>	other	120	180 (1h) info threshold	2010/2014	200	other	40	Nox 30	2010/2014
<i>Cyprus</i>	other	120			200	other	40		
<i>Czech Republic</i>	other	120			200	other	40		
<i>Denmark</i>	other	120		2010	200	other	40		2010
<i>Estonia</i>	other	120			200	other	40		
<i>Finland</i>	other	120		2011	200	other	40		2011
<i>France</i>	other	120		2012	200	other	40	Nox 30(Y)	2012
<i>Germany</i>	N/A	N/A		2002	200	other	40	Nox 30 (y)	2002
<i>Greece</i>	other	120			200	other	40		
<i>Hungary</i>	other	120			200	other	40		
<i>Ireland</i>	other	other	0 (1h) information threshold	2011	200	other	40	NOx 30 (1y)	2011
<i>Italy</i>	N/A	N/A		2010	200	other	40	NOx 30 (1y)	2010
<i>Latvia</i>	other	120			200	other	40		
<i>Lithuania</i>	other	120		2010	200	other	40	NOx 30 (1y)	2010
<i>Luxemburg</i>	other	120		2011	200	other	40		2011
<i>Malta</i>	other	120		2015	200	other	40		2015
<i>The Netherlands</i>	other	120		<2006	200	other	40		<2006
<i>Poland</i>	other	other	alert value 120 (8h)	2012	200	other	40		2012
<i>Portugal</i>	other	120			200	other	40		
<i>Romania</i>	other	120			200	other	40		
<i>Slovakia</i>	other	120			200	other	40		
<i>Slovenia</i>	other	120			200	other	40	Nox 30	
<i>Spain</i>	other	120		2011	200	other	40		2011
<i>Sweden</i>	other	120	180 information threshold	2010	90	60	40		2010
<i>United Kingdom</i>	other	100		2010	200	other	40	Nox 30 (y)	2010

	Ozone (O3) µg/m3				Nitrogen dioxide (NO2) µg/m3				
	O3 1 hour	O3 8-hr daily max	other	year set, revised, or published	NO2 1-h	NO2 24 hours	NO2 1 year	NO2 other	year set, revised, or published
Albania	N/A	N/A	65 (1y)	2003	250	other	40	4hmax 95	2003
Andorra	other	120		2009	200	other	40	NOx 30 (annual)	2009
Armenia	N/A	N/A		2006	other	other	other	time 85 (24h?)MPC 40 (1y?)	2006
Azerbaijan	N/A	N/A		2011	other	40	N/A	NOx MAC40	2011
Belarus	other	120		2010	N/A	N/A	N/A		2010
Bosnia and Herzegovina	other	120		2012	200	85	40	Nox 30(1y)	2012
Georgia	N/A	N/A		2001	N/A	N/A	other	MAC 40 (1y)	2001
Iceland	other	120		2003	N/A	N/A	40	NOx 30 (annual)	2002
Israel	other	140		2014	other	200	40		2014
Kazakhstan	N/A	N/A		2012	other	40	N/A		2012
Kyrgyzstan	N/A	other	30 (24h) MAC 160	!	other	40	N/A	MAC 85	!
Monaco									
Montenegro	other	N/A	180 (1h) info threshold	2015	200	other	40		2015
Norway	other	120		2007	200	other	N/A		2007
Republic of Moldova	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Russian Federation	other	other	30 24h	!	other	N/A	40	85 (20min)	!
San Marino	N/A	N/A		2012	N/A	N/A	N/A		2012
Serbia	N/A	N/A		2009	150	85	40		2009
Switzerland	120	other		2015	other	80	30		2015
Tajikistan	N/A	N/A		2010	N/A	other	other	MAC 40	2010
Former Yugoslav Republic of Macedonia	other	120		2011	200	other	40		2011
Turkey	N/A	N/A		2008	300	other	N/A		2008
Turkmenistan	N/A	N/A		1996	other	40	other	MAC 85	1996
Ukraine	N/A	N/A		2001	N/A	other	other	MAC40	2001
Uzbekistan	N/A	N/A		2010	other	60	40		2010
Region of the Americas									
Antigua and Barbuda	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Argentina	196	other	city region with diff. values	2013	other	other	N/A	0.45 ppm NOx (1h)	2013
Bahamas	200	110			200	N/A	40		
Barbados	N/A	N/A		2000	N/A	N/A	N/A		2000
Belize	N/A	N/A		2003	N/A	N/A	N/A		2003
Bolivia (Plurinational State of)	236	other	city region with diff. values	2013	400	150	N/A	city region with diff. AQS	2013
Brazil	160	other		2013	320	other	100		2013
Canada	N/A	135	city region with diff. values	2015	N/A	N/A	N/A	city region with diff. AQS	2013

	Ozone (O ₃) µg/m ³				Nitrogen dioxide (NO ₂) µg/m ³				
	O ₃ 1 hour	O ₃ 8-hr daily max	other	year set, revised, or published	NO ₂ 1-h	NO ₂ 24 hours	NO ₂ 1 year	NO ₂ other	year set, revised, or published
Chile	N/A	120		2013	400	other	100		2013
Colombia	120	80		2013	200	150	100		2013
Costa Rica	160	other		2013	400	other	100		2013
Cuba	N/A	N/A		2013	N/A	N/A	N/A		2013
Dominica	N/A	N/A		2013	N/A	N/A	N/A		2013
Dominican Republic	235	160		2003	400	300	100		2003
Ecuador	160	120		2013	other	150	100		2013
El Salvador	235	120		2013	other	150	100		2013
Grenada									
Guatemala	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Guyana	N/A	N/A		2000	N/A	N/A	N/A		2000
Haiti	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Honduras	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Jamaica	235	other		2013	100	other	N/A		2013
Mexico	216	157		2014	395	other	100		2014
Nicaragua	235	160		2013	400	other	100		2013
Panama	235	157		2013	other	150	100		2013
Paraguay	other	120		2015	200	other	40		2015
Peru	other	120		2013	200	other	100		2013
Saint Kitts and Nevis	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Saint Lucia	N/A	N/A		2005	N/A	N/A	N/A		2005
Saint Vincent and the Grenadines									
Suriname	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Trinidad and Tobago	other	120		2014	200	other	40		2014
United States of America	other	140	city region with diff. AQS	2016	188	other	100	city region with diff. AQS	2016
Uruguay	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Venezuela (Bolivarian Republic of)	200	160		2013	367	300	100		2013
African Region									
Algeria	N/A	other	200 (?h)	2006	other	other	N/A	200 (?h)	2006
Angola	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Benin	N/A	160	=0.08ppm(8h)	2001	other	150	100		2001
Botswana	235	157		2000	400	200	100		2000
Burkina Faso	150	150	0-200 (1h), 150-300 8hmax	2000	170	other	N/A		2000
Burundi	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		

	Ozone (O3) µg/m3				Nitrogen dioxide (NO2) µg/m3				
	O3 1 hour	O3 8-hr daily max	other	year set, revised, or published	NO2 1-h	NO2 24 hours	NO2 1 year	NO2 other	year set, revised, or published
Cameroon	N/A	100			200	N/A	40		
Cabo Verde									
Central African Republic	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Chad	N/A	N/A		2016	N/A	N/A	N/A		2016
Comoros									
Congo	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Côte d'Ivoire	N/A	N/A		2015	N/A	N/A	N/A		2015
Democratic Republic of the Congo	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Equatorial Guinea									
Eritrea	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Ethiopia	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Gabon	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Gambia	N/A	N/A			N/A	N/A	40		
Ghana	N/A	N/A		2016	200	60	N/A		2016
Guinea	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Guinea-Bissau									
Kenya	200	120		2014	382	191	95		2014
Lesotho	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Liberia	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Madagascar	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Malawi	260	other	80 (4h)	2005	140	other	60		2005
Mali	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Mauritania									
Mauritius	94	other		1998	other	187	N/A		1998
Mozambique	160	other	24h 50 1y 70	2005	400	200	100		2005
Namibia	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Niger									
Nigeria	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Rwanda	240	other	(8h) 1.25 ppm too high?	2014	380	190	96	150 (1month)	2014
Sao Tome and Principe									
Senegal	other	120		2003	200	other	40		2003
Seychelles	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Sierra Leone									
South Africa	other	120		2009	200	other	40		2009

	Ozone (O3) µg/m3				Nitrogen dioxide (NO2) µg/m3				
	O3 1 hour	O3 8-hr daily max	other	year set, revised, or published	NO2 1-h	NO2 24 hours	NO2 1 year	NO2 other	year set, revised, or published
South Sudan									
Swaziland	N/A	N/A		2012	N/A	N/A	40		2012
Togo	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Uganda	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
United Republic of Tanzania	other	120		2007	150	120	other	0.1 ug/m3 annual mean	2007
Zambia	N/A	N/A		1996	400	150	N/A		1996
Zimbabwe	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Eastern Mediterranean Region									
Afghanistan	N/A	100		2010	200	other	40		2010
Bahrain									
Djibouti									
Egypt	200	120		1994	400	150	N/A		1994
Iran (Islamic Republic of)	other	100		2011	N/A	N/A	40		2011
Iraq	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Jordan	N/A	N/A		!	N/A	N/A	N/A		!
Kuwait	other	100		!	200	other	40		!
Lebanon	150	100		!	200	150	100		!
Libya									
Morocco	N/A	N/A		2009	other	20	50		2009
Oman									
Pakistan	130	other		2010	other	80	40		2010
Qatar									
Saudi Arabia	235	157		!	660	other	100		!
Somalia									
Sudan									
Syrian Arab Republic	N/A	N/A		2011	200	N/A	N/A		2011
Tunisia									
United Arab Emirates									
Yemen									
South-East Asia									
Bangladesh	235	157		2005	N/A	N/A	100		2005
Bhutan	N/A	N/A			N/A	80	60		
Democratic People's Republic of Korea									
India	180	100		2009	other	80	40		2009

	Ozone (O3) µg/m3				Nitrogen dioxide (NO2) µg/m3				
	O3 1 hour	O3 8-hr daily max	other	year set, revised, or published	NO2 1-h	NO2 24 hours	NO2 1 year	NO2 other	year set, revised, or published
Indonesia	235	other		2010	other	150	100		2010
Maldives	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Myanmar	N/A	N/A		2014	N/A	N/A	N/A		2014
Nepal	N/A	N/A		2003	other	80	40		2003
Sri Lanka	200	other		2008	250	100	N/A	150 (8 hr)	2008
Thailand	200	140		2010	other	320	57		2010
Timor-Leste	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Western pacific									
Australia	200	170		2008	230	other	60		2008
Brunei Darussalam	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Cambodia	200	other		2000	300	100	N/A		2000
China	200	160	city region with diff. values	2014	200	80	40	city region with diff. values	2014
Cook Islands									
Fiji	other	100			200	other	40		
Japan	118	other		!	other	113	N/A		!
Kiribati	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Lao People's Democratic Republic	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Malaysia	200	120		2015	320	75	N/A		2015
Marshall Islands	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Micronesia (Federated States of)	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Mongolia	N/A	100		2007	other	40	30	85 (20 mins)	2007
Nauru	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
New Zealand	150	other		2011	200	100	N/A		2011
Niue	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Palau	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Papua New Guinea	N/A	N/A		2010	N/A	N/A	N/A		2010
Philippines	140	60		2014	other	150	N/A		2014
Republic of Korea	200	120		2013	190	115	57		2013
Samoa	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Singapore	other	147	lower targets by 2020	2014	N/A	N/A	100	lower targets by 2020	2014
Solomon Islands	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Tonga	N/A	N/A		2015	N/A	N/A	N/A		2015
Tuvalu	N/A	N/A			N/A	N/A	N/A		
Vanuatu (Palestine)									

14 ANEXO 4. FUNCIONES DOSIS RESPUESTA OMS PROYECTO HRAPIE 2013

Traducción no oficial del documento original OMS HRAPIE 2013, incorporado como Anexo 15 en estudio antecesor de la Universidad de Chile. "ANÁLISIS DE ANTECEDENTES Y EVALUACIÓN DE IMPACTOS PARA REVISAR LAS NORMAS NO₂, O₃ Y CO". Año 2016.

Anexo 15. Curvas concentración respuesta entregadas por la OMS en documento HRAPIE, 2013

En el marco de la declaración de la UE del 2013 como el Año del Aire, la Oficina Regional de la OMS para Europa coordinó dos proyectos internacionales, el REVIHAAP y el HRAPIE (Heath Risk of air pollution in Europe-HRAPIE project), para proveer a la Comisión Europea y sus partes interesadas una revisión basada en la evidencia en salud de los efectos de los contaminantes ambientales.

En el documento HRAPIE se entregan recomendaciones para las entradas en el análisis costo-beneficio de las opciones de regulación. Los expertos coincidieron en que hay evidencia suficiente para la causalidad de los efectos de cada uno de las curvas dosis respuesta (CDR) recomendadas. Cuando estuvieron disponibles los meta-análisis de estudios epidemiológicos, éstos se utilizaron como datos principales de las conclusiones del proyecto HRAPIE.

Se clasifican los pares de contaminante-desenlace recomendados para el análisis costo-beneficio en dos categorías:

Grupo A: pares de contaminante-desenlace para los que se dispone de datos suficientes para permitir la cuantificación fiable de los efectos;

Grupo B: pares de contaminante-desenlace para los cuales existe una mayor incertidumbre acerca de la precisión de los datos utilizados para la cuantificación de los efectos.

OZONO, EXPOSICIÓN A LARGO PLAZO							
Métrica de contaminante	Desenlace en salud	Grupo	RR (95% IC) por 10 $\mu\text{g m}^{-3}$	Rango de concentración	Fuente de los datos en salud	Fuente de la curva dosis -respuesta	Comentarios
O ₃ . Meses de verano. Promedio diario del máximo de 8 horas. Sobre 35 ppb.	Mortalidad, enfermedades respiratorias. Sobre 30 años.	B	1,014 (1,005 – 1,024)	>35 ppb (>70 $\mu\text{g m}^{-3}$)	Base de datos de mortalidad europea (MDB, OMS, 2013). Clasificación Internacional de Enfermedades (ICD), 10 códigos J00-J99	Modelos de un solo contaminante de los datos obtenidos de la Asociación Americana de Cáncer (ACS) (Jerret et al., 2009)	Alternativa a los efectos del ozono en mortalidad por todas las causas en exposiciones a corto plazo. El coeficiente se re-escaló de 1 hora al promedio de 8 horas usando una proporción de 0,72.

OZONO, EXPOSICIÓN A CORTO PLAZO							
Métrica de contaminante	Desenlace en salud	Grupo	RR (95% IC) por 10 µg m ⁻³	Rango de concentración	Fuente de los datos en salud	Fuente de la curva dosis -respuesta	Comentarios
Promedio diario del máximo de 8 horas.	Mortalidad, por todas las causas naturales y en todas las edades	A*	1,0029 (1,0014 – 1,0043)	>35 ppb (>70 µg m ⁻³)	Base de datos de mortalidad europea (MDB, OMS, 2013). ICD-10 capítulos I-XVIII, códigos A-R.	Estudio APHENA, basado en información de 32 ciudades europeas. Coeficientes ajustados por MP ₁₀ en modelos de dos contaminantes.	El estudio incluye concentraciones <35 ppb, pero estos efectos fueron ignorados. Los expertos recomiendan incluir este resultado tanto en los análisis costo-efectividad como costo-beneficio. El coeficiente se re-escaló de 1 hora al promedio de 8 horas usando una proporción de 0,72. (Gryparis et al., 2004)
Promedio diario del máximo de 8 horas.	Mortalidad, por todas las causas naturales y en todas las edades	A	(1,0014 – 1,0043)	>10 ppb (>20 µg m ⁻³)	Base de datos de mortalidad europea (MDB, OMS, 2013). ICD-10 capítulos I-XVIII, códigos A-R.	Estudio APHENA, basado en información de 32 ciudades europeas. Coeficientes ajustados por MP ₁₀ en modelos de dos contaminantes.	Alternativa a la evaluación de O3 solo sobre 35 ppb.
Promedio diario del máximo de 8 horas.	Mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares (ECV). Todas las edades.	A	ECV: 1,0049 (1,0013 – 1,0085); respiratoria: 1,0029 (0,9989 – 1,0070)	>35 ppb (>70 µg m ⁻³)	Base de datos de mortalidad europea (MDB, OMS, 2013). ICD 10 códigos. ECV: I00-I99 Respiratoria: J00-J99	Estudio APHENA, basado en información de 32 ciudades europeas. Coeficientes ajustados por MP ₁₀ en modelos de dos contaminantes.	Alternativa al análisis de mortalidad por todas las causas.
Promedio diario del máximo de 8 horas.	Mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares (ECV). Todas las edades.	A	ECV: 1,0049 (1,0013 – 1,0085); respiratoria: 1,0029 (0,9989 –	>10 ppb (>20 µg m ⁻³)	Base de datos de mortalidad europea (MDB, OMS, 2013). ICD 10 códigos. ECV: I00-I99 Respiratoria: J00-J99	Estudio APHENA, basado en información de 32 ciudades europeas. Coeficientes ajustados por MP ₁₀ en modelos de dos contaminantes.	Alternativa a la evaluación de causa específica para O3 solo sobre 35 ppb.

Promedio diario del máximo de 8 horas.	Admisiones hospitalarias, ECVs (excluyendo accidente cerebrovascular) y enfermedades respiratorias. Mayores de 65 años.	A*	1,0070 ECV: 1,0089 (1,0050-1,0127); respiratori a: 1,0044 (1,0007-1,0083)	>35 ppb (>70 µg m ⁻³)	Base de datos de morbilidad hospitalaria europea (OMS, 2013), ICD-9 códigos ECV: 390-429; respiratoria: 460-519 (ICD-10, códigos I00-I52; J00-J99)	Estudio APHENA, basado en los datos de 8 ciudades europeas. Los coeficientes están ajustados por MP ₁₀ en modelos de dos contaminantes.	El estudio APHENA está basado en todos los rangos de concentración de O ₃ observados, incluyendo niveles bajo los 35 ppb; por lo tanto, los efectos del O ₃ a <35 ppb han sido ignorados.
Promedio diario del máximo de 8 horas.	Admisiones hospitalarias, ECVs (excluyendo accidente cerebrovascular) y enfermedades respiratorias. Mayores de 65 años.	A	ECV: 1,0089 (1,0050-1,0127); respiratori a: 1,0044 (1,0007-1,0083)	>10 ppb (>20 µg m ⁻³)	Base de datos de morbilidad hospitalaria europea (OMS, 2013), ICD-9 códigos ECV: 390-429; respiratoria: 460-519 (ICD-10, códigos I00-I52; J00-J99)	Estudio APHENA, basado en los datos de 8 ciudades europeas. Los coeficientes están ajustados por MP ₁₀ en modelos de dos contaminantes.	Alternativa a la evaluación de O ₃ solo sobre 35 ppb.
Promedio diario del máximo de 8 horas.	Días de actividad menor restringida, todas las edades.	B*	1,0154 (1,0060-1,0249)	>35 ppb (>70 µg m ⁻³)	7,8 días por año, basado en Ostro y Rothschild (1989)	Seis análisis separados de Ostro y Rothschild (1989) de datos anuales entre 1976-1981 de la <i>United States National Health Interview Survey</i>	Un estudio de Estados Unidos en 1989, usado como fuente de ambos RR y tasas de fondo.
Promedio diario del máximo de 8 horas.	Días de actividad menor restringida, todas las edades.	B	1,0154 (1,0060-1,0249)	>10 ppb (>20 µg m ⁻³)	7,8 días por año, basado en Ostro y Rothschild (1989)	Seis análisis separados de Ostro y Rothschild (1989) de datos anuales entre 1976-1981 de la <i>United States National Health Interview Survey</i>	Alternativa a la evaluación de O ₃ solo sobre 35 ppb.

NO₂, EXPOSICIÓN A LARGO PLAZO							
Métrica de contaminante	Desenlace en salud	Grupo	RR (95% IC) por 10 µg m⁻³	Rango de concentración	Fuente de los datos en salud	Fuente de la curva dosis -respuesta	Comentarios
NO ₂ , promedio anual.	Mortalidad por todas las causas naturales, mayores de 30 años.	B*	1,055 (1,031 – 1,080)	>20 µg m ⁻³	Base de datos de morbilidad hospitalaria europea (OMS, 2013), tasas de muerte de todas las causas naturales (ICD-10, capítulos I-XVIII, códigos A-R) en cada uno de los 53 países de la región europea OMS.	Meta-análisis de todos los estudios de cohorte publicados antes de enero de 2013 por Hoek et al. (2013). Los RR se basan en modelos de contaminantes únicos.	Algunos de los efectos a largo plazo del NO ₂ pueden superponerse con los efectos a largo plazo del MP2,5 (sobre 33%). Se recomienda la cuantificación bajo el grupo B para evitar doble conteo en los análisis del grupo A.
NO ₂ , promedio anual.	Prevalencia de síntomas de bronquitis en niños asmáticos de 5 – 14 años	B*	1,021 (0,990 – 1,060) por un cambio de 1 µg m ⁻³ en el promedio anual de NO ₂	Todos	Tasa basal de niños asmáticos, "siempre asmáticos", en Lai et al. (2009) – Europa oeste: 15,8%, desviación estándar (DE) 7,8%; Europa del norte y este: 5,1%, DE 2,7%, con una recomendación alternativa de "sibilancias graves" en Lai et al. (2009) – Europa oeste: 4,9% Europa del norte y este: 3,5%. Prevalencia de síntomas de bronquitis entre niños asmáticos 21,1% a 38,7% (Migliore et al., 2009; McConnell et al., 2003)	Southern California Children's Health Study (McConnell et al., 2003); coeficiente de modelo para dos contaminantes con carbon orgánico. Los coeficientes de modelos con MP10 o MP2,5 son más altos)	Basado en solo un estudio longitudinal disponible que provee coeficientes para NO ₂ ajustado por otros contaminantes.
NO₂, EXPOSICIÓN A CORTO PLAZO							
Métrica de contaminante	Desenlace en salud	Grupo	RR (95% IC) por 10 µg m⁻³	Rango de concentración	Fuente de los datos en salud	Fuente de la curva dosis -respuesta	Comentarios
NO ₂ , promedio del máximo diario de 1 hora	Mortalidad por todas las causas naturales, todas las edades.	A*	1,0027 (1,0016 – 1,0038)	Todos	Base de datos de morbilidad hospitalaria europea (OMS, 2013), tasas de muerte de todas las causas naturales (ICD-10, capítulos I-XVIII,	Proyecto <i>Air Pollution and Health: a European Approach</i> (APHEA)-2 con información de 30 ciudades europeas.	

					códigos A-R) en cada uno de los 53 países de la región europea OMS.	RR ajustados por MP10.	
NO ₂ , promedio del máximo diario de 1 hora	Admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias, todas las edades.	A	1,0015 (0,9992 – 1,0038)	Todos	Base de datos de morbilidad hospitalaria europea (OMS, 2013), ICD-9 códigos 460-519; ICD-10, códigos J00-J99	Meta-análisis APED de 4 estudios publicados antes de 2006. Coeficientes de modelos de un solo contaminante. La OMS (2013) indicó que los estimadores para este contaminante y resultado en salud era robusto para los ajustes de co-contaminantes.	Alternativa a las estimaciones basadas en el promedio de NO ₂ de 24 horas. Preferible debido a la disponibilidad de más estudios.
NO ₂ , promedio de 24 horas	Admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias, todas las edades.	A*	1,0180 (1,0115 – 1,0245)	Todos	Base de datos de morbilidad hospitalaria europea (OMS, 2013), ICD-9 códigos 460-519; ICD-10, códigos J00-J99	Meta-análisis APED de 15 estudios publicados antes de 2006. Coeficientes de modelos de un solo contaminante. La OMS (2013) indicó que los estimadores para este contaminante y resultado en salud era robusto para los ajustes de co-contaminantes.	

15 ANEXO 5. RESULTADOS PROYECCION DE EMISIONES

FUENTES	ZONA 1. CALAMA															
	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)															
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1. Proyectos SEIA	-	116,8	207,9	616,3	844,8	701,1	790,5	827,2	720,3	506,7	815,2	938,9	936,6	920,0	619,3	619,3
1.1. Con RCA Aprobada		116,8	207,9	616,3	547,2	616,1	705,6	742,2	635,3	421,7	547,0	506,6	504,3	487,9	479,1	479,1
1.2. En calificación		-	-	-	297,6	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	268,3	432,3	432,3	432,1	140,2	140,2
2. Fuentes Fijas	737,5	737,5	737,5	737,5	738,3	742,6	737,6	751,1	765,5	779,6	795,8	786,4	779,4	781,2	792,6	774,1
2.1. Grupos electrógenos																
2.2.2. Grupos electrogenos afecto a norma	623,3	623,3	623,3	623,3	623,3	628,6	623,1	636,3	650,2	663,7	679,3	669,4	661,4	662,3	668,4	649,6
2.2.2. Grupos electrógenos no afectos	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4
2.2. Calderas de generación eléctrica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.3. Calderas(**)	63,2	63,2	63,2	63,2	64,1	63,1	63,5	63,8	64,3	65,0	65,5	66,1	67,1	68,0	73,3	73,5
2.4. Procesos sin combustión	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.5. Procesos con combustión	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
2.6. Panaderías	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
3. Fuentes Móviles	998,6	999,8	1.001,0	1.002,2	1.003,4	970,6	991,1	997,0	1.011,7	1.014,0	1.007,1	1.007,6	1.008,8	951,9	894,3	846,2
3.1. Fuentes móviles en ruta																
3.1.1. Medianos y Livianos	308,0	308,0	308,0	308,0	308,0	300,3	292,9	286,4	279,9	269,1	258,8	248,7	239,1	229,9	221,1	212,8
3.1.2. Motocicletas(*)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
3.1.3. Camiones	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2
3.1.4. Transporte público	74,2	75,4	76,6	77,8	79,1	80,4	81,6	82,9	84,3	85,6	87,0	88,4	89,8	91,2	92,7	94,2
3.2. Fuentes móviles fuera de ruta	562,8	562,8	562,8	562,8	562,8	536,4	562,9	574,1	593,9	605,6	607,7	616,9	626,4	577,2	526,9	485,6
4. Emisiones Areales	13,8	14,0	14,2	14,3	14,5	14,7	14,9	15,0	15,2	15,4	15,6	15,8	15,9	16,1	16,3	16,5
4.1. Residencial y comercial	13,7	13,8	14,0	14,2	14,3	14,5	14,7	14,8	15,0	15,2	15,4	15,6	15,8	15,9	16,1	16,3
4.2. Quemadas(*)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Emisiones Finales LB	1.749,9	1.868,0	1.960,5	2.370,3	2.303,5	2.344,1	2.449,1	2.505,4	2.427,7	2.230,7	2.365,4	2.316,4	2.308,4	2.237,1	2.182,3	2.115,8
Emisiones Finales LB sin Proyectos SEIA	1.749,9	1.751,2	1.752,6	1.754,0	1.756,3	1.727,9	1.743,5	1.763,2	1.792,4	1.809,0	1.818,4	1.809,7	1.804,1	1.749,2	1.703,2	1.636,7

FUENTES	ZONA 2. CONCON - QUINTERO - PUCHUNCAVI															
	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)															
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1. Proyectos SEIA	-	4,1	16,7	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2
1.1. Con RCA Aprobada		4,1	16,7	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2
1.2. En calificación																
2. Fuentes Fijas	8.331,5	7.308,4	5.540,6	7.605,8	6.686,4	6.157,2	4.704,6	4.620,4	4.664,7	4.356,7	4.555,0	4.546,5	4.399,5	4.551,1	4.564,7	4.659,9
2.1. Grupos electrógenos(**)																
2.2.2. Grupos electrogenos afectos a norma	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,6	17,8	17,4	17,0	16,3	16,4	16,5	16,4	16,2	16,5	16,7
2.2.2. Grupos electrógenos no afectos	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
2.2. Calderas de generación eléctrica(*)	6.915,1	5.891,9	4.310,2	6.375,3	5.455,9	5.160,4	3.708,1	3.624,1	3.668,6	3.361,2	3.558,9	3.550,0	3.402,7	3.553,9	3.566,8	3.658,7
2.3. Calderas sin ENAP(**)	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,8	36,3	36,5	36,7	37,0	37,3	37,7	38,0	38,5	39,1	42,1
2.4. Procesos sin combustión	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.5. Procesos con combustión	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
2.6. Panaderías	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
2.7. ENAP Refinería	1.355,0	1.355,0	1.169,0	1.169,0	1.169,0	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0
3. Fuentes Móviles	770,3	778,3	787,4	797,6	809,0	820,2	820,8	846,0	865,6	890,2	912,5	931,8	955,6	980,8	984,3	988,4
3.1. Fuentes móviles en ruta																
3.1.1. Medianos y Livianos	118,8	112,1	106,0	100,3	95,1	89,0	83,3	78,0	73,0	68,5	64,3	60,5	57,0	53,8	53,8	53,8
3.1.2. Motocicletas(***)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
3.1.3. Camiones	141,6	144,0	146,5	149,0	151,5	154,1	156,7	159,4	162,1	164,8	167,6	170,5	173,4	176,3	179,3	182,4
3.1.4. Transporte público	260,3	272,6	285,4	298,8	312,8	327,6	342,9	359,1	375,9	393,6	412,1	431,5	451,8	473,0	495,2	518,5
3.2. Fuentes móviles fuera de ruta	249,3	249,3	249,3	249,3	249,3	249,3	237,6	249,3	254,3	263,0	268,2	269,1	273,2	277,4	255,7	233,4
4. Emisiones Areales	40,6	41,0	41,4	41,8	42,2	42,7	43,1	43,5	43,9	44,4	44,8	45,3	45,7	46,2	46,6	47,1
4.1. Residencial y comercial	36,4	36,8	37,2	37,6	38,0	38,4	38,9	39,3	39,7	40,2	40,6	41,0	41,5	41,9	42,4	42,9
4.2. Quemadas(***)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Emisiones Finales LB	9.142,4	8.131,8	6.386,2	8.465,4	7.557,8	7.040,2	5.588,6	5.530,1	5.594,4	5.311,5	5.532,5	5.543,8	5.421,0	5.598,3	5.615,9	5.715,5
Emisiones Finales LB sin Proyectos SEIA	9.142,4	8.127,7	6.369,5	8.445,2	7.537,7	7.020,0	5.568,4	5.509,9	5.574,2	5.291,4	5.512,3	5.523,6	5.400,8	5.578,1	5.595,7	5.695,3

ZONA 3. VALPARAÍSO INTERIOR																
FUENTES	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)															
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1. Proyectos SEIA	-	-	12,6	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
1.1. Con RCA Aprobada		0	13	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
1.2. En calificación	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Fuentes Fijas	2.961,0	2.653,6	2.761,2	1.774,6	1.567,6	1.717,0	1.817,1	1.810,4	2.110,5	1.953,4	2.096,8	2.259,9	2.417,4	2.208,3	2.200,8	2.128,7
2.1. Grupos electrógenos	204,3	204,3	204,3	204,3	204,3	202,3	204,8	200,4	196,0	187,1	188,8	190,1	189,2	186,8	189,7	191,8
2.2. Calderas	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	138,1	140,1	139,2	138,6	137,6	136,2	134,9	133,9	131,9	130,0	119,9
2.3. Procesos generación eléctrica	1.548,8	1.241,4	1.349,0	362,4	155,4	308,7	404,3	402,9	707,9	560,8	703,9	867,0	1.026,4	821,7	813,2	749,2
2.4. Procesos con combustión	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5	1.066,5
2.6. Panaderías	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
3. Fuentes Móviles	3.296,3	3.359,1	3.424,1	3.491,4	3.561,2	3.633,4	3.654,2	3.685,9	3.722,5	3.766,1	3.805,2	3.850,0	3.901,6	3.959,6	4.019,1	4.085,4
3.1. Fuentes móviles en ruta																
3.1.1. Medianos y Livianos	933,8	933,8	933,8	933,8	933,8	933,8	881,7	833,5	788,8	747,9	699,8	654,9	613,1	574,3	538,4	505,5
3.1.2. Motocicletas(*)	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3
3.1.3. Camiones	1.460,4	1.485,2	1.510,5	1.536,2	1.562,3	1.588,8	1.615,8	1.643,3	1.671,2	1.699,7	1.728,5	1.757,9	1.787,8	1.818,2	1.849,1	1.880,6
3.1.4. Transporte público	808,4	846,4	886,2	927,8	971,4	1.017,1	1.064,9	1.114,9	1.167,3	1.222,2	1.279,7	1.339,8	1.402,8	1.468,7	1.537,7	1.610,0
3.2. Fuentes móviles fuera de ruta	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	48,4	50,9	51,8	53,1	53,9	54,1	54,6	55,1	50,6	46,1
4. Emisiones Areales	196,1	197,0	197,9	198,8	199,7	200,7	201,6	202,6	203,6	204,6	205,6	206,6	207,6	208,6	209,7	210,7
4.1. Residencial y comercial	82,2	83,1	84,0	84,9	85,8	86,8	87,7	88,7	89,7	90,7	91,7	92,7	93,7	94,7	95,8	96,8
4.2. Quemadas(*)	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9	113,9
Emisiones Finales LB	6.453,3	6.209,7	6.395,8	5.480,8	5.344,5	5.567,1	5.689,0	5.715,0	6.052,6	5.940,1	6.123,6	6.332,6	6.542,7	6.392,6	6.445,7	6.440,9
Emisiones Finales LB sin Proyectos SEIA	6.453,3	6.209,7	6.383,2	5.464,8	5.328,5	5.551,1	5.672,9	5.698,9	6.036,5	5.924,1	6.107,5	6.316,5	6.526,6	6.376,5	6.429,6	6.424,8

FUENTES	ZONA 4. CONCEPCIÓN METROPOLITANO															
	EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)															
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1. Proyectos SEIA	-	12,7	219,6	296,9	391,8	398,1	1.215,8	1.445,9	1.445,2	1.445,9	1.446,3	1.447,4	1.447,4	1.447,4	1.447,4	1.447,4
1.1. Con RCA Aprobada		12,7	219,6	296,9	391,8	398,1	1.215,8	1.223,7	1.223,0	1.223,7	1.224,1	1.225,2	1.225,2	1.225,2	1.225,2	1.225,2
1.2. En calificación								222,2	222,2	222,2	222,2	222,2	222,2	222,2	222,2	222,2
2. Fuentes Fijas	11.539,5	11.069,6	10.163,6	11.136,4	9.859,0	8.706,8	7.942,4	7.830,2	7.402,7	6.982,1	7.250,9	7.246,8	7.233,3	7.200,3	7.206,5	7.230,3
2.1. Grupos electrógenos	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	906,7	918,5	899,4	880,1	862,3	842,3	849,0	854,2	851,0	840,9	854,1
2.2. Grupos electrogenos afectos a norma	895,7	895,7	895,7	895,7	895,7	886,7	898,5	879,4	860,1	842,3	822,3	829,0	834,2	831,0	820,9	834,1
2.2.2. Grupos electrógenos no afectos	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
2.2. Calderas	8.284,4	7.904,3	6.998,3	7.971,1	6.693,7	5.550,5	4.774,4	4.681,2	4.781,9	4.379,2	4.668,0	4.657,1	4.638,5	4.608,7	4.625,0	4.635,5
2.2.1. Calderas de generación eléctrica(*)	7.047,4	6.667,3	5.761,3	6.734,1	5.456,7	4.327,3	3.536,3	3.449,8	3.554,9	3.159,5	3.458,5	3.456,3	3.445,4	3.430,0	3.459,6	3.542,9
2.2.2. Calderas afectas a norma	1.004,0	1.004,0	1.004,0	1.004,0	1.004,0	990,2	1.005,1	998,5	994,0	986,7	976,5	967,8	960,1	945,7	932,3	859,7
2.2.3. Calderas no afectas	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0
2.3. Procesos	2.339,3	2.249,6	2.249,6	2.249,6	2.249,6	2.249,6	2.249,6	2.249,6	1.740,6	1.740,6	1.740,6	1.740,6	1.740,6	1.740,6	1.740,6	1.740,6
2.3.1. Procesos sin combustión	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6
2.3.2. Hornos	1.454,1	1.454,1	1.454,1	1.454,1	1.454,1	1.454,1	1.454,1	1.454,1	945,2	945,2	945,2	945,2	945,2	945,2	945,2	945,2
2.3.3. Otros procesos con combustion	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9	757,9
2.6. Panaderías	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7
3. Fuentes Móviles	7.054,6	7.064,7	7.074,9	6.997,0	6.923,1	6.853,0	6.623,2	6.474,4	6.384,3	6.297,1	6.185,9	6.054,2	5.930,0	5.811,0	5.615,1	5.428,6
3.1. Fuentes móviles en ruta																
3.1.1. Medianos y Livianos	2.966,9	2.966,9	2.966,9	2.966,9	2.966,9	2.966,9	2.818,7	2.673,0	2.532,1	2.397,5	2.241,8	2.092,9	1.951,6	1.817,8	1.692,4	1.576,3
3.1.2. Motocicletas(**)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
3.1.3. Camiones	918,8	928,9	939,1	949,4	959,9	970,4	981,1	991,9	1.002,8	1.013,8	1.025,0	1.036,3	1.047,7	1.059,2	1.070,8	1.082,6
3.1.4. Transporte público	2.020,8	2.020,8	2.020,8	1.932,6	1.848,3	1.767,6	1.690,5	1.616,7	1.616,7	1.616,7	1.616,7	1.616,7	1.616,7	1.616,7	1.616,7	1.616,7
3.2. Fuentes móviles fuera de ruta	1.123,1	1.123,1	1.123,1	1.123,1	1.123,1	1.123,1	1.108,0	1.167,9	1.207,7	1.244,1	1.277,4	1.283,4	1.289,1	1.292,3	1.210,2	1.128,0
4. Emisiones Aerales	7.343,3	7.382,4	7.422,9	7.465,0	7.508,8	7.554,3	7.601,5	7.650,6	7.701,6	7.754,6	7.809,7	7.866,9	7.926,4	7.988,1	8.052,3	8.119,0
4.1. Residencial y comercial	1.000,7	1.039,7	1.080,2	1.122,4	1.166,1	1.211,6	1.258,9	1.308,0	1.359,0	1.412,0	1.467,0	1.524,3	1.583,7	1.645,5	1.709,6	1.776,3
4.2. Quemadas(***)	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7	6.342,7
Emisiones Finales LB	25.937	25.529	24.881	25.895	24.683	23.512	23.383	23.179	22.712	22.258	22.471	22.393	22.315	22.225	22.099	22.003
Emisiones Finales LB sin Proyectos SEIA	25.937	25.517	24.661	25.598	24.291	23.114	22.167	21.955	21.489	21.034	21.247	21.168	21.090	20.999	20.874	20.778

TIPO DE FUENTE	PROYECCIÓN DE EMISIONES ANUALES NOX (Ton/año)															
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1. Proyectos SEIA	0,0	54,6	129,0	180,5	195,8	240,3	229,7	240,1	242,7	240,4	240,4	240,4	240,4	240,4	240,4	240,4
1.1. Con RCA Aprobada		54,6	129,0	180,5	195,8	210,2	210,2	210,2	210,2	210,2	210,2	210,2	210,2	210,2	210,2	210,2
1.2. En calificación		0,0	0,0	0,0	0,0	30,1	19,5	29,8	32,4	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1
2. Fuentes Fijas	5.052	4.717	4.993	4.972	4.221	4.242	4.279	4.279	4.278	4.278	4.278	4.314	4.346	4.369	4.351	4.402
2.1. Grupos electrógenos	1.150	1.150	1.150	1.108	1.156	1.144	1.160	1.135	1.110	1.087	1.061	1.068	1.074	1.068	1.054	1.066
2.2. Calderas																
2.2.1. Calderas de generación eléctrica(*)	585	206	435	409	409	409	409	409	409	409	409	409	409	409	409	409
2.2.2. Calderas afectas a norma	483	507	532	559	551	560	556	553	549	544	539	535	527	519	479	477
2.2.3. Calderas no afectas	402	422	443	465	488	512	538	564	592	622	653	685	720	755	793	832
2.3. Procesos																
2.3.1. Procesos con combustión	2.328	2.328	2.328	2.328	1.513	1.513	1.513	1.513	1.513	1.513	1.513	1.513	1.513	1.513	1.513	1.513
2.3.3. Procesos sin combustión	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2.4. Panaderías	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
3. Fuentes Móviles	34.332	34.344	33.412	32.778	31.996	31.134	30.462	29.375	28.557	27.952	26.065	24.239	22.780	21.410	20.125	19.781
3.1. Fuentes móviles en ruta																
3.1.1. Medianos y Livianos	12.764	12.764	12.764	12.764	12.025	11.373	10.802	10.311	9.577	8.902	8.283	7.719	7.211	6.760	6.364	6.020
3.1.2. Motocicletas(**)	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
3.1.3. Camiones	3.524	3.524	3.075	2.695	2.616	2.541	2.419	2.374	2.329	2.287	2.248	2.216	2.219	2.219	2.219	2.219
3.1.4. Transporte público	3.509	3.521	3.533	2.718	2.416	1.975	1.786	1.176	1.032	1.039	1.047	1.056	1.056	1.056	1.056	1.056
3.2. Fuentes móviles fuera de ruta	13.551	13.551	13.055	13.617	13.955	14.262	14.470	14.531	14.636	14.739	13.502	12.265	11.309	10.390	9.502	9.502
3.3. Aviones	789	789	789	789	789	789	789	789	789	789	789	789	789	789	789	789
4. Emisiones Areales	5.583	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338	3.338
4.1. Residencial y comercial	2.245															
4.2. Quemadas agrícolas	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
4.3. Incendios forestales	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285
4.4. Incendios urbanos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Emisiones Finales LB	44.967	42.454	41.871	41.269	39.751	38.953	38.309	37.232	36.415	35.808	33.921	32.132	30.704	29.356	28.054	27.761
Emisiones Finales LB sin Proyectos SEIA	44.967	42.399	41.742	41.089	39.555	38.713	38.079	36.991	36.173	35.568	33.681	31.891	30.464	29.116	27.814	27.521