



**Antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de
Calidad del Aire para Arsénico y revisión de la Norma de
Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de
Arsénico**

ID Licitación: 608897-23-LP21

Estudio solicitado por Subsecretaría del Medio Ambiente

INFORME FINAL – Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico

Santiago, 17 de junio de 2022

Título del Proyecto

Antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico y revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico

Autores:

Jefe de proyecto: Luis Cifuentes

Asesores expertos: Fabio Carrera (PUCV), Daniel Rebolledo (CITUC)

Equipo operativo: José Miguel Valdés, Viviana Cerda Gho, Valentina Morandé, Alejandro Bañados, Simón Burgos, Anne-Lise Bohaud Ausset, María Teresa Alarcón.

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna N° 4860, Macul – Santiago

Datos Mandante

Razón Social: Subsecretaría del Medio Ambiente

RUT: 61.979.930-5

Dirección: San Martín 73, Santiago

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo general proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico y también para la revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, considerando un análisis técnico y económico, así como efectos en la salud y beneficios económicos asociados a reducciones de arsénico y otros contaminantes.

Cuerpo del informe

463 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

17/junio/2022

Información Contractual

Correlativo Contrato: 6591

OC N°: 608897-132-SE21

Contraparte técnica

Nombre: Emmanuel Mesías Rojas

Cargo: Profesional Depto. Planes y Normas, DCA

E-mail: emesias@mma.gob.cl

Sr. Luis Cifuentes

Director GreenLab

Dictuc S.A.

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	I
Lista de Tablas.....	IV
Lista de Figuras.....	XIV
Acrónimos y Abreviaturas.....	XXI
0. Resumen Ejecutivo.....	1
1. Objetivos del estudio	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Comportamiento histórico de las concentraciones de Arsénico.....	15
2.1 Coordinación con contraparte técnica	15
2.2 Fuentes de información disponible	15
2.2.1 Consolidación de base de datos con información sistematizada	23
2.3 Concentraciones históricas de arsénico	24
2.3.1 Diagnóstico a nivel nacional	24
2.3.2 Análisis longitudinal de As en MP10 por estaciones.....	29
2.3.3 Análisis longitudinal de As en MP2,5 por estaciones.....	110
2.3.4 Comparación entre estaciones.....	122
2.4 Diagnóstico del estado del arte de monitoreo de As en aire	124
2.4.1 Estado del arte a nivel nacional	124
2.4.2 Estado del arte a nivel internacional	133
3. Emisión de arsénico	138
3.1 Compilación de información disponible de emisiones.....	138
3.1.1 Fundiciones de cobre: Metodología de balance de masa.....	138
3.1.2 Resumen de información disponible para fundiciones de cobre	145
3.1.3 Fundiciones de cobre: Brechas de información identificadas y propuesta de estimación.....	145
3.1.4 Información proveniente del DS138/2005.....	149
3.2 Inventario de emisiones.....	150

3.3	Análisis de inventario: Fundiciones	157
3.3.1	<i>Fundición Chuquicamata</i>	157
3.3.2	<i>Fundiciones Altonorte</i>	165
3.3.3	<i>Fundición Potrerillos</i>	174
3.3.4	<i>Fundición Hernán Videla Lira</i>	184
3.3.5	<i>Fundición Ventanas</i>	195
3.3.6	<i>Fundición Chagres</i>	202
3.3.7	<i>Fundición Caletones</i>	210
3.3.8	<i>Comparación entre Fundiciones</i>	218
3.4	Proyección de inventario	231
3.4.1	<i>Metodología de proyección</i>	231
3.4.2	<i>Resultados de la proyección</i>	236
4.	Efectos en salud y coeficientes de riesgo	237
4.1	Caracterización de efectos adversos en salud asociados a la exposición de arsénico en el aire	237
4.1.1	<i>Fuentes de información consultadas</i>	237
4.1.2	<i>Antecedentes generales</i>	238
4.1.3	<i>Efectos adversos en salud asociados a la exposición de arsénico en el aire</i>	239
4.2	Perfil toxicológico arsénico	246
4.2.1	<i>Arsénico inorgánico – Número CAS: 7440-38-2</i>	246
4.2.2	<i>Trióxido de arsénico - Número CAS: 1327-53-3</i>	259
4.2.3	<i>Tricloruro de arsénico - Número CAS: 7784-34-1</i>	268
4.2.4	<i>Pentóxido de arsénico - Número CAS: 1303-28-2</i>	275
4.2.5	<i>Arsina - Número CAS: 7784-42-1</i>	280
4.3	Coeficientes de riesgo identificados	289
5.	Relación entre emisión y concentración de arsénico en el aire	291
5.1	Metodología de estimación de relación entre emisión y concentración	291
5.1.1	<i>Modelización meteorológica</i>	292
5.1.2	<i>Validación de modelo meteorológico WRF con red de monitoreo nacional</i>	299
5.1.3	<i>Definición de las estaciones de monitoreo de calidad del aire</i>	301
5.1.4	<i>Determinación de puntos de interés de estudio</i>	302

5.1.5	<i>Determinación de la relación emisión-concentración</i>	302
5.1.6	<i>Determinación del aporte basal</i>	309
5.2	Estimación de relación emisión - concentración	313
5.2.1	<i>Análisis de incertidumbre meteorológico</i>	313
5.2.2	<i>Relación emisión-concentración</i>	317
6.	Propuestas regulatorias para la elaboración de una norma primaria de calidad del aire para arsénico	356
6.1	Escenario regulatorio internacional.....	356
6.2	Comparación de beneficios estimados en evaluaciones internacionales	367
6.3	Coeficientes de riesgo unitario para concentración de arsénico en el aire	372
6.4	Metodología para calcular los efectos en salud por la reducción en concentración marginal	375
6.5	Escenarios regulatorios propuestos y sus beneficios	377
6.5.1	<i>Escenarios regulatorios</i>	383
6.5.2	<i>Evaluación de beneficios</i>	386
7.	Evaluación de costos de propuestas regulatorias	394
7.1	Costos de tecnologías para la reducción de emisión.....	394
7.1.1	<i>Identificación y selección de tecnologías</i>	394
7.1.2	<i>Metodología para estimar costos unitarios</i>	395
7.2	Variables operacionales con influencia en las emisiones.....	400
7.2.1	<i>Características del concentrado</i>	400
7.2.2	<i>Características del proceso</i>	402
7.2.3	<i>Niveles de producción</i>	403
7.3	Costos de las alternativas regulatorias propuestas y beneficios.....	404
7.3.1	<i>Selección de medidas de mitigación</i>	405
7.3.2	<i>Costos totales de alternativas regulatorias</i>	409
7.3.3	<i>Estimación de co-beneficios</i>	411
7.3.4	<i>Comparación de costos y beneficios</i>	415
8.	Conclusiones	420
9.	Referencias	432
10.	Anexos	439
10.1	Anexo 1: Identificación de valores anómalos	439

10.2	Anexo 2: Metodología para estimación de rango de emisiones de HVL.....	439
10.3	Anexo 3: Rosas de viento estaciones.....	439
10.3.1	<i>Rosas de Viento Fundición Chuquicamata</i>	439
10.3.2	<i>Rosas de Viento Fundición Altonorte</i>	439
10.3.3	<i>Rosas de Viento Fundición Potrerillos</i>	439
10.3.4	<i>Rosas de Viento Fundición Hernán Videla Lira</i>	439
10.3.5	<i>Rosas de Viento Fundición Ventanas</i>	439
10.3.6	<i>Rosas de Viento Fundición Chagres</i>	439
10.3.7	<i>Rosas de Viento Fundición Caletones</i>	439
10.4	Anexo 4: Comparación de concentración basal de arsénico.....	439
10.5	Anexo 5: Corroboración de equivalencia entre factores de corrección.....	439
10.6	Anexo 6: Puntos de interés en modelación de calidad del aire	439
10.7	Anexo 7: Inventario de emisiones modelado	439
10.8	Anexo 8: Análisis datos modelados versus observados	439
10.9	Anexo 9: Evaluación de metodología de modelación de emisiones	439
10.10	Anexo 10: ACB para escenario regulatorio.....	439
10.11	Anexo 11: Análisis comparativo de concentraciones de arsénico en rocas.....	439

Lista de Tablas

Tabla 0-1	Inventario de estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020	2
Tabla 0-2	Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020	3
Tabla 0-3	Efectos agudos no carcinogénicos según forma química de arsénico	4
Tabla 0-4	Efectos crónicos no carcinogénicos según forma química de arsénico.....	6
Tabla 0-5	Efectos carcinogénicos según forma química de arsénico	7
Tabla 0-6	Coeficientes de riesgo asociados a efectos cancerígenos	7
Tabla 0-7	Factores emisión concentración para localidades en dominio	9
Tabla 0-8	Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia	12
Tabla 2-1	Descripción de fuentes y sus estaciones cercanas con medición de arsénico	15
Tabla 2-2	Cantidad de datos disponibles de As en MP10 sin errores de concentración de As, por estación de cada zona.....	18
Tabla 2-3	Resumen de los valores disponibles de As en MP10 documentados sin valor numérico, sistematizados como errores en la base de datos compilada.....	21
Tabla 2-4	Campos de la base de datos de sistematización de concentraciones medidas	23

Tabla 2-5 Resumen concentraciones de arsénico en MP10 [ng/m ³ N] por estación en el año 2020	27
Tabla 2-6 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, estación Escuela E-10	31
Tabla 2-7 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site	31
Tabla 2-8 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Escuela E-10	32
Tabla 2-9 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site	32
Tabla 2-10 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi.....	38
Tabla 2-11 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K	38
Tabla 2-12 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo.....	39
Tabla 2-13 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro.....	40
Tabla 2-14 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre.....	40
Tabla 2-15 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal.....	40
Tabla 2-16 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu	41
Tabla 2-17 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu.....	42
Tabla 2-18 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi	44
Tabla 2-19 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K	44
Tabla 2-20 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo	44
Tabla 2-21 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro	45
Tabla 2-22 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre	45
Tabla 2-23 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal	45
Tabla 2-24 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu	46
Tabla 2-25 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu.....	46

Tabla 2-26 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías minera Spence, estación Sierra Gorda.....	49
Tabla 2-27 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías minera Spence, estación Spence	50
Tabla 2-28 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Minera Spence, estación Sierra Gorda	51
Tabla 2-29 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Minera Spence, estación Spence	51
Tabla 2-30 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril	53
Tabla 2-31 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre.....	54
Tabla 2-32 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica.....	54
Tabla 2-33 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril.....	55
Tabla 2-34 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre	56
Tabla 2-35 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica	56
Tabla 2-36 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi	61
Tabla 2-37 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte	61
Tabla 2-38 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal	62
Tabla 2-39 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur	62
Tabla 2-40 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi	63
Tabla 2-41 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte.....	64
Tabla 2-42 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal	64
Tabla 2-43 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur	64
Tabla 2-44 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP.....	69
Tabla 2-45 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca.....	69
Tabla 2-46 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés	70
Tabla 2-47 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec	70
Tabla 2-48 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP.....	73
Tabla 2-49 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca .	73

Tabla 2-50 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés	73
Tabla 2-51 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec	73
Tabla 2-52 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó.....	77
Tabla 2-53 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote.....	77
Tabla 2-54 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando.....	78
Tabla 2-55 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla	78
Tabla 2-56 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó.....	80
Tabla 2-57 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote	80
Tabla 2-58 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando.....	80
Tabla 2-59 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla.....	81
Tabla 2-60 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda	85
Tabla 2-61 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes	85
Tabla 2-62 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví	86
Tabla 2-63 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero	86
Tabla 2-64 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro	87
Tabla 2-65 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur.....	87
Tabla 2-66 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre	88
Tabla 2-67 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas.....	88
Tabla 2-68 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda ...	90
Tabla 2-69 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes	90
Tabla 2-70 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví	90
Tabla 2-71 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero ...	90
Tabla 2-72 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro	91
Tabla 2-73 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur	91

Tabla 2-74 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre	91
Tabla 2-75 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas ..	92
Tabla 2-76 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo	95
Tabla 2-77 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón	95
Tabla 2-78 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos	95
Tabla 2-79 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas	96
Tabla 2-80 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo	97
Tabla 2-81 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón	97
Tabla 2-82 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos	97
Tabla 2-83 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas	98
Tabla 2-84 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu	102
Tabla 2-85 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo	102
Tabla 2-86 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu	103
Tabla 2-87 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo ..	103
Tabla 2-88 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club	106
Tabla 2-89 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población	107
Tabla 2-90 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell	107
Tabla 2-91 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club	108
Tabla 2-92 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población	109
Tabla 2-93 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell	109
Tabla 2-94 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K	114
Tabla 2-95 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo	114
Tabla 2-96 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro	114

Tabla 2-97 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu.....	115
Tabla 2-98 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu.....	115
Tabla 2-99 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal.....	115
Tabla 2-100 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre.....	116
Tabla 2-101 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril.....	117
Tabla 2-102 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre.....	117
Tabla 2-103 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en la región de Valparaíso.....	118
Tabla 2-104 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en la estación Parque O'Higgins de la ciudad de Santiago.....	119
Tabla 2-105 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en la ciudad de Temuco.....	121
Tabla 2-106 Comparación de estaciones con mayores concentraciones de As en MP10 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$].....	123
Tabla 2-107 Equipos de monitoreo utilizados en todas las estaciones de interés para la medición discreta de MP.....	125
Tabla 2-108 Metodología de análisis, laboratorio y frecuencia de muestreo de MP10, MP2,5 y As.....	129
Tabla 2-109 Descripción general de las técnicas de muestreo utilizadas para medir las concentraciones de arsénico en el aire ambiente.....	134
Tabla 2-110 Ejemplos de procedimientos de recolección y análisis de muestras para el arsénico en el aire ambiente.....	135
Tabla 2-111 Estudios de arsénico en aire ambiente y comparación de metodologías de estudio.....	136
Tabla 3-1 Flujos Establecidos por el Protocolo de Balance de Masa.....	141
Tabla 3-2 Requisitos de muestreo.....	144
Tabla 3-3 Resumen de información sistematizada de emisiones de arsénico.....	145
Tabla 3-4 Número de meses y promedio de emisiones negativas.....	146
Tabla 3-5 Fuentes y establecimientos con emisiones reportadas de arsénico por sobre lo esperado.....	150
Tabla 3-6 Fuentes con sobre estimación de emisiones para el año 2020.....	150
Tabla 3-7 Inventario de estimación de emisiones [$\text{ton}/\text{año}$] de Arsénico 2020.....	151
Tabla 3-8 Estimación de emisiones de arsénico [$\text{ton}/\text{año}$] por chimenea con regulación de As en la actual norma, año 2020.....	153
Tabla 3-9 Equipos e instalaciones principales de fundición Chuquicamata.....	158
Tabla 3-10 Equipos e instalaciones principales de fundición Altonorte.....	167
Tabla 3-11 Equipos e instalaciones principales de fundición Potrerillos.....	175

Tabla 3-12 Variación de flujos de inventario, Potrerillos 2020	177
Tabla 3-13 Equipos e instalaciones principales de fundición Hernán Videla Lira	186
Tabla 3-14 Variación de flujos de inventario, HVL 2020.....	188
Tabla 3-15 Equipos e instalaciones principales de fundición Ventanas	195
Tabla 3-16 Equipos e instalaciones principales de fundición Chagres	203
Tabla 3-17 Equipos e instalaciones principales de fundición Caletones	211
Tabla 3-18 Emisiones de Arsénico [TMF] y Razón entre material de limpieza y emisión acumulada por fundición, periodo 2017-2020.....	218
Tabla 3-19 Holgura de emisiones respecto de límite de emisión, en períodos de entrada en vigencia del DS 28 por fundición.....	221
Tabla 3-20 Captura y fijación de As(%) por fundición, período 2017 a 2020	226
Tabla 3-21 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020	227
Tabla 3-22 Principales flujos y su proporción respecto del total por fundición, año 2020.....	229
Tabla 3-23 Cronograma de cierre de centrales a carbón considerado en proyección.....	233
Tabla 3-24 Proyección de inventario de arsénico [ton/año], 2020-2035.....	236
Tabla 4-1 Efectos agudos no carcinogénicos según forma química de arsénico	242
Tabla 4-2: Efectos crónicos no carcinogénicos según forma química de arsénico	244
Tabla 4-3 Efectos carcinogénicos según forma química de arsénico	245
Tabla 4-4 Clasificación carcinogénica – arsénico inorgánico.....	250
Tabla 4-5 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria - arsénico inorgánico.....	251
Tabla 4-6 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: cancerígenos - arsénico inorgánico	252
Tabla 4-7 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: no cancerígenos - arsénico inorgánico	252
Tabla 4-8 Valores de toxicidad arsénico inorgánico	253
Tabla 4-9 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria- arsénico inorgánico.....	254
Tabla 4-10 Clasificación carcinogénica - Trióxido de arsénico	264
Tabla 4-11 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria – trióxido de arsénico	265
Tabla 4-12 Valores de toxicidad - trióxido de arsénico	265
Tabla 4-13 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria - trióxido de arsénico	266
Tabla 4-14 Clasificación carcinogénica - Tricloruro de arsénico.....	273
Tabla 4-15 Valores de toxicidad - tricloruro de arsénico.....	274
Tabla 4-16 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria tricloruro de arsénico.....	274
Tabla 4-17 Clasificación carcinogénica - Pentóxido de arsénico	278
Tabla 4-18 Valores de toxicidad - pentóxido de arsénico.....	279
Tabla 4-19 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria pentóxido de arsénico	279
Tabla 4-20 Clasificación carcinogénica - Arsina	283
Tabla 4-21 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria - arsina.....	284
Tabla 4-22 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: no cancerígenos - arsina	284
Tabla 4-23 Valores de toxicidad arsina	285
Tabla 4-24: Límites ocupacionales de exposición inhalatoria- arsina	286
Tabla 4-25 Coeficientes de riesgo asociados a efectos cancerígenos	290

Tabla 5-1 Características dominios WRF.....	293
Tabla 5-2 Criterios estadísticos para evaluar el grado de validez de los resultados obtenidos por el modelo WRF.....	299
Tabla 5-3 Criterios de tolerancia de diferencia absoluta de variables modeladas.....	300
Tabla 5-4 Estaciones de monitoreo por dominio de estudio	301
Tabla 5-5 Puntos de interés por dominio de estudio	302
Tabla 5-6 Estaciones representativas por localidad y dominio	309
Tabla 5-7 Concentración basal [ng/m ³] estimada estadísticamente para calibración	312
Tabla 5-8 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento.....	313
Tabla 5-9 Variables de incertidumbre – Dirección del viento	313
Tabla 5-10 Variables de incertidumbre – Temperatura	313
Tabla 5-11 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento.....	315
Tabla 5-12 Variables de incertidumbre – Dirección del viento	315
Tabla 5-13 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento.....	316
Tabla 5-14 Variables de incertidumbre – Dirección del viento	316
Tabla 5-15 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Chuquicamata	318
Tabla 5-16 Estación representativa por localidad – Fundición Chuquicamata	320
Tabla 5-17 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Chuquicamata	321
Tabla 5-18 Factor de corrección por receptor – Fundición Chuquicamata.....	321
Tabla 5-19 Factor FEC por fuente – Estación CD 23 de marzo, Fundición Chuquicamata	321
Tabla 5-20 Factor FEC por fuente – Estación Nueva ChiuChiu, Fundición Chuquicamata	322
Tabla 5-21 Factor FEC corregido por fuente – Estación CD 23 de marzo, Fundición Chuquicamata	322
Tabla 5-22 Factor FEC corregido por fuente – Estación Nueva ChiuChiu, Fundición Chuquicamata	322
Tabla 5-23 Relación FEC por receptor – Fundición Chuquicamata.....	322
Tabla 5-24 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Altonorte	323
Tabla 5-25 Estación representativa por localidad – Fundición Altonorte	326
Tabla 5-26 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Altonorte	327
Tabla 5-27 Factor de corrección por receptor – Fundición Altonorte.....	327
Tabla 5-28 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Coviefi, Fundición Altonorte.....	327
Tabla 5-29 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Inacal, Fundición Altonorte	327
Tabla 5-30 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Coviefi, Fundición Altonorte	328
Tabla 5-31 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Inacal, Fundición Altonorte.....	328
Tabla 5-32 Relación FEC por receptor – Fundición Altonorte	328
Tabla 5-33 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Potrerillos.....	329
Tabla 5-34 Estación representativa por localidad – Fundición Potrerillos	331
Tabla 5-35 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Potrerillos	332
Tabla 5-36 Factor de corrección por receptor – Fundición Potrerillos.....	332

Tabla 5-37 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Cine Inca, Fundición Potrerillos.....	332
Tabla 5-38 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación CAP, Fundición Potrerillos	332
Tabla 5-39 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Cine Inca, Fundición Potrerillos	333
Tabla 5-40 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación CAP, Fundición Potrerillos.....	333
Tabla 5-41 Relación <i>FEC</i> por receptor – Fundición Potrerillos	333
Tabla 5-42 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Hernán Videla Lira	334
Tabla 5-43 Estación representativa por localidad – Fundición Hernán Videla Lira	336
Tabla 5-44 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Hernán Videla Lira .	337
Tabla 5-45 Factor de corrección por receptor – Fundición Hernán Videla Lira	337
Tabla 5-46 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Paipote, Fundición Hernán Videla Lira	337
Tabla 5-47 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Tierra Amarilla, Fundición Hernán Videla Lira.....	337
Tabla 5-48 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Paipote, Fundición Hernán Videla Lira	338
Tabla 5-49 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Tierra Amarilla, Fundición Hernán Videla Lira.....	338
Tabla 5-50 Relación <i>FEC</i> por receptor – Fundición Hernán Videla Lira	338
Tabla 5-51 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Ventanas.....	339
Tabla 5-52 Estación representativa por localidad – Fundición Ventanas.....	342
Tabla 5-53 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Ventanas.....	343
Tabla 5-54 Factor de corrección por receptor – Fundición Ventanas	343
Tabla 5-55 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Ventanas.....	343
Tabla 5-56 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Quintero, Fundición Ventanas.....	343
Tabla 5-57 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Ventanas, Fundición Ventanas	344
Tabla 5-58 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Ventanas	344
Tabla 5-59 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Quintero, Fundición Ventanas	344
Tabla 5-60 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Ventanas, Fundición Ventanas	344
Tabla 5-61 Relación <i>FEC</i> por receptor – Fundición Ventanas.....	344
Tabla 5-62 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Chagres.....	345
Tabla 5-63 Estación representativa por localidad – Fundición Chagres.....	347
Tabla 5-64 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Chagres	348
Tabla 5-65 Factor de corrección por receptor – Fundición Chagres	348
Tabla 5-66 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Lo Campo, Fundición Chagres	348
Tabla 5-67 Factor <i>FEC</i> por fuente – Punto de interés Llayllay, Fundición Chagres	348
Tabla 5-68 Factor <i>FEC</i> por fuente – Punto de interés Panquehue, Fundición Chagres.....	349
Tabla 5-69 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Lo Campo, Fundición Chagres.....	349
Tabla 5-70 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Punto de interés Llayllay, Fundición Chagres....	349
Tabla 5-71 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Punto de interés Panquehue, Fundición Chagres	349
Tabla 5-72 Relación <i>FEC</i> por receptor – Fundición Chagres	350

Tabla 5-73 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Caletones.....	351
Tabla 5-74 Estación representativa por localidad – Fundición Caletones.....	353
Tabla 5-75 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Caletones.....	354
Tabla 5-76 Factor de corrección por receptor – Fundición Caletones	354
Tabla 5-77 Factor FEC por fuente – Estación Coya Población, Fundición Caletones	354
Tabla 5-78 Factor FEC corregido por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Caletones	354
Tabla 5-79 Relación FEC por fuente – Fundición Caletones	355
Tabla 6-1 Tipos y valores límites anuales de concentración de As en el aire de fuentes internacionales [ng/Nm ³].....	357
Tabla 6-2 Estándares de calidad del aire primarios de normativas internacionales para arsénico, según periodo de evaluación [ng/Nm ³].....	359
Tabla 6-3 Valores límites de contribución a la concentración anual de As en el aire con enfoque entorno a las fuentes emisoras de contaminantes [ng/Nm ³]	363
Tabla 6-4 Costos estimados del cumplimiento de los valores límite de arsénico propuestos, para la industria de producción de cobre, y cantidad de sitios en que se espera que se pueda cumplir el límite indicado [millones EUR/año]	369
Tabla 6-5 Síntesis de estado de cuantificación y valorización de cada beneficio identificado en la evaluación económica de la Directiva 2004/107/CE	371
Tabla 6-6 Normas de calidad anual en EEUU y nivel de riesgo equivalente	378
Tabla 6-7 Concentraciones [ng/m ³ N] de arsénico en MP10 proyectadas en el año de referencia para escenarios normativos.....	388
Tabla 6-8 Variación en los niveles de riesgo para escenarios normativos, para año referencial	389
Tabla 6-9 Riesgo poblacional proyectado por escenario para año referencial, en casos esperados por año	391
Tabla 6-10 Valorización de los beneficios anuales [UF/año] asociados a los escenarios de NPCA para el año de referencia.....	393
Tabla 6-11 Sensibilización de los beneficios anuales [UF/año] para el año de referencia al parámetro IUR.....	393
Tabla 7-1 Costo de inversión unitaria [UF según unidad indicada]	397
Tabla 7-2 Costo operación y mantención unitaria [UF/ton concentrado procesado]	398
Tabla 7-3 Costo por reducción del nivel de producción para dar cumplimiento a la NPCA	400
Tabla 7-4 Ratio entre cobre producido y concentrados procesados.....	402
Tabla 7-5 Fracción de captura y fijación de As por fundición año 2020, según balance de masa	403
Tabla 7-6 Capacidad, procesamiento y factor de planta 2020 por fundición [ton/año].....	403
Tabla 7-7 Paquete de medidas seleccionadas para cada fundición en propuestas de escenarios de NPCA	407
Tabla 7-8 Estimación de reducción de emisiones lograda y requerida	409
Tabla 7-9 Costos totales de alternativas regulatorias [UF/año], por fundición y tipo de costo para año de referencia	411

Tabla 7-10 Coeficientes de Dosis-Respuesta para MP2,5 (por $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	412
Tabla 7-11 Ratio de contribución de fundiciones a As y MP2,5	413
Tabla 7-12 Estimación de beneficios [UF/año], por escenario y localidad para año de referencia	414
Tabla 7-13 Estimación de co-beneficios [UF/año], por escenario y efecto considerado, para año de referencia	414
Tabla 7-14 Sensibilización de co-beneficios [UF/año] por escenario y escenario de relación As : MP2,5 en HVL, para año de referencia	415
Tabla 7-15 Beneficios de la NPCA [UF/Año] por reducciones adicionales de arsénico, para año de referencia	415
Tabla 7-16 Beneficios estimados [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia	416
Tabla 7-17 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia ..	417
Tabla 7-18 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc 2 en 10k (46,6)”, año de referencia	418
Tabla 7-19 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc 1 en 10k (23,3)”, año de referencia	418
Tabla 7-20 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc Cont Lim (15,0)”, año de referencia	418
Tabla 7-21 Costos y benéficos medios por fundición y escenario, año de referencia	419
Tabla 7-22 Sensibilidad de B/C frente a IUR y escenario As : MP2,5 en HVL	419
Tabla 8-1 Intensidad de emisiones [g As/t Cu producido], periodo 2017 a 2020	422
Tabla 8-2 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia	429
Tabla 8-3 Sensibilidad de B/C frente a IUR y escenario As : MP2,5 en HVL	430

Lista de Figuras

Figura 2-1 Mapa valores mediana concentración As en MP10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$], año 2020, nacional...	26
Figura 2-2 Mapa termoeléctrica Tocopilla, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	29
Figura 2-3 Concentraciones de As en MP10 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, todas las estaciones	30
Figura 2-4 Fracción de As en MP10 [%] cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site	32
Figura 2-5 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$], cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site	33
Figura 2-6 Mapa fundición Chuquicamata, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	34
Figura 2-7 Concentraciones de As en MP10 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, excepto Hospital El Cobre.....	36

Figura 2-8 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre	37
Figura 2-9 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en Chuquicamata, estaciones C.P.V.K y CD 23 de Marzo, valores inferiores a 200 ng/m ³ N	39
Figura 2-10 Fracción de As en MP10 [%] cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones	43
Figura 2-11 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m ³ N], cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi	47
Figura 2-12 Mapa minera Spence, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	48
Figura 2-13 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías minera Spence, todas las estaciones	49
Figura 2-14 Fracción de As en MP10 [%] cercanías Minera Spence, todas las estaciones.....	50
Figura 2-15 Mapa termoeléctricas Andina y Mejillones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	52
Figura 2-16 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones	53
Figura 2-17 Fracción de As en MP10 [%] cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones	55
Figura 2-18 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m ³ N], cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica	57
Figura 2-19 Mapa fundición Altonorte, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	58
Figura 2-20 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones	60
Figura 2-21 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones ..	63
Figura 2-22 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m ³ N], cercanías fundición Altonorte, estación Sur	65
Figura 2-23 Mapa fundición Potrerillos, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	66
Figura 2-24 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones	68
Figura 2-25 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones .	72
Figura 2-26 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m ³ N], cercanías fundición Potrerillos, estación CAP	74
Figura 2-27 Mapa fundición Hernán Videla Lira, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	75
Figura 2-28 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones	76
Figura 2-29 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones	79
Figura 2-30 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m ³ N], cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote	81

Figura 2-31 Mapa fundición Ventanas, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	82
Figura 2-32 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones	84
Figura 2-33 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones...	89
Figura 2-34 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m ³ N], cercanías fundición Ventanas, estación La Greda	92
Figura 2-35 Mapa refinería ENAP Aconcagua, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	93
Figura 2-36 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones	94
Figura 2-37 Fracción de As en MP10 [%], cercanías refinería ENAP, todas las estaciones	96
Figura 2-38 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m ³ N], cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas	98
Figura 2-39 Mapa fundición Chagres, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	99
Figura 2-40 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chagres, todas las estaciones	101
Figura 2-41 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Chagres, todas las estaciones...	103
Figura 2-42 Mapa fundición Caletones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	104
Figura 2-43 Concentraciones de As en MP10 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones	106
Figura 2-44 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Caletones, todas las estaciones	108
Figura 2-45 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m ³ N], cercanías fundición Caletones, estación Sewell	110
Figura 2-46 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, excepto Hospital El Cobre.....	111
Figura 2-47 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre	112
Figura 2-48 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m ³ N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, años 2015 a 2021, valores inferiores a 250 ng/m ³ N	113
Figura 2-49 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m ³ N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones	116
Figura 2-50 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m ³ N] en la región de Valparaíso	118
Figura 2-51 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m ³ N] en la estación Parque O'Higgins de la ciudad de Santiago.....	119
Figura 2-52 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m ³ N] en estaciones de la ciudad de Temuco	120
Figura 3-1 Sistema, Flujos y límites de balance de masa.....	139
Figura 3-2 Estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020 según fuente.....	154
Figura 3-3 Emisiones de arsénicos en escala lineal y logarítmica por comuna	156

Figura 3-4 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Chuquicamata.....	158
Figura 3-5 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Chuquicamata 2020	159
Figura 3-6 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual.....	160
Figura 3-7 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Chuquicamata, 1993-2020.....	161
Figura 3-8 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Chuquicamata, 2017-2020	162
Figura 3-9 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Chuquicamata, periodo 2017-2020	163
Figura 3-10 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chuquicamata 2017-2020.	164
Figura 3-11 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chuquicamata 2017-2020.....	165
Figura 3-12 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Altonorte	166
Figura 3-13 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Altonorte 2020..	168
Figura 3-14 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual	169
Figura 3-15 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Altonorte, 2004-2020.....	170
Figura 3-16 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Altonorte, 2017-2020	171
Figura 3-17 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Altonorte, periodo 2017-2020	172
Figura 3-18 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Altonorte 2017-2020.	173
Figura 3-19 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Altonorte 2017-2020.	174
Figura 3-20 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Potrerillos	175
Figura 3-21 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Potrerillos 2020.	176
Figura 3-22 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual	177
Figura 3-23 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Potrerillos, 2014-2020	178
Figura 3-24 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Potrerillos, 2017-2020	180
Figura 3-25 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Potrerillos, 2017-2020 (escala entre 65% y 100%).....	180
Figura 3-26 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Potrerillos, periodo 2017-2020	182
Figura 3-27 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Potrerillos 2017-2020.	183
Figura 3-28 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Potrerillos 2017-2020.	184
Figura 3-29 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Hernán Videla Lira	185
Figura 3-30 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Hernán Videla Lira 2020	187
Figura 3-31 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual	189
Figura 3-32 Emisiones anuales [TMF] de arsénico Hernán Videla Lira, 1999-2020	190
Figura 3-33 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición HVL, 2017-2020	191

Figura 3-34 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición HVL, periodo 2017-2019	192
Figura 3-35 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Hernán Videla Lira 2017-2020.	193
Figura 3-36 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Hernán Videla Lira 2017-2020.....	194
Figura 3-37 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Ventanas.....	195
Figura 3-38 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Ventanas 2020 ..	196
Figura 3-39 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual	197
Figura 3-40 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Ventanas, 2005-2020	198
Figura 3-41 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Ventanas, 2017-2020.....	199
Figura 3-42 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Ventanas, periodo 2017-2020	200
Figura 3-43 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Ventanas 2017-2020.	200
Figura 3-44 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Ventanas 2017-2020.....	201
Figura 3-45 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Chagres	202
Figura 3-46 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Chagres 2020	204
Figura 3-47 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual	205
Figura 3-48 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Chagres, 2014-2020	206
Figura 3-49 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Chagres, 2017-2020.....	207
Figura 3-50 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Chagres, periodo 2017-2020	208
Figura 3-51 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chagres 2017-2020.....	208
Figura 3-52 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chagres 2017-2020.....	209
Figura 3-53 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Caletones	210
Figura 3-54 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Caletones 2020 .	212
Figura 3-55 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual	213
Figura 3-56 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Caletones, 2010-2020	214
Figura 3-57 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Caletones, 2017-2020.....	215
Figura 3-58 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Caletones, periodo 2017-2020	216
Figura 3-59 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Caletones 2017-2020.	216
Figura 3-60 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Caletones 2017-2020.....	217
Figura 3-61 Razón Material de Limpieza/Emisión Acumulada, por fundición y año.....	220
Figura 3-62 Holguras de emisión respecto al Límite por fundición, año 2019.....	222
Figura 3-63 Holguras de emisión respecto al Límite por fundición, año 2020.....	223

Figura 3-64 Porcentaje de captura y fijación de As (%) para el periodo 2017-2020.....	225
Figura 3-65 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020	227
Figura 3-66 Contenido Arsénico en concentrados de cobre [ppm], año 2020	229
Figura 3-67 Proyección de producción de concentrados de cobre refinados y sin refinar	234
Figura 5-1 Diagrama de flujo de información meteorológica numérica y fuentes de emisión atmosféricas para la modelación de las emisiones atmosféricas según el SEIA.	291
Figura 5-2 Anidado de cuatro dominios WRF utilizado para cada una de las ubicaciones correspondientes a las 8 plantas	294
Figura 5-3 Dominio – Fundición Chuquicamata.....	295
Figura 5-4 Dominio – Planta Tostación Ministro Hales	295
Figura 5-5 Dominio – Fundición Altonorte	296
Figura 5-6 Dominio – Fundición Potrerillos	296
Figura 5-7 Dominio – Fundición Hernán Videla Lira	297
Figura 5-8 Dominio – Fundición Chagres	297
Figura 5-9 Dominio – Fundición Ventanas.....	298
Figura 5-10 Dominio – Fundición Caletones.....	298
Figura 5-11 Supuesto de la relación lineal entre emisiones y concentraciones.....	303
Figura 5-12 Ejemplo de cadena markoviana oculta para estimar concentración basal.....	311
Figura 5-13 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Chuquicamata 2020	319
Figura 5-14 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Chuquicamata 2020	320
Figura 5-15 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Altonorte 2020.....	325
Figura 5-16 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Altonorte 2020	326
Figura 5-17 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Potrerillos 2020.....	330
Figura 5-18 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Potrerillos 2020	331
Figura 5-19 Evolución del error de la concentración modelada versus observada - Fundición Hernán Videla Lira 2020.....	335
Figura 5-20 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Hernán Videla Lira 2020.....	336
Figura 5-21 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Ventanas 2020	341
Figura 5-22 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Ventanas 2020	342
Figura 5-23 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Chagres 2020.....	346
Figura 5-24 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Chagres 2020	347

Figura 5-25 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Caletones 2020 352

Figura 5-26 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Caletones 2020 353

Figura 6-1 Coeficientes de riesgos para cáncer identificados 373

Figura 6-2 Relación entre riesgo incremental y concentraciones de arsénico para coeficientes de riesgo de US-EPA y de la OMS..... 374

Figura 6-3 Proyección base de concentración de Arsénico en MP10 [ng/m³N] al 2035 380

Figura 6-4 Riesgo incremental individual de cáncer para proyección base 2035 382

Figura 6-5 Escenarios regulatorios propuestos 385

Figura 6-6 Riesgo individual incremental por escenario y comparación con proyección base, para años referencial 389

Figura 6-7 Distribución de la reducción del riesgo poblacional por escenario para año referencial, en casos anuales esperados..... 392

Figura 7-1 Contenido promedio de As en concentrados de cobre procesados [ppm], año 2020 401

Figura 7-2 Efectos socioeconómicos de las medidas de mitigación 404

Figura 7-3 Beneficios estimados [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia 416

Figura 8-1 Proyección base de concentración de Arsénico en MP10 [ng/m³N] al 2035 427

Figura 8-2 Escenarios regulatorios propuestos 428

Figura 10-1 Observaciones con candidatos a ser excluidos para Estación J.J. Latorre, Termoeléctrica Andina..... 439

Figura 10-2 Emisión reportada mensualmente [g As/TMF Cu] 439

Acrónimos y Abreviaturas

Instituciones

MINSAL:	Ministerio de Salud
MMA:	Ministerio del Medio Ambiente
OCDE:	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
OMS:	Organización Mundial de la Salud
PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
US-EPA:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

Monedas

CLP:	Pesos de Chile
UF:	Unidad de Fomento Chilena
USD:	Dólares de Estados Unidos

Abreviaturas

ACB:	Análisis Costo Beneficio
AGIES:	Análisis General del Impacto Económico y Social
BAT:	Mejores Tecnologías Disponibles, por sus siglas en inglés “ <i>Best Available Technologies</i> ”
CIE10:	Clasificación Internacional de Enfermedades, 10ª edición
COI:	Costo de Enfermedad, por sus siglas en inglés “ <i>Cost of illness</i> ”
FE:	Factor de Emisión
FEC:	Factor Emisión-Concentración
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
MP:	Material Particulado
NPCA:	Norma Primaria de Calidad Ambiental
PNM:	Política Nacional Minera
PPDA:	Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental
SNIFA:	Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental
TIR:	Tasa Interna de Retorno
TR:	Tracto Respiratorio
VAN:	Valor Actual Neto
VVE:	Valor de la Vida Estadística
WTP:	Disposición a Pagar, por sus siglas en inglés “ <i>Willingness to Pay</i> ”

Prefijos

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

0. Resumen Ejecutivo

El presente informe se enmarca en una consultoría cuyo objetivo general es proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico (NPCA) y también para la revisión del DS 28/2013 del MMA. En particular este documento se refiere al primero de los objetivos específicos, dedicado a presentar antecedentes para una NPCA para Arsénico, pero se ve complementado por los contenidos desarrollados en el informe complementario dedicado a la revisión de la Norma de Emisión.

Comportamiento histórico de arsénico y diagnóstico de la calidad de aire por arsénico

Se recopiló, procesó y sistematizó información respecto a niveles de arsénico atmosférico para 46 estaciones de monitoreo en el país. Estas estaciones, no se distribuyen equitativamente en el territorio, sino que se concentran en las regiones de Antofagasta (18), Valparaíso (14) y Atacama (8), mientras que las restantes estaciones se ubican entre la RM, O'Higgins y La Araucanía. Lo anterior, responde principalmente a la distribución de las actividades productivas, observándose que el 72% de las estaciones con medición de arsénico se encuentran en zonas impactadas por fundiciones de cobre.

Las estaciones en torno a fundiciones no sólo son más numerosas, sino que también son las que presentan series de datos con un historial de mayor intervalo de tiempo, así como mayor número de mediciones anuales. Se observa que las estaciones con mayor número de mediciones anuales, están midiendo a intervalos de 3 días, lo que permite limitar el intervalo de confianza para estadígrafos de interés como la media o la mediana. Entre todas las estaciones se observa que desde el año 2016 se están acumulando en torno a 3 mil mediciones válidas anuales de arsénico.

El análisis de los resultados da cuenta de situaciones muy diversas en el país, las cuales se ven influenciadas por la meteorología, topografía, condiciones basales y emisiones del contaminante. En este sentido, se constata que las mayores concentraciones de arsénico observadas se encuentran en estaciones cercanas a las fundiciones. De esta forma, el 2020 se observan concentraciones medias superiores a los 50 ng/m³ en estaciones cercanas a las fundiciones tales como Doña Inés, Intelec (ambas en Potrerillos), Sur (Altonorte), Aukahuasi (Calama), Sewell (Caletones), Quintero, Quintero Centro (ambas cercas de Ventanas) y Paipote (HVL). De estas estaciones, sólo las tres últimas cuentan con representatividad poblacional de MP10, todas ubicándose en el rango de 50-60 ng/m³. En el resto de las localidades con estaciones con EMRP para MP10 en zonas de influencia de las fundiciones, se observan concentraciones medias superiores a 20 ng/m³, como en Calama (Chuquicamata) y en San Fernando y Tierra Amarilla (HVL).

Sin perjuicio de lo anterior, de forma general se observa una tendencia a la mejora en los niveles atmosféricos de arsénico en la última década, el cual se ve acentuado especialmente tras la entrada en efecto de todos los límites establecidos en el DS 28/2013 del MMA. Observándose zonas con reducciones cercanas de hasta el 70%. Se reconoce, sin embargo, que parte de esta

reducción se ve influenciada por la baja de emisión durante el proceso de instalación de la instalación y puesta en marcha de los sistemas de abatimiento.

Por su parte, las estaciones sin influencia de las fundiciones, tienen valores medios menores a 4 ng/m³, salvo las estaciones ubicadas en el entorno de la minera Spence en la comuna de Antofagasta. Se trata de dos estaciones con medias de 10 ng/m³ (total de 24 datos), la cual se ve afectada por el aporte basal del desierto en dicha zona.

Inventario de emisiones y análisis de las principales fuentes emisoras

El DS28/2013 del MMA además de resultar en reducciones de las emisiones y mejora en la calidad del aire, permitió la disponibilización de información comparable entre las diferentes fundiciones, así como de la planta de tostación de Ministro Hales. Esta información, se complementó con estimaciones levantadas a partir de otras fuentes de información disponibles en la institucionalidad ambiental, para dar forma al inventario de emisiones (ver Tabla 0-1).

Tabla 0-1 Inventario de estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020

Tipo de fuente	Fuente	Emisiones As [ton/año]	Origen de estimación de emisiones
Fundiciones	Fundición Chuquicamata	180,8	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Altonorte	117,8	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Potrerillos	(1) 51,0	Balances de masa DS28/2013
	Fundición HVL	(2) 18,7	Reestimación basado en intensidad de emisiones
	Fundición Ventanas	28,4	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Chagres	8,6	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Caletones	67,0	Balances de masa DS28/2013
Planta Tostación	Ministro Hales	0,0	(4) Medición isocinética de planta de ácido.
Otras Fuentes	Termoeléctrica	(3) 0,24	Reestimación a partir de RETC DS138/2005
	Otras fuentes	(3) 0,38	Reestimación a partir de RETC DS138/2005
Total		473,0	

- (1) Emisiones reportadas las cuales consideran dos meses con emisiones reportadas negativas. De no considerar estas emisiones el estimado es 107,1 ton.
- (2) Reestimación basada en intensidad de emisiones considerando reportes del titular a ENAMI en el periodo oct2020 a sep2021. Las emisiones reportadas hasta agosto 2020, registran dos meses con valores negativos y fueron estimadas con una metodología que no se ajusta totalmente a la metodología que se encuentra aprobada bajo la Res. Ex. 1479/2021 SMA. El titular presentó una versión revisada a las SMA para el año 2020 con emisiones referenciales de 12,9 ton.
- (3) Originalmente RETC presenta estimaciones más altas, la diferencia se explica principalmente por la reestimación considerando eficiencia de abatimientos, y problemas puntuales solucionado tal como se detalla en la Sección 3.1.4.
- (4) La planta de tostación Ministro Hales no se encuentra afecta a límite máximo de emisión anual de As.

Fuente: Elaboración propia en base a origen de estimaciones reportadas

Del inventario de estimación de emisiones se observa que más del 99% de las emisiones de arsénico tendrían su origen en las fundiciones de cobre del país. La fracción restante se reparte entre cerca de 4.900 fuentes, distribuidas en 234 comunas, que cuentan con alguna estimación de sus emisiones de arsénico. De ellas se destaca la planta de tostación de Ministro Hales, la cual

también está afecta por el DS28/2013, y cuenta con sistemas de abatimiento para la mitigación de las emisiones, así como las termoeléctricas a carbón. Respecto a estas últimas, se destaca que el cierre de estas unidades en el marco de la estrategia de descarbonización del país, tendrá como co-beneficio la reducción de estas emisiones.

Respecto a la proyección de las emisiones, se consideró las proyecciones de Cochilco respecto de la producción de cobre en las refinerías del país, la cual se traduce en un aumento de la producción desde cerca de 1.300 kt a poco más de 1.500 kt. Este aumento se concentraría principalmente en aquellas fundiciones que durante el 2020 operaron con un nivel de producción restringido por el proceso de puesta en marcha de las nuevas tecnologías, especialmente en Chuquicamata (aumento de 56% de sus emisiones) y Potrerillos (23%). Con estas proyecciones, las emisiones de arsénico alcanzarían las 592 ton/año, es decir, un aumento de 25%.

Respecto a las emisiones de las fundiciones, se observa que todas estarían cumpliendo con la eficiencia de 95% de captura y fijación de arsénico. Sin perjuicio, de esto se observan diferencias en las emisiones de las fundiciones, las cuales no sólo se explican por el nivel de procesamiento de las fundiciones, sino que también se ve influenciada por las características del concentrado y las tecnologías instaladas en cada una de las fundiciones. Lo anterior se refleja en la Tabla 0-2, donde se presenta las emisiones de arsénico por tonelada de producción. Se observa que las mayores emisiones ocurren en las fundiciones del norte del país, las cuales se ven perjudicadas por un alta contenido de arsénico que supera el 0,5% promedio en Chuquicamata, Altonorte y Potrerillos, mientras el resto de las fundiciones tienen contenidos de arsénico promedios menores a 0,15%.

Tabla 0-2 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020

Año	DCH	ALN	POT	HVL R/RE (1)	VEN	CHG	CAL
2017	1.854	407	7.744	242	252	192	495
2018	442	425	4.255	91	151	229	420
2019	615	383	883	-77/130	149	276	162
2020	840	453	760	165/237	174	174	209

(1) Para los años 2019 y 2020 se presentan los valores reportados y recalculados. R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio reportado en periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos.

Fuente: Elaboración propia

De la misma Tabla 0-2 se observan mejoras relevantes en la intensidad de emisión de arsénico en las fundiciones, producto de la implementación de medidas para aumentar la captura y fijación del arsénico. Al comparar la intensidad de emisiones 2017 y 2020 se observan mejoras de 90% (Potrerillos), 58% (Caletones), 55% (Chuquicamata) y 31% (Ventanas).

Efectos sobre efectos en salud y coeficientes de riesgo

Para caracterizar los efectos adversos en la salud asociados a la exposición de arsénico en el aire, se elaboró un perfil toxicológico del metaloide y de sus formas químicas disponibles, mediante la

recopilación y revisión de información científica relacionada a exposiciones ambientales. En las tablas siguientes se presenta un resumen de los efectos adversos en salud asociados a la exposición aguda y crónica por vía inhalatoria (en negro) y otras vías (en rojo) de las especies químicas de arsénico con información disponible.

Tabla 0-3 Efectos agudos no carcinogénicos según forma química de arsénico

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
Nervioso	Coma, encefalopatía tóxica, neuropatía, tetraplejía, convulsiones, amnesia	Encefalopatía tóxica, neuropatía, temblor, coma, convulsiones, mareos, dolor de cabeza, neuropatía periférica, pseudo tumor cerebral, fatiga	Encefalopatía tóxica, neuropatía periférica secundaria,	Encefalopatía tóxica, neuropatía, convulsiones	Jaqueca
Respiratorio	Apnea, lesión pulmonar, bronquitis	Insuficiencia respiratoria aguda, lesión pulmonar aguda, síndrome de distrés respiratorio agudo, disnea, sangrado de nariz, tos, hipoxia, derrame pleural, neumonitis	Edema de laringe, síntoma de irritación de membranas mucosas de nariz y garganta, lesión pulmonar aguda, apnea, lesión pulmonar aguda,	Tos, apnea, lesión pulmonar aguda, síndrome de distrés respiratorio agudo	Insuficiencia respiratoria aguda, derrame pleural
Cardiovascular	Arritmia cardíaca, hipotensión	Taquicardia ventricular, torsade de pointes, hipotensión, cardiomiopatía, arritmia cardíaca, bradicardia, intervalo QT prolongado, edema	Arritmia cardíaca	Arritmia cardíaca, hipovolemia por filtración capilar, hipotensión	Arritmia cardíaca, hipotensión

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico Cas: 7440-38-2	Trióxido de arsénico Cas: 1327-53-3	Tricloruro de arsénico Cas: 7784-34-1	Pentóxido de arsénico Cas: 1303-28-2	Arsina Cas: 7784-42-1
Circulatorio	Hemólisis, pancitopenia, anemia, leucopenia, coagulación intravascular diseminada	Hemólisis, pancitopenia, leucocitosis, mielo supresión, anomalías de la coagulación, anemia,	Hemólisis, pancitopenia,	Hemólisis, pancitopenia, anemia, coagulación intravascular diseminada	Hemólisis, leucocitosis
Endocrino	Hiperglicemia	Hiperglicemia		Hiperglicemia	
Hepático	Daño hepático, enzimas hepáticas anormales. Falla hepática	Daño hepático, enzimas hepáticas aumentadas, lesión de hígado	Daño hepático	Daño hepático	Ictericia, enzimas hepáticas aumentada, hepatomegalia
Renal	Falla renal	Falla renal, nefrotoxicidad,	Falla renal	Falla renal	Falla renal
Reproductivo y del desarrollo	Efectos en el embarazo: nacimiento de un bebé muerto, trastornos del embarazo	Efectos en el embarazo: muerte neonatal, muerte fetal,	Efectos en el embarazo: muerte neonatal	Efectos en el embarazo: muerte neonatal, encefalopatía, incremento abortos espontáneos, toxicidad fetal	
Dermatológico	Líneas de mees, herpes, quemaduras (prurito, Rush cutáneo)	Trastornos dérmicos (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico y dermatitis exfoliativa), piel seca, prurito, dermatitis de contacto, líneas de mees	Irritación cutánea, erupción bulbosa, envenenamiento, dermatitis (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico y dermatitis exfoliativa), línea de mee's.	Dermatitis.	
Gastrointestinal	Gastroenteritis	Dolor abdominal, vómitos, diarrea acuosa o sanguinolenta, debilidad y enrojecimiento de la piel	Irritación gastrointestinal, hemorragia gastrointestinal, gastroenteritis	Gastroenteritis, sabor a ajo	Náuseas y vómitos, pérdida de apetito, dolor abdominal
Otros efectos	Deshidratación, hipocalemia				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0-4 Efectos crónicos no carcinogénicos según forma química de arsénico

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
Nervioso	Encefalopatía tóxica, comportamiento anormal, neuropatía, enfermedad cerebrovascular, nistagmo, deterioro cognitivo, perturbación en el pensamiento,			neuropatía	
Respiratorio	Bronquitis asmática, irritación de las membranas mucosas, lesión del sistema respiratorio, bronquiectasias				
Cardiovascular	Miocarditis, isquemia, hipertensión, infarto al miocardio			Miocarditis, isquemia, incremento de presión arterial, infarto al miocardio	
Circulatorio	Anemia hemolítica, pancitopenia, anemia, macrocitosis		Pancitopenia	Pancitopenia, anemia, macrocitosis	
Endocrino	Diabetes mellitus				
Hepático	Daño hepático			Daño hepático	
Reproductivo y del desarrollo	Efectos en el embarazo (aborto espontáneo, muerte fetal, mortalidad neonatal y mortalidad infantil, así como una reducción significativa del peso al nacer). Disfunción eréctil	Efectos en el embarazo (muerte fetal, mortalidad neonatal), deterioro de la fertilidad masculina	Efectos en el embarazo (aborto espontáneo, muerte fetal, mortalidad neonatal y mortalidad infantil, así como una reducción significativa del peso al nacer)	Disfunción eréctil	
Dermatológico	Alopecia		Dermatitis (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico, hiperpigmentación y dermatitis exfoliativa)		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0-5 Efectos carcinogénicos según forma química de arsénico

Órgano/sistema afectado	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
Respiratorio	Cáncer de pulmón	Cáncer de pulmón	Mayor riesgo de cáncer de pulmón.	Cáncer de pulmón	
Renal	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	
Hepático	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	
Dermatológico	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	
Otros órganos/sistemas afectados	Ganglios linfáticos, médula ósea, próstata (*)	Ganglios linfáticos, médula ósea, próstata, genotóxico (mutación en leucocitos)	Parece ser mutagénico	próstata(*)	Carcinoma

(*): Asociado solo a exposiciones del tipo ocupacional.

Fuente: Elaboración propia

La estimación del riesgo extra de cáncer (RECV) para sustancias cancerígenas por la vía de inhalación, se lleva a cabo usando las concentraciones en el aire de la sustancia cancerígena y el criterio de toxicidad que en este caso corresponde el Riesgo Unitario Inhalatorio (IUR¹ por su sigla en inglés). En la tabla siguiente se presentan los niveles disponibles encontrados de riesgo unitario inhalatorio, con las concentraciones asociadas a un nivel de riesgo de 1 persona en 100.000.

Tabla 0-6 Coeficientes de riesgo asociados a efectos cancerígenos

Inhalation Unit Risk (IUR) (por ng/m ³)	Concentración asociada con riesgo de 1e-5 (ng/m ³)	Efecto crítico	Fuente
4,3e-6	2,3	Cáncer pulmonar	(US-EPA, 2011)
3,3e-6	3,0		(CARB, 1990)
0,2e-6	66,7		TCEQ (Erraguntla, Sielken, Valdez-Flores, & Grant, 2012)
0,7e-6	14,3		Netherlands (Dutch Expert Committee on Occupational Safety, DECOS) (Lewis, Beyer, & Zu, 2015)
1,5e-6	6,7		WHO Air Quality Guidelines for Europe.

Fuente: Elaboración propia

¹ El riesgo unitario inhalatorio (IUR) es la estimación cuantitativa en términos de riesgo por volumen de aire respirado expresado generalmente en unidades de ug/m³ de la sustancia cancerígena.(US-EPA, 1994)

Relación emisión-concentración de arsénico atmosférico

Para determinar la relación emisión – concentración mediante la definición de un factor (FEC), se supuso una relación lineal entre la variación de las emisiones atmosféricas de un contaminante y su concentración ambiental resultante, evaluada en diferentes receptores discretos. Por lo tanto, para cada dominio de simulación en donde se emplazan las 7 fundiciones y la planta de tostación se realizó una modelación de dispersión. Se seleccionaron estos dominios considerando que son los que tienen las mayores concentraciones observadas, así como más del 99% de las emisiones estimadas. De acuerdo con el inventario de emisiones procedentes de cada fuente de emisión reportada, se realizó la modelación del año 2020 completo de sus emisiones atmosféricas, así como la meteorología (WRF), contrastando con la información recogida en cada estación de monitoreo de calidad del aire del SINCA definidas de acuerdo con su representatividad por comuna y dominio.

Durante este desarrollo, y según los datos registrados en las estaciones del SINCA, se planteó la hipótesis de que pueda existir un nivel basal de arsénico, por el efecto de la resuspensión de material particulado depositado sobre el suelo, considerando este nivel basal dentro de la determinación del FEC. Para determinar esta contribución basal, se realizó un estudio estadístico que permitió contar con una estimación de la contribución basal para estaciones que representan las localidades dentro del dominio modelado.

Al realizar un análisis comparativo entre los resultados modelados y los observados de arsénico en las estaciones, en la mayoría de los casos se apreció una buena correlación. No obstante, los resultados del modelo de dispersión atmosférica aplicado presentaron, en líneas generales, una sobreestimación homogénea en los niveles de concentración de arsénico en las estaciones. Sin embargo, gracias a la metodología propuesta, la cual incorpora un factor de corrección (FC) asociado al error sistemático del modelo, se logró disminuir el sesgo entre los resultados modelados y los medidos en cada receptor de estudio. Esto permite corregir las diferencias sistemáticas resultantes de la aplicación del modelo meteorológico y de dispersión atmosférica, reflejado en la aproximación a la realidad en variables tales como topografía, uso de suelo, turbulencia atmosférica o la propia estimación de emisiones fugitivas. Se destaca que esta metodología resulta válida siempre y cuando se trate de un valor promedio anual y no un análisis episódico (horario o diario), por lo tanto, es válido en el caso del presente estudio de arsénico dado que los riesgos a la salud de las personas están asociados a una exposición crónica y no aguda.

Al analizar el impacto que representa la emisión a la atmósfera de una tonelada de arsénico por tipo de fuente, de acuerdo con el FEC (ver Tabla 0-7), dependerá de las condiciones meteorológicas, topográficas, la ubicación de las estaciones respecto de las fuentes y las características de las fuentes fugitivas. Todos estos parámetros se resumen en ecuaciones matemáticas que explican la relación entre las concentraciones observadas y las emisiones de las fuentes.

Tabla 0-7 Factores emisión concentración para localidades en dominio

Dominio	Receptor	Localidad	Relación FEC
Chuquicamata	Estación CD 23 de marzo	Calama	$C_{Calama} = \frac{E_{PA3}}{9.589} + \frac{E_{PA4}}{9.3367} + \frac{E_{PAS}}{79.901} + \frac{E_{FUGITIVA}}{8.948} + 0,009$
	Estación Nueva Chiu Chiu	ChiuChiu	$C_{Chiu-chiu} = \frac{E_{PA3}}{94.475} + \frac{E_{PA4}}{91.182} + \frac{E_{PAS}}{7.418} + \frac{E_{FUGITIVA}}{128.604} + 0,0037$
Altonorte	Estación Coviefi	Antofagasta	$C_{Antofagasta} = \frac{E_{PAS1}}{32.381} + \frac{E_{PAS3}}{31.473} + \frac{E_{FUGITIVA}}{18.383} + 0,0014$
	Estación Inacal	La Negra	$C_{La Negra} = \frac{E_{PAS1}}{113.860} + \frac{E_{PAS3}}{117.110} + \frac{E_{FUGITIVA}}{4.576} + 0,0161$
Potrerillos	Estación Cine Inca	Salvador	$C_{Salvador} = \frac{E_{PAS}}{20.810} + \frac{E_{FUGITIVA}}{15.912} + 0,002$
	Estación CAP	Potrerillos	$C_{Potrerillos} = \frac{E_{PAS}}{5.578} + \frac{E_{FUGITIVA}}{2.038} + 0,0055$
Hernán Videla Lira	Estación Paipote	Copiapó	$C_{Copiapó} = \frac{E_{HLE}}{2.968} + \frac{E_{PTGC}}{2.683} + \frac{E_{FUGITIVA}}{349} + 0,0017$
	Estación Tierra Amarilla	Tierra Amarilla	$C_{Tierra Amarilla} = \frac{E_{HLE}}{694} + \frac{E_{PTGC}}{776} + \frac{E_{FUGITIVA}}{588} + 0,0028$
Ventanas	Estación Puchuncaví	Puchuncaví	$C_{Puchuncaví} = \frac{E_{HTE}}{5.597} + \frac{E_{PAS}}{4.482} + \frac{E_{FUGITIVA}}{5.660} + 0,0047$
	Estación Quintero	Quintero	$C_{Quintero} = \frac{E_{HTE}}{2.507} + \frac{E_{PAS}}{2.159} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.096} + 0,0047$
	Estación Ventanas	Ventanas	$C_{Ventanas} = \frac{E_{HTE}}{2.678} + \frac{E_{PAS}}{2.022} + \frac{E_{FUGITIVA}}{4.290} + 0,0024$
Chagres	Estación Lo Campo	Lo Campo	$C_{Lo Campo} = \frac{E_{PAS}}{1.259} + \frac{E_{HORNO}}{724} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.405} + 0,0094$
	Punto de interés Llayllay	Llayllay	$C_{Llayllay} = \frac{E_{PAS}}{2.699} + \frac{E_{HORNO}}{1.824} + \frac{E_{FUGITIVA}}{3.146} + 0,0094$
	Punto de interés Panquehue	Panquehue	$C_{Panquehue} = \frac{E_{PAS}}{598} + \frac{E_{HORNO}}{526} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.921} + 0,0094$
Caletones	Estación Coya Población	Coya	$C_{Coya} = \frac{E_{PLG1}}{41.338} + \frac{E_{PLG2}}{58.074} + \frac{E_{FUGITIVA}}{14.584} + 0,0018$

Fuente: Elaboración propia

Antecedentes y propuesta de escenarios regulatorios de NPCA para arsénico

La propuesta de escenarios regulatorias de NPCA sigue un enfoque basado en el riesgo por exposición al Arsénico atmosférico. Dado que sus efectos comprobados se asocian a efectos crónicos, los escenarios propuestos siguen los lineamientos de las regulaciones internacionales estableciendo límites de concentración sobre los promedios anuales.

Internacionalmente, se observan diferentes regulaciones que buscan limitar las concentraciones atmosféricas de arsénico. Los valores límites usualmente consideran oscilan entre los 0,2 hasta los 24 ng/m³, con la mayor parte de los valores ubicándose en torno a 6 ng/m³. Al respecto, se hacen dos observaciones, 1) las regulaciones más estrictas no aplican a lugares que cuenten con fundiciones de cobre, y 2) las regulaciones que aplican a lugares con fundiciones de cobre consideran criterios de flexibilización. Para definir el valor de 6 ng/m³ varias regulaciones hacen referencia a la regulación europea (Directiva 2004/107/CE). Vale destacar que dicha regulación no establece una NPCA, sino que el valor de 6 ng/m³ corresponde a un valor objetivo, estableciendo un espacio de flexibilidad. Al respecto en su considerando número 5 se establece que:

“Los valores objetivos no exigirán medidas que supongan costos desproporcionados. En lo que respecta a las instalaciones industriales, dichos valores no implicarán la adopción de medidas que vayan más allá de la aplicación de las mejores técnicas disponibles (BAT), tal como establece la Directiva 96/6/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación y, en particular, o conducirán al cierre de ninguna instalación. Ahora bien, exigirán que los Estados miembros adopten todas las medidas de reducción rentables necesarias en los sectores afectados” - Directiva 2004/107/CE

Adicionalmente a lo anterior, se considera como antecedente las concentraciones actuales, especialmente en las zonas con fundiciones de cobre, y la relación estimada de emisiones y concentración. Considerando todo lo anterior, los escenarios normativos se diferencian sólo por el límite anual establecido, los cuales se relacionan con un determinado riesgo incremental *acceptable*. En particular los escenarios son:

- Escenario 2 en 10k (46,6): Escenario donde el riesgo incremental aceptado es equivalente a 2e-4, es decir, 2 casos en 10k durante toda la vida. Este escenario implica un riesgo incremental de cáncer similar al aceptado en las concentraciones de arsénico permitidas en el agua potable. Este riesgo incremental es equivalente a una concentración promedio anual de 46,6 ng/m³ de arsénico en MP10, considerando el IUR de la US-EPA.
- Escenario 1 en 10k (23,3): Escenario donde el riesgo incremental aceptado es equivalente a 1e-4, es decir, 1 caso en 10k durante toda la vida. Este escenario implica un nivel de riesgo incremental similar a la parte alta del rango del riesgo aceptado normalmente en EE.UU. Este riesgo incremental es equivalente a una concentración promedio anual de 23,3 ng/m³ de arsénico en MP10, considerando el IUR de la US-EPA.
- Escenario contribución limitada (15,0): Escenario de mayor ambición donde la contribución de las fundiciones es limitada. Para estimar el valor límite homogéneo se consideró que las contribuciones basales más altas están en torno a 9 ng/m³, sobre lo cual se consideró el valor objetivo de la normativa europea, alcanzando una concentración promedio anual permitida de 15 ng/m³. El resultado de esta norma, es que en aquellas zonas cuya contribución basal sea de 9 ng/m³, el aporte de las fuentes de emisión no pueda superar el valor objetivo europeo. Los 15 ng/m³ representan un riesgo

incremental aceptado equivalente a $6,7e-5$, es decir, 0,67 casos en 10k durante toda la vida.

Cabe destacar que, dada la actual estimación de la contribución basal, niveles como el valor objetivo de la regulación europea, no serían alcanzables en localidades como Calama. La estimación basal presentada se basa en un análisis estadístico de las series de tiempo de concentraciones y puede ser complementada por otras técnicas que permitan afinar este valor. Asimismo, en los análisis exploratorios por medio de simulaciones se observó que escenarios más ambiciosos no podrían ser alcanzados en algunas regulaciones sin reducción de la producción de las fundiciones en más de 20%. Al respecto, como toda modelación, está sujeta a los supuestos e incertidumbres propias del modelo, sin embargo, los resultados son consistente con las observaciones realizadas.

Evaluación de costos y beneficios de escenarios regulatorios propuestos

Para dar cumplimiento a los escenarios se identificaron conjuntos de medidas para cada fundición que implementadas de forma conjunta permitieran dar cumplimiento a los escenarios regulatorios propuestos. El criterio para la selección de las posibles medidas de mitigación fue la minimización del costo total de ellas. En este proceso se consideró los costos de inversión, operación y mantenimiento, costos por detención durante el proceso de instalación y de productividad reducida durante el tiempo de puesta en marcha.

Adicionalmente, además de tecnologías de mitigación, también se incluye la opción de que la fundición disminuyera su producción para dar cumplimiento a la propuesta de regulación, lo cual tiene el costo asociado a la producción perdida. Esta medida para dar cumplimiento, especialmente costosa de forma unitaria, es seleccionada cuando se tratan de diferencias muy pequeñas, por lo cual es más costo-eficiente reducir la producción levemente a instalar una nueva tecnología, o cuando la meta de reducción es tan ambiciosa que las medidas consideradas no alcanzar a dar cumplimiento.

Respecto a los beneficios, es posible que la implementación de las medidas, al no ser un ejercicio continuo, resulte en reducciones mayores a las estrictamente necesarias, las cuales son valorizadas según su impacto en la reducción de riesgo de cáncer de la población expuesta. De la misma forma, la implementación de las medidas también implica una reducción de otros contaminantes con efecto en la salud humana. En particular, se valorizan también los beneficios en salud por la reducción del riesgo de la población por mejora en los índices de MP2,5 asociadas a la implementación de las medidas. Vale destacar que, del total de beneficios estimados, la reducción de riesgo de mortalidad por reducción de las concentraciones de MP2,5 corresponde a cerca del 97% en todos los escenarios evaluados.

En vista de lo anterior, el resumen de los escenarios se presenta en la Tabla 0-8, donde se observa que de los escenarios evaluados sólo el escenario con un riesgo equivalente a 2 en 10 mil ($46,6 \text{ ng/m}^3$), presenta beneficios superiores a los costos. Se observa también, que el escenario más

ambicioso tiene una relación B/C cercana a 0,04 la cual se ve impactada por la necesidad de reducir la producción para poder dar cumplimiento a la normativa.

Tabla 0-8 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia

Escenario	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Esc 2 en 10k (46,6)	11	100.051	0,2	5,4	105.802	1,06
Esc 1 en 10k (23,3)	196	713.756	0,7	18,9	369.031	0,52
Esc Cont Lim (15,0)	266	11.542.409	0,8	22,6	441.151	0,04

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

Al hacer un análisis por fundición, se observan realidades diferentes, observándose que en aquellas fundiciones que actualmente tienen implementadas mayor número de tecnologías de mitigación, los costos suelen ser mayores. Lo anterior tiene sentido económico, puesto que se ven obligadas a implementar medidas más costosas, mientras que las otras fundiciones tienen mayor flexibilidad para seleccionar medidas más costo-eficientes. Por otro lado, los beneficios guardan relación directamente con, por un lado, el tamaño de la población expuesta, como también con las condiciones de dispersión que se resumen en los factores emisión-concentración.

Otros productos desarrollados

Si bien, los resultados presentados en el presente estudio representan la mejor información disponible para el consultor, es esperable que en la medida que las fundiciones, principales emisores de arsénico, alcancen su operación en régimen puedan variar en alguna medida los resultados. Asimismo, la información disponible por el DS 28/2013 del MMA aumenta mes a mes, lo cual permite complementar la información base y generar conclusiones más robustas. De esta forma, es esperable que nuevos análisis se puedan realizar a futuro.

Por esta razón, junto con el informe, se entregan una serie de anexos en un documento aparte, junto con anexos digitales con las bases de datos, planillas, modelos y otros antecedentes relevantes. Todos estos documentos fueron desarrollados considerando que eventualmente podrían ser actualizados, para refinar, complementar y generar nuevos análisis.

1. Objetivos del estudio

De acuerdo con las bases técnicas de la licitación, los objetivos son:

1.1 Objetivo general

Proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico y también para la revisión de la Norma de Emisión para fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, considerando un análisis técnico y económico, así como efectos en la salud y beneficios económicos asociados a reducciones de arsénico y otros contaminantes.

1.2 Objetivos específicos

Objetivo Específico 1: Obtener antecedentes para Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico; a través de:

- a. Analizar el comportamiento histórico de la concentración de arsénico en material particulado, según disponibilidad de información a nivel nacional, y realizar un diagnóstico de la calidad del aire por arsénico en material particulado.
- b. Revisar y compilar inventarios de emisión disponibles a nivel nacional para arsénico en material particulado, identificando las fuentes emisoras a lo largo del país.
- c. Recopilar y sistematizar estudios sobre efectos en salud y coeficientes de riesgo asociados a la exposición a concentraciones de arsénico en el aire, en sus diferentes formas, según sea necesario.
- d. Proponer una metodología y desarrollar los antecedentes necesarios que permita estimar relaciones entre emisión y concentración de arsénico en aire.
- e. Generar y recopilar los antecedentes técnico-económico para fundamentar, a lo menos, tres alternativas de propuestas regulatorias, para la elaboración de una norma primaria de calidad del aire para arsénico.
- f. Evaluar costo de la aplicación de las alternativas de propuestas regulatorias.

Objetivo Específico 2: Revisión de la Norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico; a través de:

- a. Estimar la evolución y cambios en calidad del aire (gases y material particulado), desde el momento de dictación de la Norma de Fundiciones (D.S. 28 de 2013) hasta la actualidad, para las comunas aledañas a fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- b. Analizar y describir el escenario nacional e internacional para Fundiciones de Cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- c. Analizar la regulación internacional para emisiones al aire de Fundiciones de Cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- d. Identificar las potenciales tecnologías de abatimiento para reducir las emisiones de gases y partículas (SO₂, NO_x, MP y arsénico) en fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, en cada uno de los tipos de procesos (con y sin combustión), estimando los costos de inversión, operación y mantención.

- e. Estimar el potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de arsénico.
- f. Resumir resultados de investigaciones científicas que aporten actualizaciones sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales, y metodologías de medición de emisiones para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- g. Elaborar al menos tres escenarios de actualización de la norma existente, con aplicación a nivel nacional, considerando lo solicitado por el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión.

2. Comportamiento histórico de las concentraciones de Arsénico

En la presente sección se analiza la evolución de la concentración de arsénico en material particulado observada en los antecedentes disponibles de las estaciones de monitoreo de calidad del aire cercanas a fundiciones. En primer lugar, se describe las fuentes de información, para luego profundizar el detalle de los niveles de concentraciones históricas, a nivel de estación.

2.1 Coordinación con contraparte técnica

Con el objetivo de alinear las expectativas, acordar métodos y presentar avances, se acordó con la contraparte técnica una primera reunión el día 30 de agosto 2021. En esta reunión se discutieron algunos aspectos relacionados a la información provista en el marco del estudio. También se acuerda una segunda reunión con presencia de la SMA.

En la segunda reunión, realizada el 7 de septiembre 2021. El equipo consultor realiza una exposición sobre diferentes hallazgos realizados en la información revisada. La SMA entrega nuevos antecedentes para la consideración del consultor y compromete nuevos antecedentes complementarios.

2.2 Fuentes de información disponible

La información disponible que fue analizada corresponde a reportes de todas las estaciones de monitoreo de calidad del aire en las zonas donde se encuentran las fundiciones de cobre y otras fuentes de emisión de arsénico. En ellas se miden, entre otros contaminantes, MP10, MP2,5 y arsénico (As). Estas se detallan en la siguiente Tabla 2-1. Además, en esta tabla se indica si la estación de monitoreo cuenta con representatividad poblacional y para cuáles contaminantes. Las condiciones para considerar una estación de monitoreo como representativa para los contaminantes MP10 y MP2,5 se establecen en la Resolución Exenta N°744 de 2017 y la Resolución Exenta N°106 de 2013, de la Superintendencia del Medio Ambiente, respectivamente.

Tabla 2-1 Descripción de fuentes y sus estaciones cercanas con medición de arsénico

Zona, fuente principal	Región – Provincia	Cantidad estaciones	Nombre Estación	Representatividad poblacional
Tocopilla, Termoeléctrica	Antofagasta – Tocopilla	1	Super Site	MP10, MP2,5, SO ₂ , CO, NO ₂
Chuquicamata, Fundición	Antofagasta – El Loa	8	Aukahuasi	N/A
			C.P.V.K ²	MP10, MP2,5
			CD 23 de Marzo ³	MP10, MP2,5
			Centro	MP10, MP2,5
			Chiu-Chiu	N/A

² Colegio Pedro Vergara Keller, en adelante C.P.V.K.

³ Centro deportivo 23 de marzo, en adelante CD 23 de Marzo

Zona, fuente principal	Región – Provincia	Cantidad estaciones	Nombre Estación	Representatividad poblacional
			Nueva Chiu-Chiu	MP10
			Hospital El Cobre	MP10, MP2,5, SO ₂
			Servicio Médico Legal	SO ₂
Spence, Minera	Antofagasta – Antofagasta	2	Sierra Gorda	MP10
			Spence	S/I
Andina, Termoeléctrica	Antofagasta – Antofagasta	3	Ferrocarril	MP10, SO ₂
Mejillones, Termoeléctrica	Antofagasta – Antofagasta		J.J. Latorre	N/A
			Subestación Eléctrica	N/A
Altonorte, Fundición (ver Nota 1)	Antofagasta – Antofagasta	4	Coviefi	MP10, SO ₂
			La Negra-Altonorte	S/I
			La Negra-Inacal	S/I
			Sur	N/A
Potreros, Fundición	Atacama – Chañaral	4	CAP	N/A
			Cine Inca*	N/A
			Doña Inés	N/A
			Intelec*	N/A
Hernán Videla Lira, Fundición	Atacama – Copiapó	4	Copiapó	MP10, MP2,5, SO ₂
			Paipote	MP10, SO ₂
			San Fernando	MP10, SO ₂
			Tierra Amarilla	MP10, SO ₂
Ventanas, Fundición	Valparaíso – Valparaíso	8	La Greda	MP10, MP2,5, SO ₂
			Los Maitenes	MP10, MP2,5, SO ₂
			Puchuncaví	MP10, MP2,5, SO ₂
			Quintero	MP10, MP2,5, SO ₂
			Quintero Centro*	MP10, SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃ , Pb
			Sur	N/A
			Valle Alegre	MP10, MP2,5, SO ₂
			Ventanas*	N/A
ENAP Aconcagua, Refinería	Valparaíso - Valparaíso	4	Colmo	MP10, SO ₂
			Concón	MP10, MP2,5, SO ₂
			Junta de Vecinos	MP10, SO ₂
			Las Gaviotas	SO ₂
Santiago, Ciudad	Metropolitana - Santiago	1	Parque O'Higgins	MP10, SO ₂ , CO, O ₃
Chagres, Fundición	Valparaíso – San Felipe de Aconcagua	2	Catemu	MP10
			Lo Campo	MP10, SO ₂
Caletones, Fundición	O'Higgins – Cachapoal	3	Coya Club	N/A
			Coya Población	MP10, SO ₂
			Sewell	N/A
Temuco, Ciudad	La Araucanía – Cautín	2	Las Encinas	MP2,5
			Padre Las Casas	S/I

Nota 1: Antecedentes de mediciones de la estación La Negra de Altonorte también se obtienen bajo el nombre de estación Norte, que en adelante se tratará bajo el nombre La Negra-Altonorte. Empresa Incesa tiene otra estación llamada La Negra, que se denominará La Negra-Inacal. Ambas dejaron de ser representativas el presente año. Sin embargo, los datos analizados a continuación fueron medidos durante el período en que dichas estaciones eran representativas para los contaminantes MP10 y SO₂.

Nota 2: Las estaciones marcadas con * consideran la representatividad informada en el SINCA, ya que no se encontró información de otra fuente

Nota 3: N/A indica que la estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

Nota 4: S/I indica que no se dispone de información de representatividad para esa estación

Fuente: Elaboración propia

Para estas zonas la cantidad de datos de medición de arsénico disponibles es variable, tanto entre estaciones como por año. En la Tabla 2-2 se presenta la cantidad de datos numéricos⁴ disponibles de medición de arsénico en MP, desde 2012 a 2020. Se puede observar que hay escasos antecedentes de medición de arsénico disponibles para el periodo previo a 2014. Lo anterior coincide con la publicación del D.S. N°28, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente, en diciembre de 2013, que establece la norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico. A partir de la publicación de dicha norma se ha avanzado en la estandarización y sistematización de la información relativa a las concentraciones atmosféricas de arsénico, lo cual ha resultado en un aumento relevante en la disponibilidad de información.

Respecto a mayores detalles metodológicos asociados al monitoreo, en la Sección 2.4.1 se presenta la metodología utilizada para el análisis de As en MP10 y el laboratorio a cargo de dicho análisis.

⁴ Es decir, donde se cuenta con un valor numérico de medición. Existen mediciones que no reportan valores numéricos, lo que se puede deber a valores menores al límite de detección del instrumento, datos declarados inválidos por distintos motivos (por ejemplo, falla de energía, falla del equipo, mantención del equipo, valor fuera de rango, etc.) o simplemente declarados nulos.

Tabla 2-2 Cantidad de datos disponibles de As en MP10 sin errores de concentración de As, por estación de cada zona

Fuente principal	Estación	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Tocopilla	Super Site													3	36	35	21	35	26	12	
	Escuela E-10											36	36	33							
Chuquicamata*	Aukahuasi											116	114	118	117	111	120	109	104	37	
	C.P.V.K											95	104	107	88	110	117	102	118	35	
	CD 23 de Marzo											88	70	78	93	110	119	118	121	40	
	Centro											78	83	111	110	117	121	116	120	40	
	Hospital El Cobre	121	121	120	99	85	91	79	90	81	81	75	80	85	112	120	122	117	121	40	
	Chiu-Chiu						66	93	67	68	71	116	119	117	116	122	121	14			
	Nueva Chiu-Chiu																		85	117	39
Servicio Médico Legal						76	95	112	102	96	99	97	10	108	119	119	115				
Spence	Sierra Gorda										8	18	24	18	10	17	11	7	13	3	
	Spence										8	15	15	11	13	14	10	13	11	3	
Mejillones	Ferrocarril													20	60	58	60	60	54	25	
Andina	J.J. Latorre													17	49	45	47	48	43	20	
	Subestación Eléctrica													17	50	47	47	48	42	20	
Altonorte*	Coviefi									122	110	110	99	92	119	100	101	104	93		
	La Negra-Altonorte								122	121	122	122	111	118	119	113	45				
	La Negra-Inacal								119	103	105	104	122	120	107	107	108	109	110	42	
	Sur								119	115	103	121	116	120	118	115	116	116	96		
Potrerillos*	CAP									24	24	24	24	24	24	24	24	22	23		
	Cine Inca											18	20	19	24	15	17	20	22		
	Doña Inés									24	22	22	22	22	22	24	22	22	18		
	Intelec												1	2	1						
Hernán Videla Lira*	Copiapó								115	97	121	107	119	121	114	149	83	103	121		
	Paipote								117	107	121	120	121	127	121	165	116	116	119		
	San Fernando								113	107	122	119	119	132	112		16	112	120		
	Tierra Amarilla								117	107	119	118	122	133	122	168	120	120	122		
Ventanas*	La Greda										9	107	119	117	120	117	120	120	121	11	
	Los Maitenes										10	107	118	118	121	122	118	119	119	10	
	Puchuncaví										9	107	122	118	120	121	119	118	119	10	
	Quintero										9	103	112	108	115	116	101	115	110	8	
	Quintero Centro																	12	12	9	
	Sur										10	106	116	114	118	115	117	116	118	10	
	Valle Alegre										10	105	119	113	118	117	113	118	119	11	
	Ventanas											70	116	113	121	121	113	119	120	11	
Refinería ENAP Aconcagua	Colmo									2	22	23	21	20	24	19	24	22	24	20	
	Concón									2	21	22	20	17	23	23	24	24	24	20	

Fuente principal	Estación	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Junta de Vecinos									2	22	23	17	19	22	21	23	24	24	20
	Las Gaviotas									2	21	24	22	19	24	21	24	24	24	20
Chagres*	Catemu												4	4	4	4	8	12	12	
	Lo Campo												4	4	4	4	8	12	11	
Caletones*	Coya Club												12	12	27	48	46	47	47	46
	Coya Población												12	12	57	113	107	105	108	110
	Sewell												12	12	24	50	48	45	48	46

Nota 1: Todas las zonas marcadas con * corresponden a zonas con fundiciones de cobre.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados por contraparte

A modo informativo, en la Tabla 2-3 se presenta el detalle de los datos documentados sin valor numérico. En total son 2.866 datos reportados sin valor por distintos motivos, donde los principales son valores inferiores al límite de detección (47%), datos inválidos⁵ (30%), y el resto son reportados como nulos sin indicar el motivo. Algunos motivos por los que se pueden declarar datos sin valor numérico son datos inválidos por falla de energía, datos inválidos por falla de equipo, sin dato por precipitación, etc. Cabe destacar que los 2.866 datos disponibles sin valor numérico representan el 9,24% de los datos disponibles totales.

⁵ De acuerdo a la normativa establecida en el D.S. N°61/2008 del MINSAL

Tabla 2-3 Resumen de los valores disponibles de As en MP10 documentados sin valor numérico, sistematizados como errores en la base de datos compilada

Fuente principal	Estación	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Tocopilla	Super Site														1	15	1	4	
Chuquicamata*	Aukahuasi										6	8	3	5	11	5	12	18	3
	C.P.V.K										27	18	14	34	12	8	9	4	5
	CD 23 de Marzo										33	52	13	29	12	6	3	1	
	Centro										44	39	10	12	5	4	5	2	
	Hospital El Cobre	1	1	23	36	28	43	32	40	40	47	42	6	10	2	3	4	1	
	Chiu-Chiu					15	26	55	53	51	5	3	4	6		4	5		
	Nueva Chiu-Chiu																6	5	1
	Servicio Médico Legal						2	27	10	19	26	23	25		14	3	6	6	
Spence	Sierra Gorda										6		6	14	7	13	17	11	11
	Spence										9	9	5	11	10	14	11	13	11
Mejillones	Ferrocarril														2			6	
Andina	J.J. Latorre														4	1		5	
	Subestación Eléctrica														2	1		6	
Altonorte*	Coviefi									1	2	17	27	3	21	21	16	17	
	La Negra-Altonorte								1		1	10	9	3	9	7			
	La Negra-Inacal							4	20	18	19	1	3	16	22	14	13	7	9
	Sur							1	7	19	1	4	2	4	6	6	6	14	
Potreros*	Cine Inca									2	6	4	5		1	3	2		
	Doña Inés									2									
	Intelec									2	24	23	20	23	16				
Hernán Videla Lira*	Copiapó							7	5	1	4	3	23	8	23	38	18	1	
	Paipote							5	5	1	1	1	8	2	7	5	5	3	
	San Fernando							9	5		2	3	6	10	172	105	9	2	
	Tierra Amarilla							5	5	3	3		8		4	1	1		
Ventanas*	La Greda									1	4	3	4	2	5	2	1	1	
	Los Maitenes										2	4	3	1		4	2	3	1
	Puchuncaví									1	4		3	2	1	3	3	3	1
	Quintero									1	8	10	13	7	6	21	6	12	3
	Sur										5	6	7	4	7	5	5	4	1
	Valle Alegre										5	3	8	4	5	9	3	3	
	Ventanas											6	8	1	1	9	2	2	
Refinería ENAP Aconcagua	Colmo									2	1	3	2		3				
	Concón									3		4	5	1	1				
	Junta de Vecinos									2	1	3	3	2	3				
	Las Gaviotas									3		2	3		3				

Fuente principal	Estación	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Chagres*	Lo Campo																		1	
Caletones*	Coya Club															2	1	1	2	
	Coya Población													1	3	13	16	14	12	
	Sewell																2		1	

Nota 1: Todas las zonas marcadas con * corresponden a zonas con fundiciones de cobre

Nota 2: Estación Escuela E-10 de la Termoeléctrica Tocopilla, estación CAP de la fundición Potrerillos, estación Quintero Centro de la fundición Ventanas y estación Catemu de fundición Chagres no presentan este tipo de errores en sus mediciones.

Fuente: Elaboración propia en base a información provista por contraparte técnica

2.2.1 Consolidación de base de datos con información sistematizada

Los antecedentes disponibles de medición de concentraciones de arsénico y otros contaminantes regulados fueron sistematizados en una base de datos única. Los campos utilizados en esta base de datos se describen en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Campos de la base de datos de sistematización de concentraciones medidas

Campo BD	Descripción
Origen_informacion	Indica la carpeta de origen de la información dentro de la carpeta compartida por la contraparte técnica o bien a partir del SINCA
Informe	Indica el documento del cual se obtuvieron los datos.
Fuente	Fundición emisora de los contaminantes evaluados.
Estacion	Estación de monitoreo de calidad del aire de la fuente emisora.
Forma_medicion	Indica si la medición es discreta o continua.
Contaminante	Indica el contaminante medido. Los contaminantes sistematizados son As en MP10, MP10, MP2,5, NO, NO ₂ , NO _x , SO ₂ y As en MP2,5.
Detalle	Indica si la concentración medida es promedio, máxima, o directa, según los términos utilizados en los reportes.
Tipo	Indica si es mensual, diaria, horaria, cada 5 minutos o por minuto.
Hora	Hora de la medición, si aplica.
Fecha	Fecha de la medición.
Dia	Día de la medición.
Mes	Mes de la medición.
Ano	Año de la medición.
Valor_documento	Valor indicado en el reporte, incluyendo valores no numéricos (errores, datos no válidos)
Valor_numerico	Valor numérico indicado en los reportes. Toma valor cero si el valor del documento tiene algún error.
Error	Indica el valor no numérico reportado en el reporte si es un error o no válido, y toma el valor "Sin error" para todos los valores numéricos reportados.
Justificacion_error	Describe la justificación del error, en caso de que se indique el motivo en el informe del cual se obtuvieron los datos.
ID_Filtro	Identificador del filtro, si la información estaba disponible.
Unidad	Unidad de medida de la concentración medida.
ID_Fuente_Estacion	Identificador que concatena la fuente con la estación.
Estacion_editada	Nombre unificado de las estaciones, por ejemplo, para el caso de las estaciones La Negra y Chiu-Chiu cuyas mediciones se han reportado bajo distintos nombres de estación.
Valor_numerico_corregido	En los casos en que el SO ₂ fue reportado en la unidad de medida ppb, se realiza una transformación a µg/m ³ utilizando el peso molar del SO ₂ .
Unidad_corregida	En los casos en que el SO ₂ fue reportado en la unidad de medida ppb, se realiza una transformación a µg/m ³ utilizando el peso molar del SO ₂ y la unidad registrada en la columna Unidad pasa a ser µg/m ³
Tipo de información	Para la información proveniente del SINCA se indica si los registros son validados, preliminares o no validados. La demás información se indica como proporcionada por la contraparte técnica.

Fuente: Elaboración propia

La base de datos sistematizada se entrega como anexo digital en la carpeta “**Anexo A: Calidad del Aire**” en el documento “**NORMAAS-BD_concentraciones.xlsx**”. En esta planilla también se incorpora una hoja “Léeme” que describe los campos indicados en la Tabla 2-4, una hoja con los estadígrafos de la concentración de As en MP10, y una con algunas características descriptivas de las estaciones.

2.3 Concentraciones históricas de arsénico

En la presente subsección se describe la evolución de las concentraciones históricas de arsénico medidas en MP10 en las estaciones de monitoreo descritas en la Sección 2.2. Además, se incorpora el análisis de la respectiva evolución de As en MP2,5 en los casos en que se dispone de datos pertinentes (específicamente en las zonas de las fundiciones Chuquicamata y Ventanas, además de en los alrededores de las termoeléctricas Andina y Mejillones y en las estaciones de las ciudades de Santiago y Temuco). En la Sección 2.4.1 se presentan las metodologías de análisis de material particulado y arsénico utilizadas para medir las concentraciones en los filtros de las distintas estaciones.

2.3.1 Diagnóstico a nivel nacional

En la presente subsección se presenta un diagnóstico de la calidad del aire por arsénico a nivel nacional, con énfasis en ciudades aledañas a las siete fundiciones de cobre localizadas en las regiones de Antofagasta, Atacama, Valparaíso y O’Higgins.

En la siguiente Figura 2-1 se presenta un mapa con las concentraciones medianas para 2020 de las estaciones que miden arsénico a lo largo del país y en la Tabla 2-5 se presenta un resumen de las concentraciones de arsénico en MP10 por estación en el año 2020.

Se observa que, para los años seleccionados, las mayores concentraciones medianas se encuentran en las cercanías a la fundición Caletones, cercana a Rancagua y de la fundición Altonorte, cercana a Antofagasta, con medianas sobre 60 [ng/m³N], siendo las estaciones con mayores concentraciones Sur en el caso de Altonorte y Sewell en el caso de Caletones. Se debe tener en cuenta que ambas estaciones se encuentran cercanas a las respectivas fundiciones, con sólo 1,4 y 6,8 kilómetros respectivamente de distancia, y que en general el viento proviene desde la dirección de las fundiciones (la mayor parte del tiempo en la estación Sur – ver Anexo de la Sección 10.3.7 – y alrededor de un 30% del tiempo en la estación Sewell – ver Anexo de la Sección 10.4.2). Se debe considerar también que ninguna de las dos es estación representativa de MP10.

Le siguen las concentraciones observadas en la cercanía a la fundición Chuquicamata, con medianas entre 45 y 60 [ng/m³N] en Calama, en donde las mayores concentraciones de arsénico se registran en las estaciones Aukahuasi, estación próxima a la fundición, y CD 23 de Marzo, ubicada en la ciudad de Calama. Luego, siguen las concentraciones medidas en la región de Valparaíso, con medianas entre 30 y 45 [ng/m³N], dominadas por las concentraciones de arsénico medidas en las estaciones Quintero, Quintero Centro y Los Maitenes.

Por otra parte, en las cercanías de Hernán Videla Lira y Potrerillos la mediana se encuentra en el orden de 15 a 30 [ng/m³N]. Las mayores concentraciones de arsénico se observan en las estaciones Tierra Amarilla y Paipote en el caso de Hernán Videla Lira y en la estación CAP⁶ en el caso de Potrerillos.

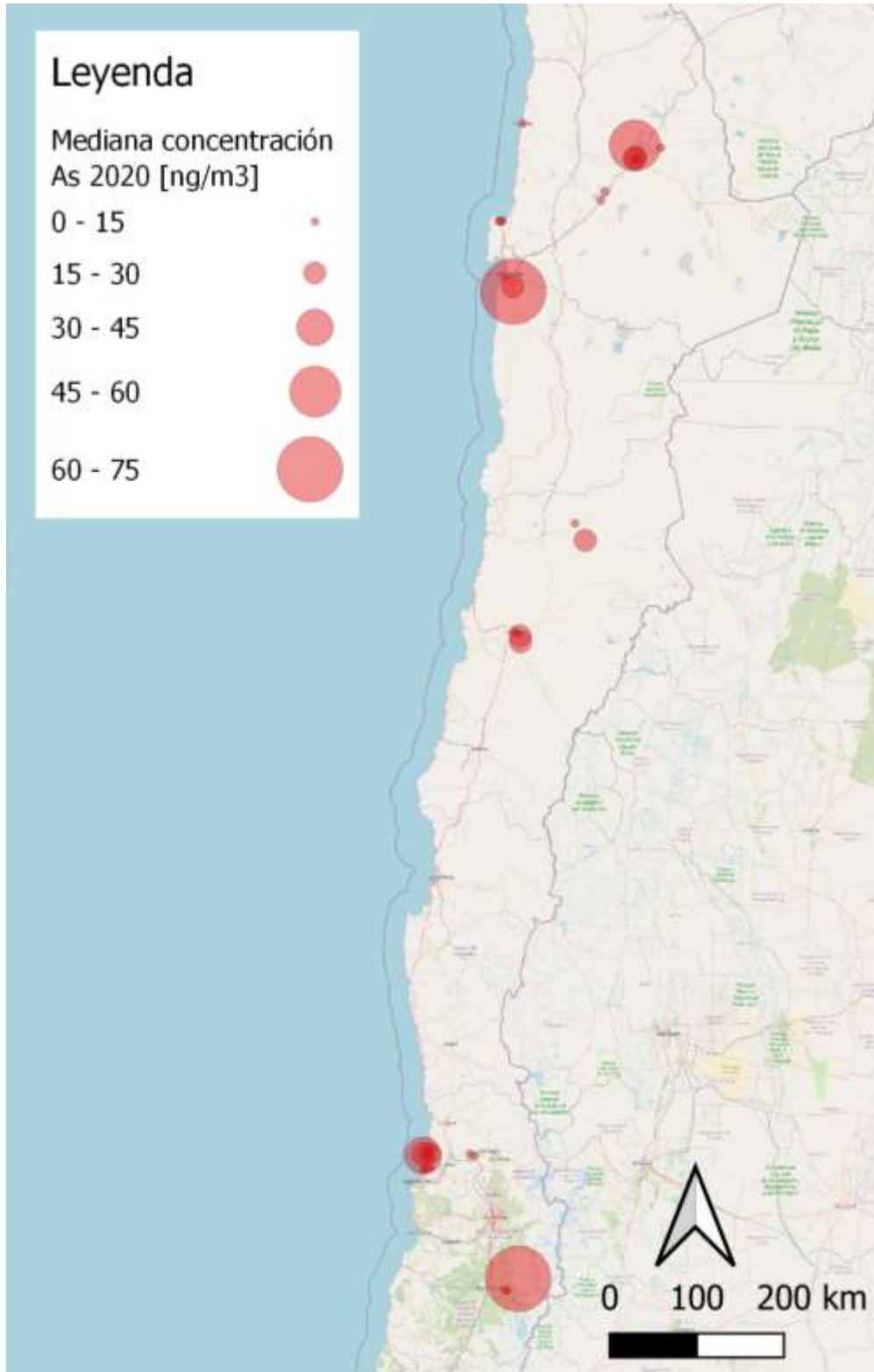
En cuanto a las localidades cercanas a la fundición Chagres, las concentraciones medianas no superan los 15 [ng/m³N].

Respecto a las zonas que no cuentan con fundiciones de cobre, las termoeléctricas Andina, Mejillones y Tocopilla presentan las menores medianas, las que se corresponden a 1 [ng/m³N]. Estos valores son seguidos por los de las estaciones asociadas a la refinería ENAP, cuyas medianas se encuentran en el orden de 3 a 4 [ng/m³N]. Por último, se encuentran las concentraciones medidas por las estaciones asociadas a la minera Spence, cuyas medianas corresponden a 10 [ng/m³N].

Por último, la estación Parque O'Higgins, ubicada en Santiago y las estaciones Las Encinas y Padre Las Casas, ubicadas Temuco, únicamente miden MP_{2,5}, por lo que sólo se dispone de información de As en MP_{2,5}. La mediana de estas estaciones corresponde a 0 [ng/m³N].

En la siguiente sección se profundizan los resultados de las mediciones de cada estación, agrupadas según su cercanía a las fuentes emisoras, principalmente fundiciones de cobre, termoeléctricas y refinerías.

⁶ Sin considerar la estación Doña Inés, cuyas concentraciones medidas están en un orden de magnitud mayor debido a que la estación se encuentra ubicada en la fundición misma, y la estación Intelec, cuyas mediciones más recientes son en el año 2016. Se debe tener en cuenta además que ninguna de estas dos estaciones es representativa de ningún contaminante.



(*) No se incluyen los valores de Doña Inés, debido a que los valores tienen un orden de magnitud mayor.

Figura 2-1 Mapa valores mediana concentración As en MP10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$], año 2020, nacional
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-5 Resumen concentraciones de arsénico en MP10 [ng/m³N] por estación en el año 2020

Zona, Fuente principal	Región – Provincia	Nombre Estación	Representatividad poblacional MP10	Número de datos	Promedio	Mediana	Máxima
Tocopilla, Termoeléctrica	Antofagasta – Tocopilla	Super Site	Sí	26	2	1	6
Chuquicamata, Fundición	Antofagasta – El Loa	Aukahuasi	No	102	72	50	483
		C.P.V.K	No	118	21	16	179
		CD 23 de Marzo	Sí	118	29	23	664
		Centro	Sí	117	7	6	26
		Nueva Chiu-Chiu	No	117	5	4	23
		Hospital El Cobre	Sí	121	6	5	23
		Servicio Médico Legal ^b	No	114	14	12	46
Spence, Minera	Antofagasta – Antofagasta	Sierra Gorda	Sí	13	10	10	18
		Spence	S/I ^h	11	10	10	15
Andina, Termoeléctrica	Antofagasta – Antofagasta	Ferrocarril	Sí	54	2	1	9
Mejillones, Termoeléctrica	Antofagasta – Antofagasta	J.J. Latorre	No	43	3	1	12
		Subestación Eléctrica	No	42	3	1	11
Altonorte, Fundición	Antofagasta – Antofagasta	Coviefi	Sí	93	8	5	39
		La Negra-Altonorte ^c	No	45	20	14	98
		La Negra-Inacal	No	110	42	28	199
		Sur	No	95	103	70	455
Potreriillos, Fundición	Atacama – Chañaral	CAP	No	23	30	25	118
		Cine Inca ^a	No	22	5	2	35
		Doña Inés	No	18	1.056	551	10.070
		Intelec ^{a d}	No	1	53	53	53
Hernán Videla Lira, Fundición	Atacama – Copiapó	Copiapó	Sí	120	19	8	167
		Paipote	Sí	119	54	20	559
		San Fernando	Sí	120	24	10	150
		Tierra Amarilla	Sí	122	34	23	227
Ventanas, Fundición	Valparaíso – Valparaíso	La Greda	Sí	121	14	7	71
		Los Maitenes	Sí	119	30	19	182
		Puchuncaví	Sí	119	14	8	92
		Quintero	Sí	110	50	20	321
		Quintero Centro ^a	Sí	12	57	43	166

Zona, Fuente principal	Región – Provincia	Nombre Estación	Representatividad poblacional MP10	Número de datos	Promedio	Mediana	Máxima
		Sur	No	118	22	10	245
		Valle Alegre	Sí	119	12	9	74
		Ventanas ^a	No	120	14	8	111
ENAP Aconcagua, Refinería	Valparaíso – Valparaíso	Colmo	Sí	23	3	4	8
		Concón	Sí	24	3	3	11
		Junta de Vecinos	Sí	24	3	3	8
		Las Gaviotas	No	24	4	4	9
Santiago	Metropolitana – Santiago	Parque O’Higgins ^{e f}	Sí	80	1	0	10
Chagres, Fundición	Valparaíso – San Felipe de Aconcagua	Catemu	Sí	12	10	8	20
		Lo Campo	Sí	11	16	11	31
Caletones, Fundición	O’Higgins – Cachapoal	Coya Club	No	47	10	5	42
		Coya Población	Sí	108	6	3	46
		Sewell	No	48	67	64	171
Temuco	La Araucanía – Cautín	Las Encinas ^{e g}	Sí	64	0	0	7
		Padre Las Casas ^{e g}	S/I ^h	61	1	0	31

- Cine Inca, Intelec, Ventanas y Quintero Centro utilizan la representatividad indicada en el SINCA, ya que no se encontró información proveniente de otra fuente.
- Para la estación Servicio Médico Legal se presenta información del año 2019 ya que este es el último año en el que dispone de información.
- Para la estación La Negra-Altonorte se presenta información del año 2018 ya que este es el último año en el que dispone de información.
- Para la estación Intelec se presenta información del año 2016 ya que es el último año en el que dispone de información.
- Las estaciones Parque O’Higgins, Las Encinas y Padre Las Casas miden solamente MP2,5, por lo que se presentan las mediciones de As en MP2,5.
- Para la estación Parque O’Higgins se presenta información del año 2018 ya que este es el último año en el que dispone de información.
- Para las estaciones Las Encinas y Padre Las Casas se presenta información del año 2019 ya que este es el último año en el que disponen de información.
- Sin información.

Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Análisis longitudinal de As en MP10 por estaciones

A continuación, se describe la evolución en el tiempo de las concentraciones de arsénico medidas en cada fundición, con detalles por estación, tanto como concentraciones de arsénico en sí como la fracción de arsénico sobre el MP10. Junto con esto, también se presentan los perfiles anuales de concentración de As en MP10 para las estaciones con mayor cantidad de observaciones.

2.3.2.1 Estaciones cercanas a termoeléctrica Tocopilla

En la Figura 2-2 se muestra la ubicación de la termoeléctrica Tocopilla, donde se observa su ubicación respecto a la ciudad de Tocopilla, donde se encuentra la estación Super Site, 2,9 km al noreste de la termoeléctrica. Esta estación antiguamente se denominaba “Escuela E-10” y fue reubicada a finales del año 2015 aproximadamente 50 metros hacia el oriente, cambiando su nombre a “Super Site”. La presentación de los datos a continuación se realiza por separado para la antigua estación “Escuela E-10” y para la estación “Super Site”.



Figura 2-2 Mapa termoeléctrica Tocopilla, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-3 se presenta la evolución de la concentración de As en MP10 medida en la antigua estación Escuela E-10 y en la actual Super Site, y los estadígrafos de ambas se resumen en la Tabla 2-6 y Tabla 2-7⁷. Se observa una tendencia a la disminución de las concentraciones, tanto en las medianas como en los valores máximos observados, con concentraciones medianas en el rango de 1 a 5 [ng/m³N] en todo el periodo. La única excepción corresponde a la concentración mediana del año 2015 en Super Site, sin embargo, se destaca que solo se registran 3 mediciones a fines de diciembre de dicho año. La disminución de las concentraciones entre el año 2019 y 2020 puede tener un origen en la desconexión de las unidades 12 y 13 de Engie Chile (termoeléctricas a carbón).

Cabe destacar que, en comparación con otras zonas, se observa una baja cantidad de mediciones para esta estación, las cuales se realizan tres veces al mes. Adicionalmente, en los años 2018, 2020 y 2021 no se dispone de información para todos los meses.

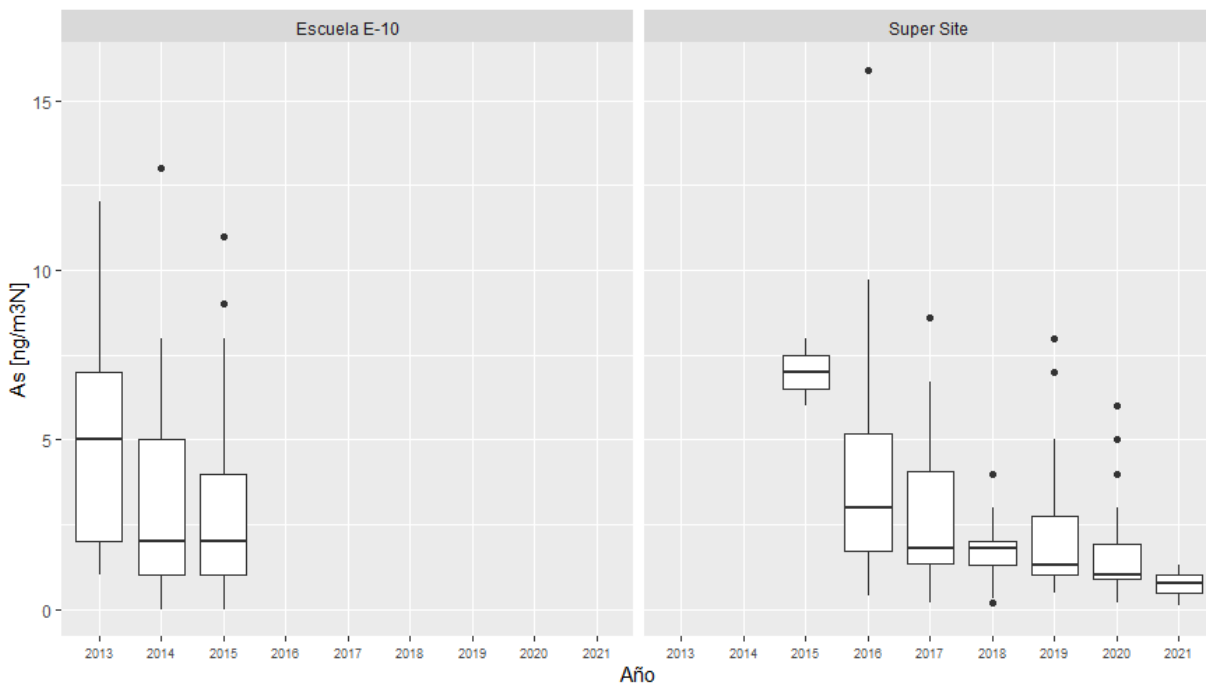


Figura 2-3 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

⁷ Para realizar la separación de los datos, se consideró que la estación Escuela E-10 realizó muestreos hasta el día 17 de noviembre de 2015. Luego esta estación fue reubicada, cambiando su nombre a Super Site y empezando a hacer muestreos el día 7 de diciembre de 2015. Cabe destacar que, a partir de la Resolución Exenta N°1413, de fecha 8 de octubre de 2019 de la Superintendencia del Medio Ambiente, los datos medidos de MP10 de la estación Super Site son válidos desde el 18 de diciembre de 2015. En el análisis de las concentraciones de la estación Super Site se incluye el valor de concentración de As medido el 17 de diciembre de 2015, a pesar de que los datos aún no estaban declarados como representativos de MP10.

Tabla 2-6 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, estación Escuela E-10

Año	2013	2014	2015
N	36	36	33
Max.	12	13	11
3rd Qu.	7	5	4
Mediana	5	2	2
Media	5	3	3
1st Qu.	2	1	1
Min.	1	0	0

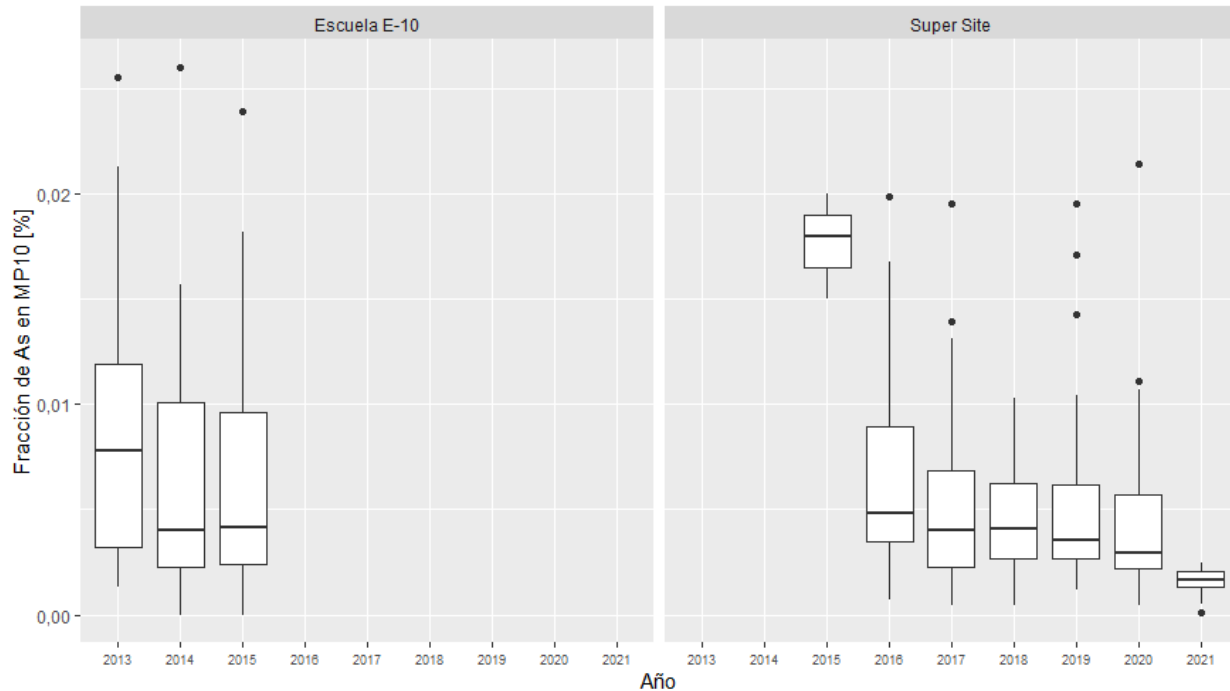
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-7 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	3	36	35	21	35	26	12
Max.	8	16	9	4	8	6	1
3rd Qu.	8	5	4	2	3	2	1
Mediana	7	3	2	2	1	1	1
Media	7	4	3	2	2	2	1
1st Qu.	7	2	1	1	1	1	1
Min.	6	0	0	0	1	0	0

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 2-4 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. Se observa que las fracciones de arsénico en MP10 han tendido a disminuir levemente a través del tiempo, estabilizándose en los últimos años. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-8 y Tabla 2-9, observándose que para el año 2020 la mediana de la fracción era de 0,003%.


Figura 2-4 Fracción de As en MP10 [%] cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-8 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Escuela E-10

Año	2013	2014	2015
N	36	36	33
Max.	0,026	0,026	0,024
3rd Qu.	0,012	0,010	0,010
Mediana	0,008	0,004	0,004
Media	0,008	0,006	0,006
1st Qu.	0,003	0,002	0,002
Min.	0,001	0,000	0,000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-9 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	3	36	35	21	35	26	12
Max.	0,020	0,020	0,020	0,010	0,020	0,021	0,002
3rd Qu.	0,019	0,009	0,007	0,006	0,006	0,006	0,002
Mediana	0,018	0,005	0,004	0,004	0,004	0,003	0,002
Media	0,018	0,006	0,005	0,004	0,005	0,005	0,002
1st Qu.	0,016	0,004	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001
Min.	0,015	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-5 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Super Site. Se observa que la concentración de As aumenta durante el invierno en dichos años, siendo mayor entre los meses de mayo y agosto, tanto en el valor de la mediana como en los valores máximos.

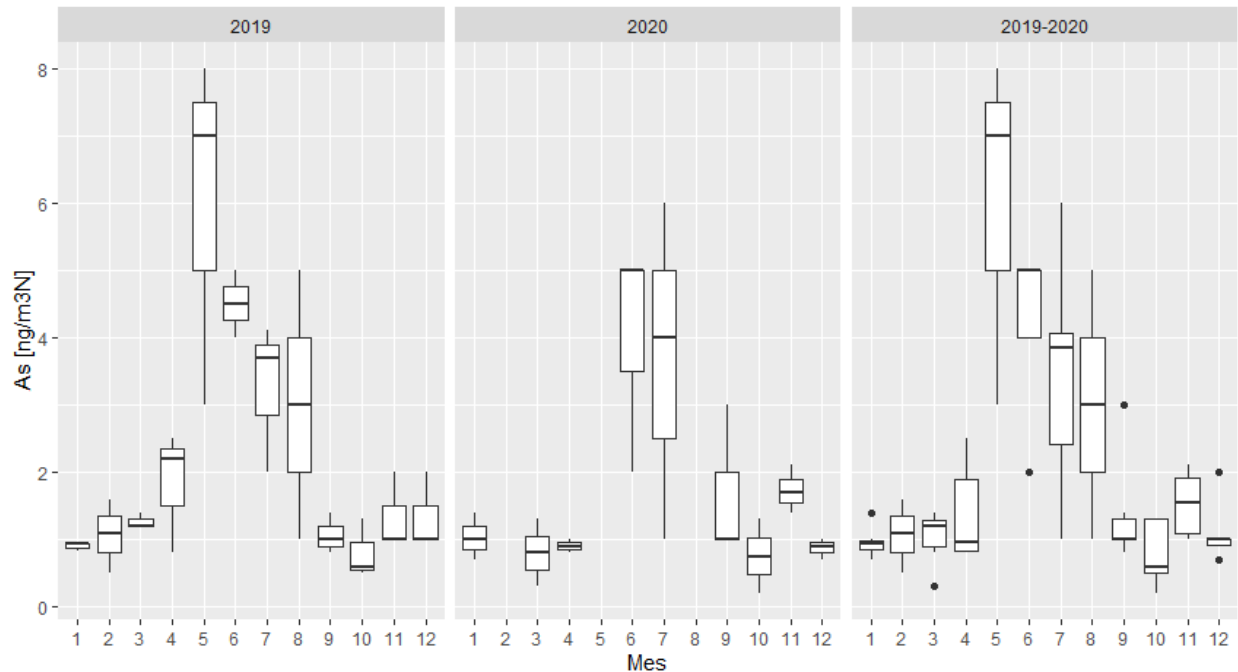


Figura 2-5 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m³N], cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.2 Estaciones cercanas a fundición Chuquicamata

En la Figura 2-6 se muestra la ubicación de la fundición Chuquicamata, donde se observa que su ciudad más cercana es Calama. Adicionalmente en Ministro Hales, existe también una planta de tostación que también es una fuente de emisiones de arsénico. Respecto de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, se observa que la estación más cercana es Aukahuasi, que se encuentra 5,4 kilómetros al oeste de la fundición. Le sigue en cercanía las estaciones ubicadas al sur, en Calama: C.P.V.K.; Hospital El Cobre; Centro; CD 23 de Marzo; y Servicio Médico Legal, las cuales se encuentran a una distancia de la fundición de entre 15 y 17,3 kilómetros. A 24,6 kilómetros de la fundición en dirección este también se encuentra la estación Nueva Chiu-Chiu.

Es importante mencionar que la estación Nueva Chiu-Chiu vino a reemplazar la antigua estación de Chiu-Chiu, la cual tenía una ubicación cercana. La estación Chiu-Chiu estuvo activa hasta febrero del año 2019, mientras que la estación Nueva Chiu-Chiu (a 200 metros al este de la antigua estación) comenzó sus mediciones en abril del año 2019. La estación Nueva Chiu-Chiu

obtuvo su representatividad para MP10 a partir del 18 de julio del mismo año⁸. Actualmente, esta estación es representativa únicamente para MP10.



Figura 2-6 Mapa fundición Chuquicamata, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-7 y Figura 2-8 se presenta la evolución de la concentración de As medida en las estaciones Aukahuasi, C.P.V.K, CD 23 de Marzo, Centro, Chiu-Chiu, Nueva Chiu-Chiu, Servicio Médico Legal y Hospital El Cobre, ubicadas en la zona. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-10, Tabla 2-11, Tabla 2-12, Tabla 2-13, Tabla 2-16, Tabla 2-17, Tabla 2-14 y Tabla 2-15, respectivamente.

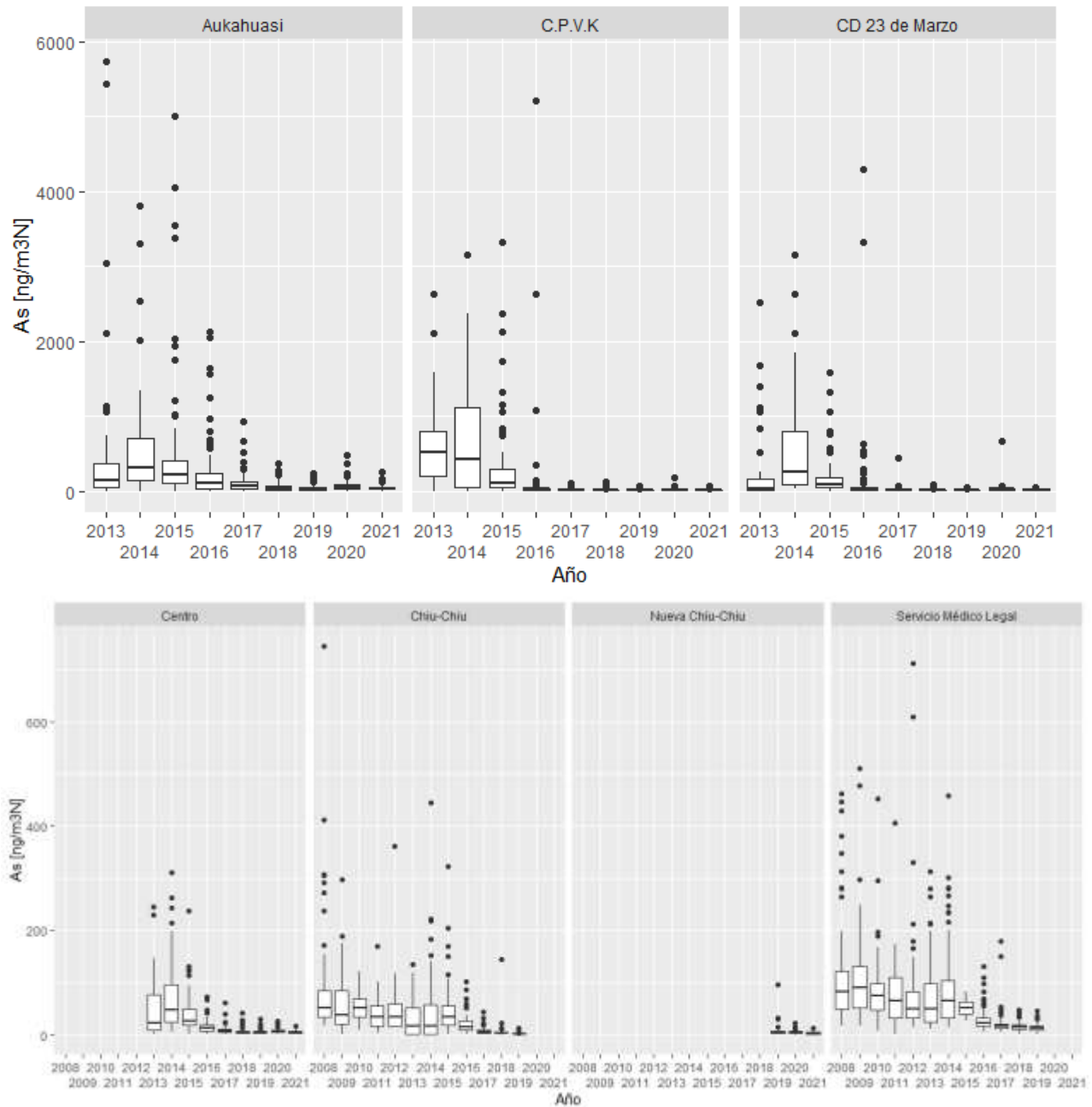
Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Chuquicamata no contaba con plantas de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir los

⁸ Representatividad otorgada mediante la Resolución Exenta N°1084, de fecha 30 de julio de 2019 de la Superintendencia del Medio Ambiente. En el análisis de las concentraciones de la estación Nueva Chiu-Chiu se incluyen los valores de concentraciones de As medidas entre abril y el 18 de julio de 2018, a pesar de que la estación aún no estaba declarada como representativa de MP10.

límites de emisión establecidos por la norma de emisión a partir de diciembre 2018. Consistentemente con lo anterior, se observa que las concentraciones disminuyen entre el año 2018 y 2019, año en que comienza a aplicar los límites de emisión. Sin perjuicio de lo anterior, se observa que en el periodo 2016-2018 hubo reducciones en las concentraciones medidas de arsénico.

De las siete estaciones, se observa que las concentraciones de As en la estación Aukahuasi son los más altos. Lo anterior se explica, pues de las estaciones consideradas Aukahuasi se encuentra significativamente más cercana a la fundición, a una distancia de 5,4 km (ver Figura 2-6).

Si bien, dentro de las estaciones ubicadas en Calama se observan diferencias con las mayores concentraciones observadas en C.P.V.K. y CD 23 de Marzo, se observa de forma transversal una tendencia a la disminución de las concentraciones a lo largo del periodo en todas las estaciones, observándose un cambio relativamente evidente a partir del año 2016 en la medida que la Fundición Chuquicamata se preparaba para dar cumplimiento a las exigencias de la norma. Además, la aplicación de la norma de emisión a partir del año 2019 provocó que se realicen cambios significativos como la modificación del proceso de fusión, lo cual implicó una reducción de sus niveles de procesamiento durante el proceso de instalación de las nuevas tecnologías y *ramp-up*, lo que se traduce en la disminución de las concentraciones que se observa entre los años 2018 y 2019. En los años siguientes, a medida que la fundición va recuperando sus niveles de producción anteriores a las modificaciones motivadas por el DS28/2013, se observa un aumento en las concentraciones. El comportamiento general de las concentraciones se condice con las emisiones de arsénico anuales de la fundición (ver Figura 3-7 de la Sección 3.3.1), las cuales van en disminución desde el año 2014.



Nota: La gráfica del primer conjunto de estaciones (Aukahuasi, C.P.V.K, CD 23 de Marzo) tienen escalas de concentración diferente al segundo conjunto (Centro, Chiu-Chiu, Nueva Chiu-Chiu, y Servicio Médico Legal).

Figura 2-7 Concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, excepto Hospital El Cobre

Fuente: Elaboración propia

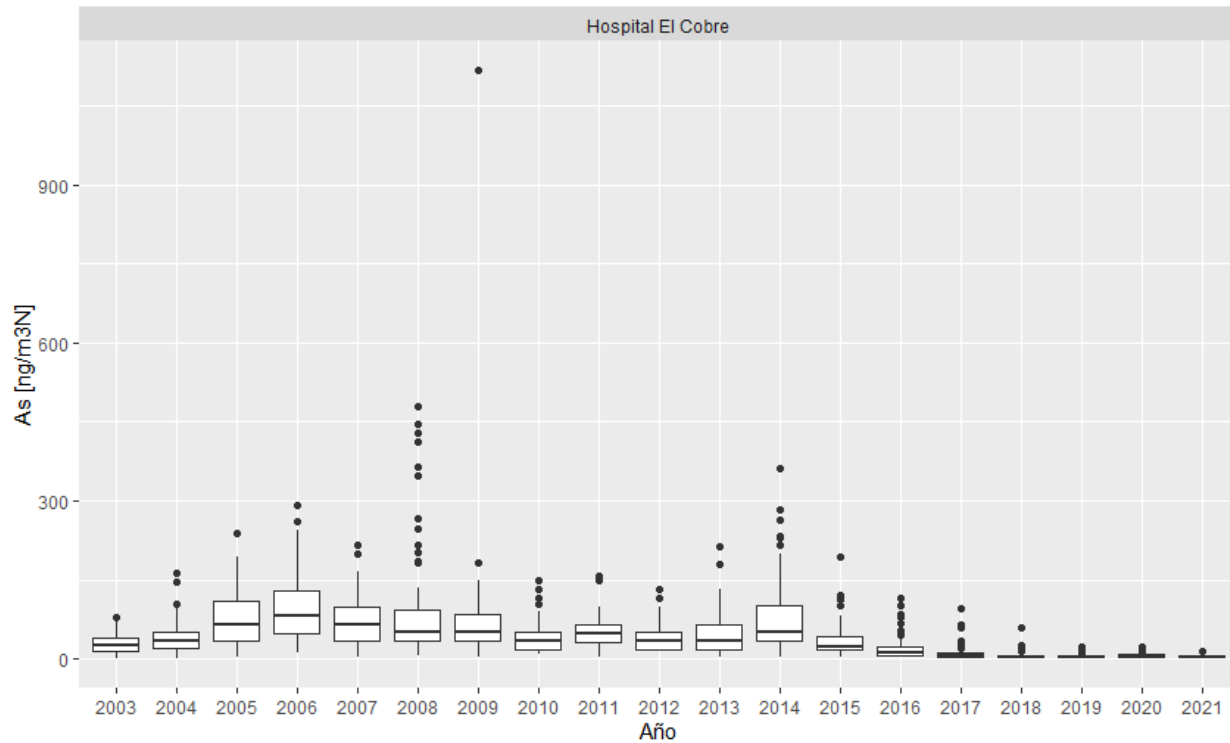


Figura 2-8 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre

Fuente: Elaboración propia

En la estación Aukahuasi (ver Tabla 2-10) se observa una constante disminución de la concentración mediana hasta el año 2019, pasando de 317 [ng/m³N] en 2014 a 30 [ng/m³N] en 2019. El año 2020 se identifica un leve aumento asociado a un aumento en los niveles de producción como consecuencia del proceso de *ramp-up*. Por otra parte, las concentraciones máximas también disminuyen entre los años 2014 a 2019, identificándose una disminución de un 57% entre los años 2015 y 2016 y luego nuevamente de un 57% entre los años 2016 y 2017.

Tabla 2-10 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi⁹

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	105	109	117	117	111	119	109	102	37
Max.	5.734	3.814	5.003	2.129	924	368	233	483	249
3rd Qu.	368	700	408	230	124	76	60	89	52
Mediana	141	317	218	101	67	40	30	50	38
Media	372	499	444	228	107	57	45	72	48
1st Qu.	53	140	114	40	28	19	12	27	29
Min.	2	2	3	3	1	0	1	1	4

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 7 de noviembre de 2014 y 18 de enero de 2015 correspondientes a 5.752 [ng/m³N] y 3.298 [ng/m³N] respectivamente, ya que se consideran *outliers*. Además, se excluyen los valores de 15 días diferentes correspondientes a 2 [ng/m³N] y de 3 días diferentes correspondientes a 0,1 [ng/m³N] por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En las demás estaciones (ver Tabla 2-11 a Tabla 2-15), se observa la misma tendencia que en la estación Aukahuasi pero en menores concentraciones: la mediana de las concentraciones disminuye a lo largo del periodo hasta el año 2019, y se observa un leve aumento en el año 2020.

Dentro del periodo 2013-2021, se identifica un peak en las concentraciones máximas en el año 2014 para todas las estaciones. Esto se condice con el peak de emisiones de la fundición para dicho periodo en el año 2014 (ver Figura 3-7 de la Sección 3.3.1). En la Figura 2-9 se grafica el detalle de las concentraciones de arsénico medidas en las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo y Centro, con concentraciones inferiores a 200 ng/m³N, para una mejor inspección.

Tabla 2-11 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	86	76	89	88	109	117	102	118	35
Max.	2.631	3.158	3.316	5.211	98	123	70	179	77
3rd Qu.	789	1.120	290	37	26	20	17	29	20
Mediana	526	417	107	25	17	13	11	16	13
Media	599	718	323	134	22	19	14	21	18
1st Qu.	200	53	53	16	11	9	6	10	9
Min.	2	2	2	3	4	3	3	1	3

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 11 de abril y 4 de junio de 2014, del 24 de septiembre de 2015 y del 30 de julio del 2017, correspondientes a 6.316 [ng/m³N], 4.375 [ng/m³N], 8.790 [ng/m³N] y 2.734 [ng/m³N] respectivamente, ya que se consideran *outliers*. Además, se excluyen los valores de 52 días diferentes entre los años 2013 y 2015, correspondientes a 2 [ng/m³N], por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

⁹ En todas las tablas de estadígrafos de la Sección 2.3 se presenta: la cantidad de datos por año (N); el valor máximo medido (Máx.); la mediana (Median.); el valor mínimo (Min.); y los valores de primer cuartil (el 25% de los datos es menor a este valor) y el tercer cuartil (el 75% de los datos es menor a este valor).

Tabla 2-12 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	68	70	77	93	110	117	117	118	39
Max.	2.517	3.158	1.579	4.291	447	85	46	664	50
3rd Qu.	160	789	185	51	29	19	20	32	28
Mediana	41	263	79	27	20	11	15	23	20
Media	268	582	229	142	26	17	16	29	21
1st Qu.	16	80	42	20	13	8	10	14	12
Min.	8	25	2	12	3	4	4	6	6

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de 7 días diferentes, correspondientes a valores entre 0 y 3 [ng/m³N], por ser considerados outliers (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

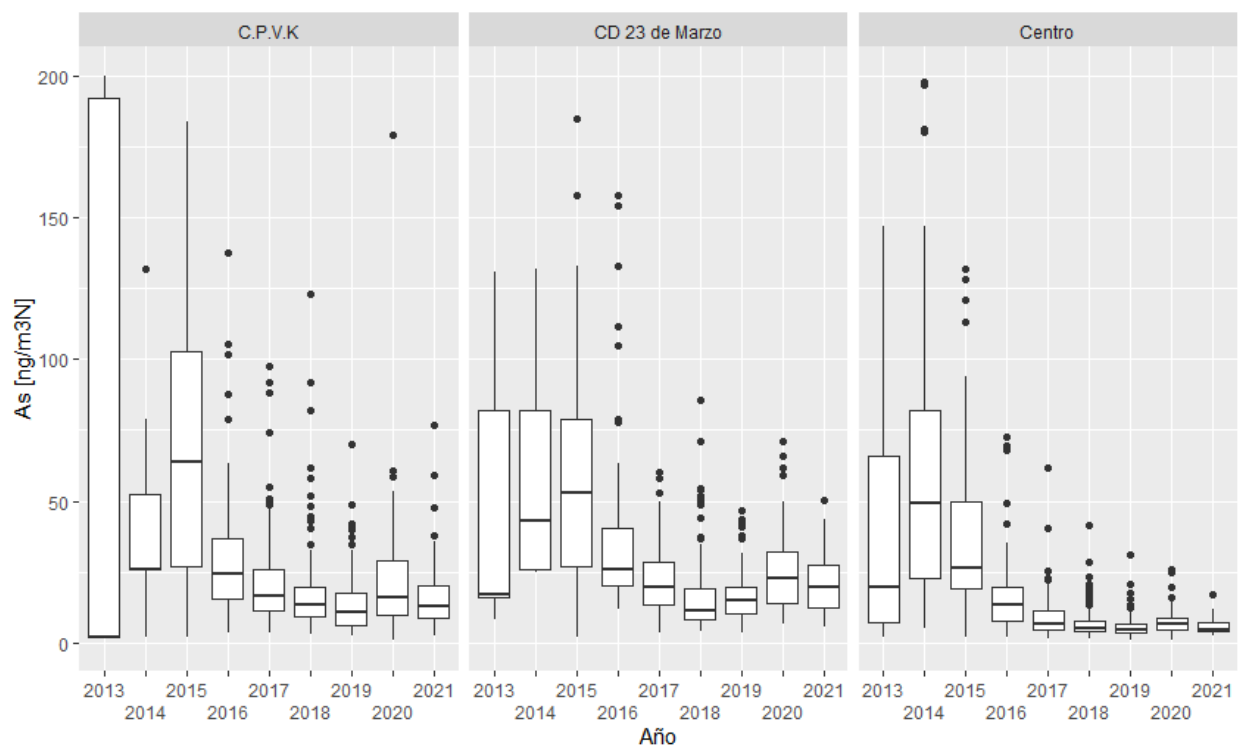


Figura 2-9 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en Chuquicamata, estaciones C.P.V.K y CD 23 de Marzo, valores inferiores a 200 ng/m³N

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-13 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	78	81	111	110	116	120	116	117	40
Max.	245	311	237	72	62	42	31	26	17
3rd Qu.	77	97	50	20	11	7	7	9	7
Mediana	24	49	27	13	7	5	4	6	5
Media	46	71	39	17	9	7	6	7	6
1st Qu.	9	24	20	8	5	4	3	5	4
Min.	2	5	2	2	1	1	1	1	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-14 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
N	116	121	120	99	85	91	79	90	81
Max.	80	163	238	291	216	480	1.117	149	156
3rd Qu.	40	52	111	129	99	92	83	50	66
Mediana	26	33	65	81	66	50	50	33	49
Media	29	39	73	92	73	90	71	39	49
1st Qu.	15	19	33	49	34	33	33	17	32
Min.	1	1	2	11	4	7	3	8	2

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	81	75	80	85	112	120	122	116	121	40
Max.	132	214	362	194	116	94	60	22	23	14
3rd Qu.	50	66	102	43	22	10	7	6	8	6
Mediana	33	33	50	24	10	7	4	4	5	4
Media	40	47	83	35	19	10	6	5	6	5
1st Qu.	16	17	33	17	7	4	3	2	4	3
Min.	16	4	2	2	2	1	2	1	0	1

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de 6 días diferentes, correspondientes a 0 [ng/m³N], por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-15 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
N	76	90	112	102	96	99	97
Max.	462	511	452	406	711	313	459
3rd Qu.	121	132	99	111	83	99	105
Mediana	83	92	76	66	50	50	66
Media	116	106	79	76	78	74	90
1st Qu.	50	52	48	33	33	26	33
Min.	17	17	8	2	16	12	16

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	10	108	119	118	114	0	0
Max.	83	132	179	47	46	S/I	S/I
3rd Qu.	63	32	22	20	18	S/I	S/I
Mediana	52	22	17	15	12	S/I	S/I
Media	52	30	21	17	14	S/I	S/I
1st Qu.	40	17	12	11	9	S/I	S/I
Min.	27	6	5	3	3	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de 7 días diferentes, correspondientes a valores entre 1 y 7 [ng/m³N], por ser considerados outliers (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las estaciones Chiu-Chiu y Nueva Chiu-Chiu, cabe destacar que la estación Chiu-Chiu cambió de ubicación y se encuentra en el nuevo sitio desde abril de 2019, momento en que comienza a medir en Nueva Chiu-Chiu. Chiu-Chiu deja de reportar a fines de febrero de dicho año. Considerando que ambas estaciones se encuentran próximas, no se observan impactos mayores en este aspecto, siendo quizás el único cambio observable una disminución en el valor máximo reportado en 2019 si se compara con 2018, lo cual puede guardar relación también con las menores emisiones estimadas en dicho año (ver Figura 3-7 de la Sección 3.3.1).

Tabla 2-16 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013
N	66	93	67	68	71	116
Max.	745	297	121	170	361	136
3rd Qu.	84	85	69	56	59	51
Mediana	51	39	51	34	34	17
Media	89	60	57	47	46	31
1st Qu.	34	21	34	17	17	2
Min.	17	2	10	3	17	2

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019
N	119	117	116	122	121	14
Max.	444	323	101	44	146	14
3rd Qu.	58	56	26	9	6	3
Mediana	17	34	15	5	4	2
Media	39	44	20	7	6	4
1st Qu.	2	19	9	3	3	2
Min.	2	2	1	1	1	1

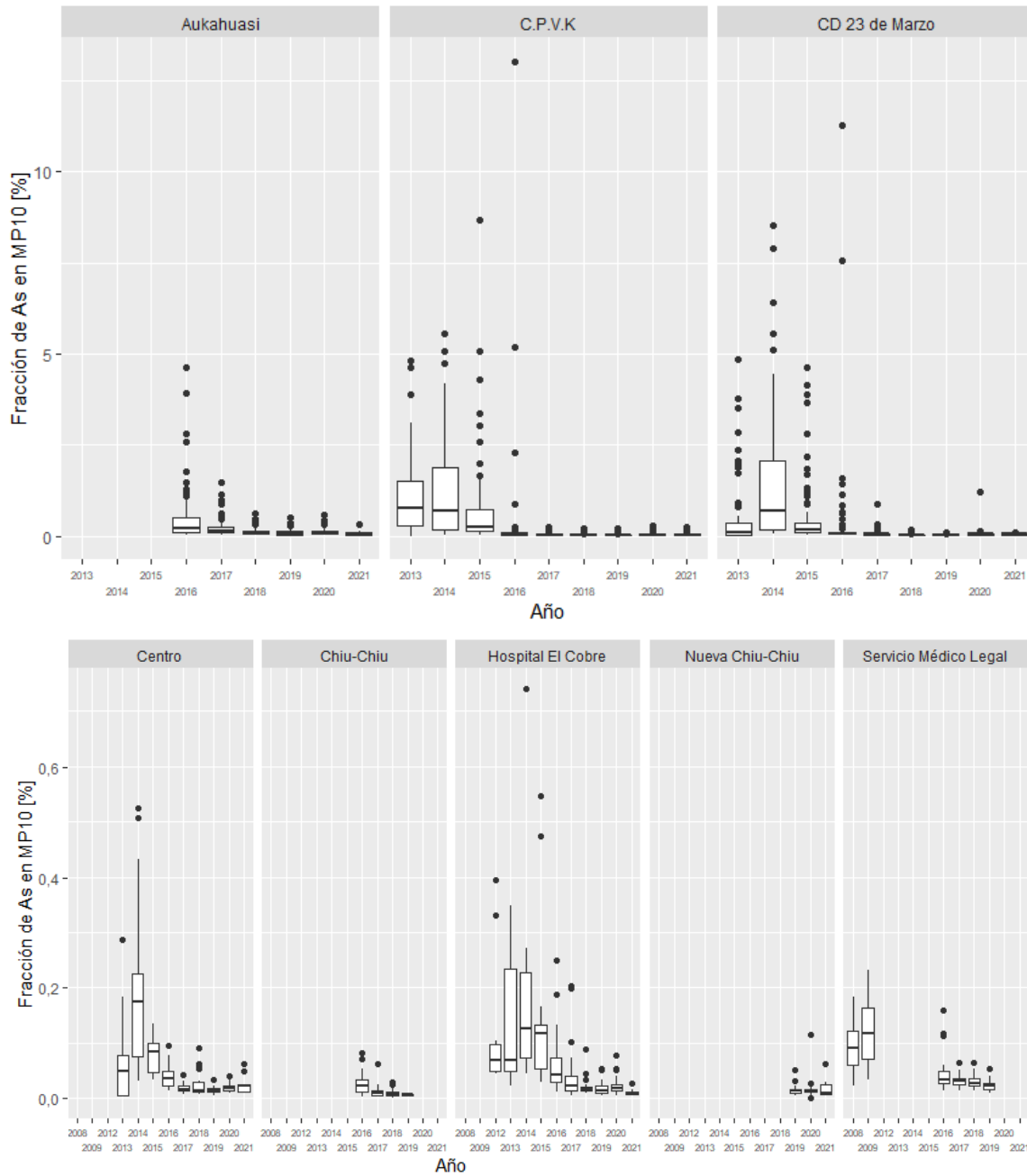
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-17 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu

Año	2019	2020	2021
N	85	117	39
Max.	96	23	12
3rd Qu.	7	6	5
Mediana	5	4	4
Media	7	5	4
1st Qu.	3	3	2
Min.	1	0	1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-10 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As obtenidas a partir del muestreo de MP10. Se observa que las estaciones Aukahuasi, C.P.V.K y CD 23 de Marzo, tienen una mayor participación del arsénico respecto a las otras estaciones, lo cual sugiere un mayor aporte de las emisiones de la fundición y planta de tostación en comparación con las demás estaciones. Aun así, se destaca que la mediana de la contribución del arsénico al total de MP10 en los últimos años es inferior a 0,1%. También se observó en todas las estaciones un alza en el año 2020 en la fracción de arsénico en MP10 con respecto al 2019—para la estación Servicio Médico Legal no se cuenta con datos para dicho año. Lo anterior es consistente con lo esperado, puesto que, dado el menor nivel de operación de la fundición durante ese año, es esperable que su aporte porcentual sea menor en comparación con los otros años, lo cual se traduce en una menor fracción de As en el total de MP10. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-18 a la Tabla 2-23.



Nota: La gráfica del primer conjunto de estaciones (Aukahuasi, C.P.V.K y CD 23 de Marzo) tiene escalas de concentración diferente al segundo conjunto (Centro, Nueva Chiu-Chiu, Hospital El Cobre y Servicio Médico Legal).

Figura 2-10 Fracción de As en MP10 [%] cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-18 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	117	110	118	109	95	10
Max.	S/C	S/C	S/C	4,628	1,454	0,624	0,506	0,577	0,313
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	0,493	0,234	0,148	0,117	0,152	0,078
Mediana	S/C	S/C	S/C	0,226	0,146	0,081	0,055	0,092	0,070
Media	S/C	S/C	S/C	0,444	0,209	0,114	0,086	0,120	0,085
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	0,102	0,085	0,046	0,032	0,051	0,034
Min.	S/C	S/C	S/C	0,019	0,017	0,009	0,005	0,011	0,010

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10 debido a la falta de datos de concentraciones de MP10 para estos años.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-19 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K

Año	2013*	2014*	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*
N	83	68	89	88	109	117	102	116	35
Max.	4,824	5,545	8,683	13,028	0,237	0,197	0,216	0,280	0,232
3rd Qu.	1,524	1,868	0,725	0,080	0,054	0,041	0,040	0,066	0,051
Mediana	0,759	0,709	0,244	0,052	0,035	0,028	0,026	0,040	0,031
Media	1,064	1,314	0,731	0,302	0,048	0,036	0,033	0,049	0,042
1st Qu.	0,274	0,168	0,128	0,035	0,026	0,020	0,016	0,024	0,017
Min.	0,003	0,003	0,010	0,013	0,006	0,006	0,006	0,004	0,008

* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para todos los meses de los años 2013 y 2014, para el mes de agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-20 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo

Año	2013*	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*
N	68	70	117	93	110	116	116	118	39
Max.	4,854	8,535	4,644	11,292	0,872	0,180	0,111	1,229	0,093
3rd Qu.	0,340	2,070	0,248	0,093	0,060	0,039	0,042	0,067	0,055
Mediana	0,088	0,693	0,136	0,062	0,044	0,026	0,034	0,049	0,042
Media	0,590	1,495	0,397	0,342	0,063	0,035	0,035	0,063	0,046
1st Qu.	0,036	0,161	0,073	0,042	0,034	0,018	0,025	0,035	0,031
Min.	0,015	0,048	0,015	0,025	0,015	0,007	0,008	0,017	0,020

* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para los meses de enero a julio del año 2013, agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-21 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro

Año	2013*	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*
N	75	81	81	110	116	120	116	116	38
Max.	0,490	0,881	0,494	0,213	0,238	0,130	0,056	0,096	0,069
3rd Qu.	0,171	0,238	0,107	0,056	0,028	0,021	0,019	0,026	0,036
Mediana	0,054	0,112	0,071	0,034	0,020	0,015	0,013	0,019	0,024
Media	0,099	0,180	0,096	0,045	0,026	0,020	0,015	0,022	0,028
1st Qu.	0,017	0,054	0,045	0,020	0,013	0,013	0,010	0,015	0,017
Min.	0,004	0,017	0,006	0,008	0,005	0,005	0,004	0,007	0,009

* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para los meses de enero a julio del año 2013, agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-22 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*
N	74	75	80	75	112	119	122	116	112	40
Max.	0,456	0,509	1,209	0,560	0,377	0,448	0,264	0,058	0,098	0,050
3rd Qu.	0,183	0,177	0,314	0,128	0,075	0,036	0,022	0,020	0,028	0,017
Mediana	0,093	0,068	0,155	0,088	0,038	0,022	0,016	0,014	0,020	0,012
Media	0,128	0,128	0,260	0,109	0,067	0,035	0,022	0,017	0,023	0,015
1st Qu.	0,051	0,041	0,080	0,049	0,024	0,014	0,012	0,010	0,014	0,009
Min.	0,029	0,008	0,007	0,007	0,007	0,005	0,006	0,005	0,005	0,005

* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-23 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	76	90	0	0	0	0	0	0	108	119	118	114	0	0
Max.	0,444	0,276	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,259	0,496	0,072	0,055	S/I	S/I
3rd Qu.	0,151	0,153	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,059	0,036	0,031	0,029	S/I	S/I
Mediana	0,087	0,097	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,040	0,029	0,025	0,022	S/I	S/I
Media	0,118	0,115	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,053	0,036	0,027	0,024	S/I	S/I
1st Qu.	0,053	0,059	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,031	0,023	0,021	0,017	S/I	S/I
Min.	0,020	0,028	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,013	0,012	0,007	0,006	S/I	S/I

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10.

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-24 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
N	0	0	0	116	122	121	14
Max.	S/C	S/C	S/C	0,153	0,062	0,495	0,029
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	0,037	0,014	0,011	0,008
Mediana	S/C	S/C	S/C	0,022	0,008	0,007	0,006
Media	S/C	S/C	S/C	0,030	0,011	0,012	0,009
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	0,012	0,005	0,004	0,004
Min.	S/C	S/C	S/C	0,002	0,001	0,001	0,003

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10 debido a la falta de datos de concentraciones de MP10 para estos años.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-25 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu

Año	2019	2020*	2021*
N	79	116	38
Max.	0,288	0,116	0,062
3rd Qu.	0,019	0,019	0,023
Mediana	0,014	0,014	0,012
Media	0,020	0,017	0,017
1st Qu.	0,009	0,009	0,008
Min.	0,002	0,000	0,003

* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-11 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Aukahuasi, estación más cercana a la fundición. Se observa un leve aumento en la concentración de As en los meses de invierno para el año 2019, sin embargo, este aumento se mantiene en los meses de primavera. Por otra parte, en el año 2020 se observa una disminución de las concentraciones en el invierno, y luego vuelven a aumentar a partir de septiembre hasta fin de año. Por lo tanto, sólo se puede concluir que tiende a haber un aumento de las concentraciones de As desde agosto/septiembre hasta fin de año.

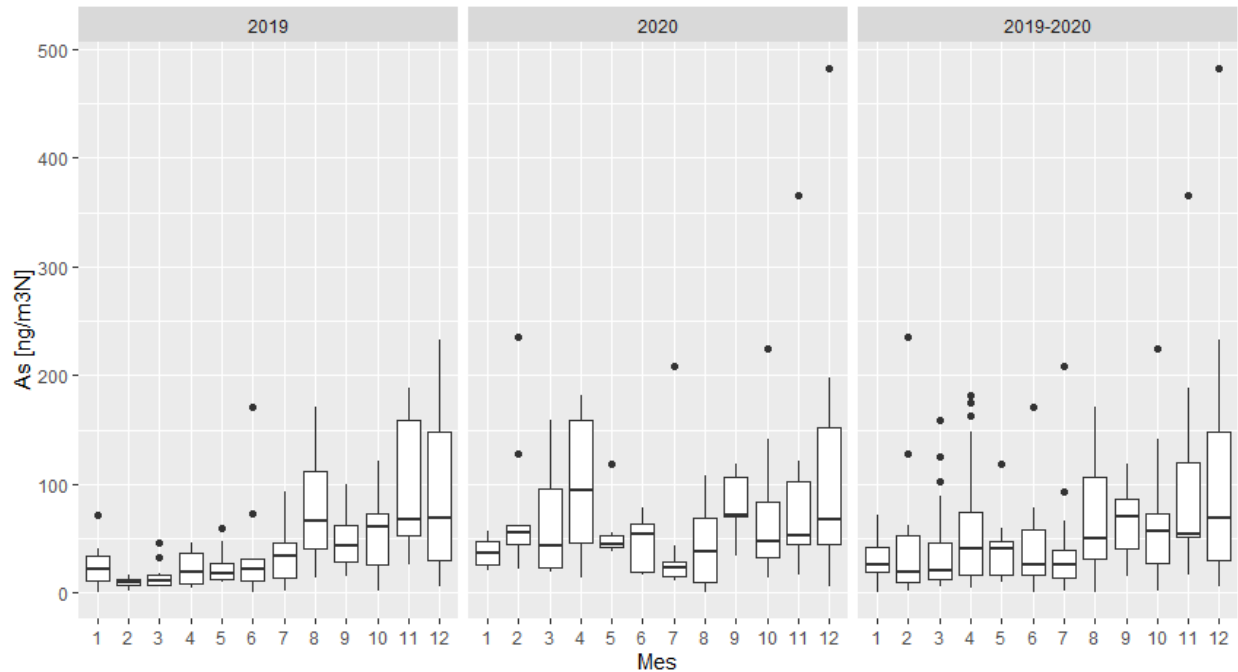


Figura 2-11 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m³N], cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.3 Estaciones cercanas a minera Spence

En la Figura 2-12 se muestra la ubicación de la minera Spence, donde se observa su ubicación en relación con la localidad de Sierra Gorda, donde se encuentra la estación del mismo nombre, y la estación Spence, 4,2 km al suroeste y 6,7 km al noreste de la minera, respectivamente.

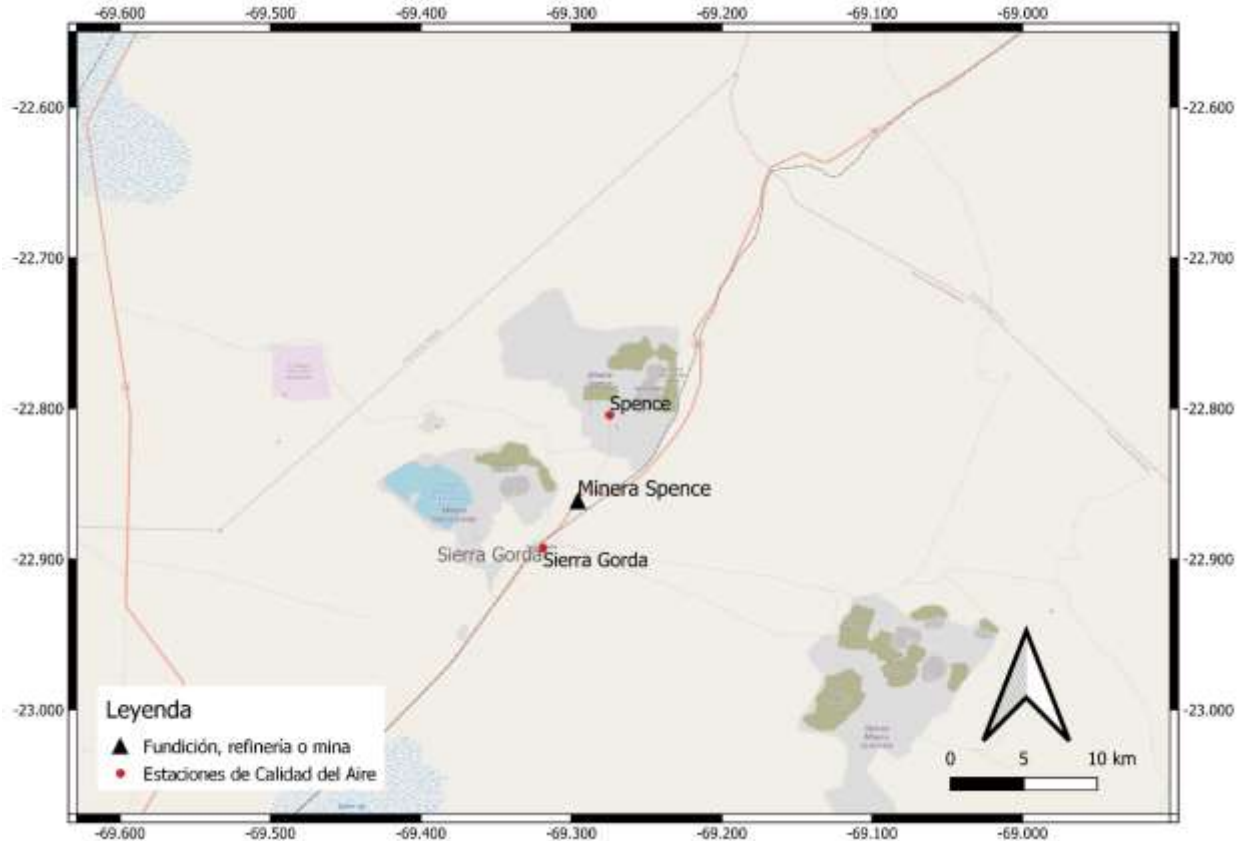


Figura 2-12 Mapa minero Spence, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-13 se presenta la evolución de la concentración de As en MP10 medida en todas las estaciones ubicadas en las cercanías de la minera Spence. Sus estadígrafos se resumen en las siguientes dos tablas, aun así, dado el limitado número de datos disponible es conveniente tener precauciones a la hora de interpretar el análisis de los datos. De la información disponible, se observan mayores concentraciones en la estación Spence, a excepción del año 2013, en que le superan los valores de la estación Sierra Gorda. En ambas estaciones se observa un peak de concentraciones en 2016, año en el que comienza una tendencia a la disminución, que en el caso de Sierra Gorda cesa en 2019, y en 2020 en la estación Spence. Es esperable que ante la falta de fuentes emisoras relevantes en la zona, las variaciones observadas de las concentraciones que se observan probablemente a la velocidad y dirección del viento.

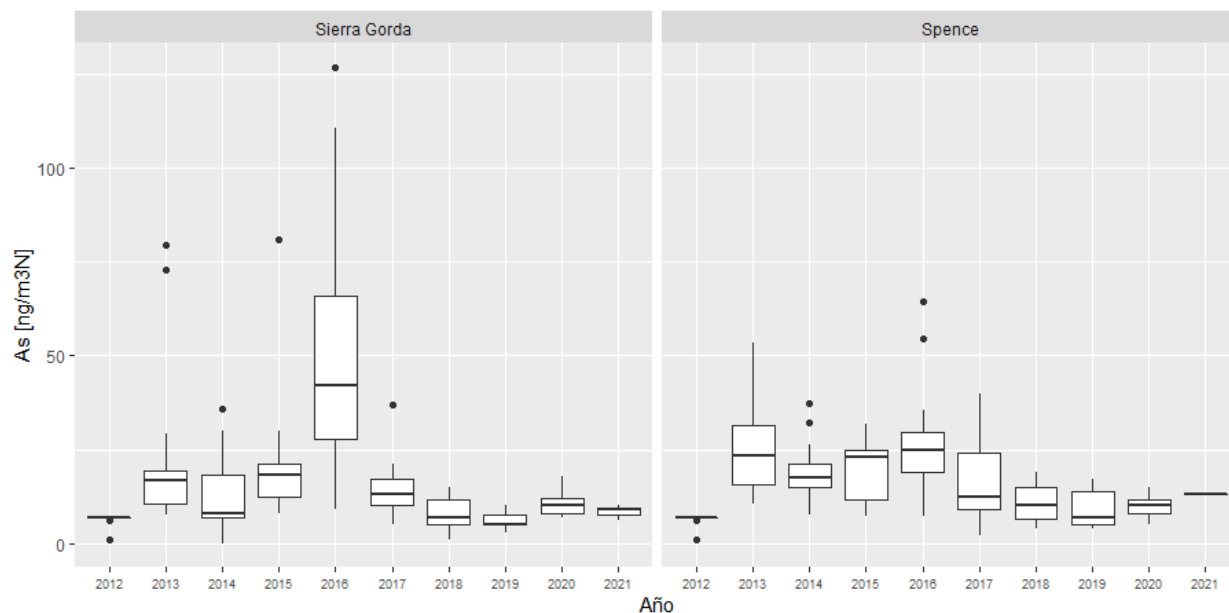


Figura 2-13 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías minera Spence, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Para la estación Sierra Gorda (ver Tabla 2-26) se observan concentraciones con medianas en el rango de 5 [ng/m³N] a 13 [ng/m³N] desde 2017 a 2021, con máximas del orden de 10 [ng/m³N] y 18 [ng/m³N] desde el año 2019. En los años anteriores, exceptuando el año 2012, los estadígrafos de las concentraciones en general son mayores, destacando los años 2015 y 2016, en donde las medianas de las concentraciones son 18 [ng/m³N] y 42 [ng/m³N] y las concentraciones máximas son 81 [ng/m³N] y 127 [ng/m³N] respectivamente. Al respecto cabe destacar que se cuenta con una muestra limitada de mediciones en esta estación y los meses de medición varían de año a año, lo cual dificulta más el análisis.

Tabla 2-26 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías minera Spence, estación Sierra Gorda

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	8	18	22	15	10	17	11	7	13	3
Max.	7	80	36	81	127	37	15	10	18	10
3rd Qu.	7	20	18	21	66	17	12	8	12	10
Mediana	7	17	8	18	42	13	7	5	10	9
Media	6	22	12	21	52	15	8	6	10	8
1st Qu.	7	10	7	12	28	10	5	5	8	8
Min.	1	8	0	8	9	5	1	3	7	6

Nota: Se excluyen los valores de concentración de As de los días 15 de octubre y 2 de noviembre de 2014, 3 de junio, 15 de junio y 3 de julio de 2015, correspondientes a 0, 98, 171, 478 y 270 [ng/m³N] respectivamente, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Spence (Tabla 2-27), las concentraciones medianas se mantienen en el rango de 18 [ng/m³N] a 25 [ng/m³N] en el periodo de 2013 a 2016, que disminuyen de 13[ng/m³N] a 7 [ng/m³N] entre 2017 y 2020. Nuevamente se destaca el bajo número de mediciones disponibles.

Tabla 2-27 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías minera Spence, estación Spence

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	8	15	15	11	13	14	10	13	11	3
Max.	7	54	37	32	64	40	19	17	15	13
3rd Qu.	7	31	21	25	30	24	15	14	12	13
Mediana	7	23	18	23	25	13	10	7	10	13
Media	6	26	19	19	28	16	11	9	10	13
1st Qu.	7	16	15	12	19	9	7	5	8	13
Min.	1	11	7	7	7	2	4	4	5	13

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 2-14 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. Se observa un leve incremento de las fracciones de arsénico en MP10 en el año 2016, especialmente en la estación Sierra Gorda, lo que se podría deber a su cercanía con la minera. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-28 y Tabla 2-29, donde se puede observar que en el año 2020 la mediana de la fracción era de 0,018% y 0,01% en Sierra Gorda y Spence respectivamente.

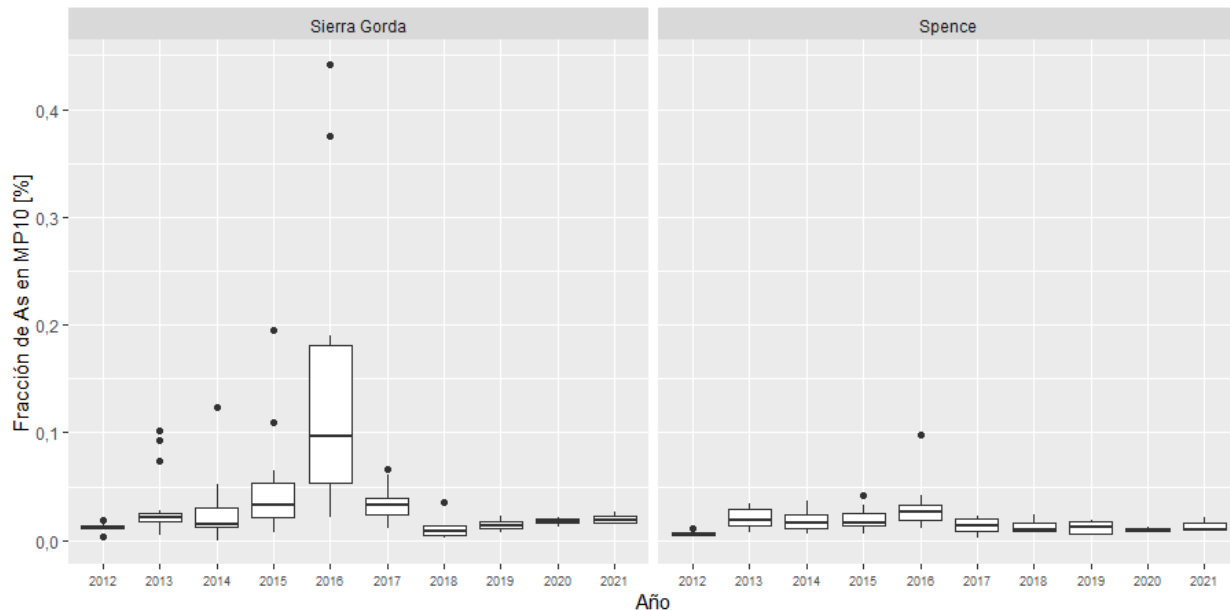


Figura 2-14 Fracción de As en MP10 [%] cercanías Minera Spence, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-28 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Minera Spence, estación Sierra Gorda

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	8	18	22	15	10	17	6	4	6	3
Max.	0,018	0,102	0,123	0,195	0,442	0,066	0,036	0,023	0,021	0,026
3rd Qu.	0,013	0,025	0,030	0,054	0,182	0,039	0,013	0,018	0,020	0,022
Mediana	0,011	0,021	0,015	0,033	0,097	0,032	0,009	0,014	0,018	0,018
Media	0,012	0,030	0,024	0,048	0,152	0,033	0,012	0,015	0,018	0,020
1st Qu.	0,011	0,017	0,012	0,021	0,053	0,023	0,005	0,011	0,016	0,016
Min.	0,004	0,005	0,000	0,008	0,021	0,011	0,003	0,007	0,013	0,015

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-29 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Minera Spence, estación Spence

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	8	15	15	9	13	14	3	5	6	3
Max.	0,011	0,034	0,037	0,041	0,098	0,023	0,024	0,019	0,012	0,021
3rd Qu.	0,007	0,028	0,024	0,025	0,032	0,020	0,017	0,018	0,011	0,016
Mediana	0,006	0,019	0,017	0,017	0,027	0,014	0,009	0,012	0,010	0,010
Media	0,006	0,020	0,019	0,020	0,030	0,014	0,014	0,012	0,010	0,014
1st Qu.	0,005	0,014	0,012	0,014	0,019	0,009	0,009	0,006	0,009	0,010
Min.	0,004	0,007	0,006	0,005	0,012	0,003	0,008	0,005	0,008	0,010

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.4 Estaciones cercanas a termoeléctricas Andina y Mejillones

En la Figura 2-15 se muestra la ubicación de las termoeléctricas Andina y Mejillones, donde se observa su ubicación en relación con la ciudad de Mejillones, donde se encuentran las estaciones Ferrocarril, J.J. Latorre y Subestación Eléctrica, todas al suroeste de ambas termoeléctricas. Específicamente se ubican a 5,5, 3,6 y 1,0 km de la termoeléctrica Mejillones respectivamente. En este caso se presentan juntas las estaciones de dos titulares debido a su proximidad dentro de la ciudad de Mejillones.



Figura 2-15 Mapa termoeléctricas Andina y Mejillones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-16 se presenta la evolución de la concentración de As medida en todas las estaciones ubicadas en las cercanías de las termoeléctricas Andina y Mejillones, sus estadígrafos resumidos en las siguientes tres tablas. En las tres estaciones se observa una leve tendencia a la disminución de las concentraciones desde 2015 a 2021. Debido a que en esta zona no ha cerrado ninguna central termoeléctrica en el periodo observado, en general no se presentan mayores variaciones. Las pocas variaciones que se observan probablemente tienen que ver con la combinación entre el número limitado de mediciones y la dirección del viento durante las mediciones.

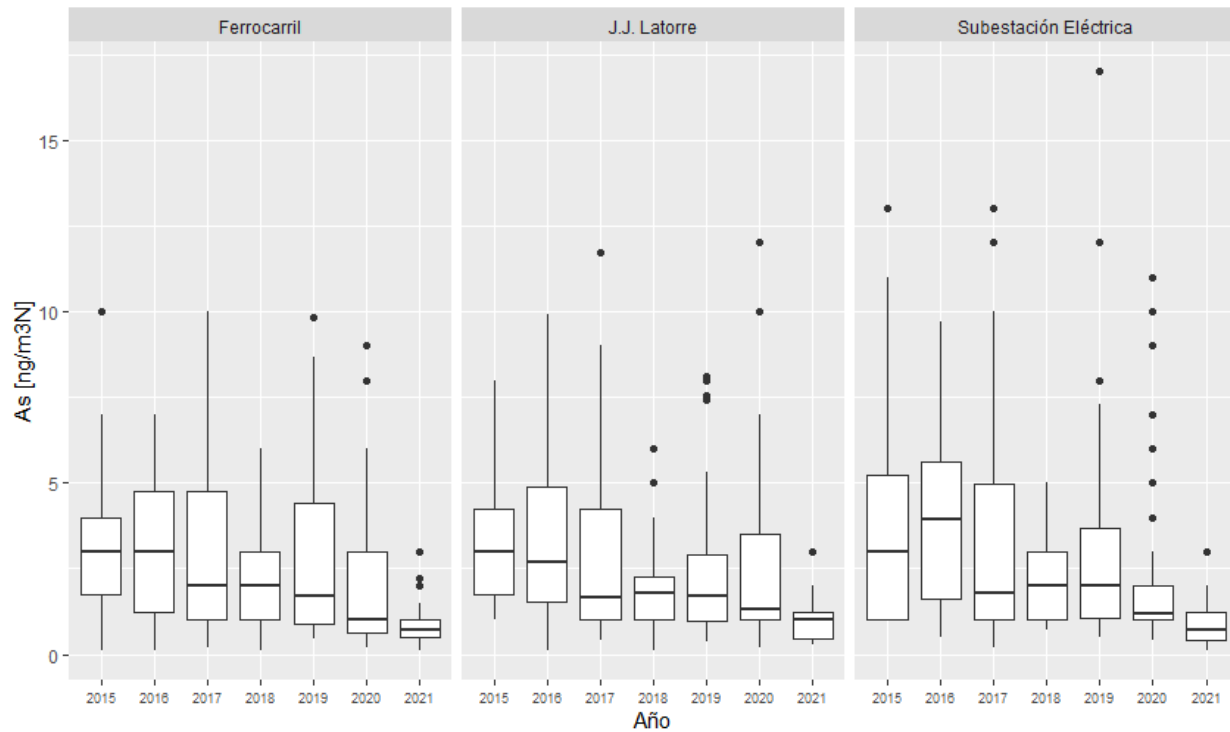


Figura 2-16 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Para la estación Ferrocarril (ver Tabla 2-30) se observa que las medianas de las concentraciones de As están en el rango de 1 a 3 [ng/m³N] entre el 2015 y el 2021, con máximas entre 3 y 10 [ng/m³N] para el mismo periodo.

Tabla 2-30 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	20	58	58	60	60	54	25
Max.	10	7	10	6	10	9	3
3rd Qu.	4	5	5	3	4	3	1
Mediana	3	3	2	2	2	1	1
Media	3	3	3	2	3	2	1
1st Qu.	2	1	1	1	1	1	1
Min.	0	0	0	0	0	0	0

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 6 de abril de 2016 y 18 de octubre de 2016, correspondientes a 0 [ng/m³N] respectivamente, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación J.J. Latorre (Tabla 2-31), al igual que en la estación Ferrocarril, se observa que las medianas de las concentraciones de As están en el rango de 1 a 3 [ng/m³N] entre los años 2015 y 2021, en este caso con máximas entre 6 y 33 [ng/m³N] para el mismo periodo.

Tabla 2-31 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	16	46	44	47	48	43	20
Max.	8	10	12	6	8	12	3
3rd Qu.	4	5	4	2	3	4	1
Mediana	3	3	2	2	2	1	1
Media	3	3	3	2	2	3	1
1st Qu.	2	2	1	1	1	1	0
Min.	1	0	0	0	0	0	0

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 24 de septiembre de 2015, 9, 24 y 27 de abril de 2016 y 13 de mayo de 2017, correspondientes a 33, 0, 0, 0 y 1 [ng/m³N] respectivamente, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Subestación Eléctrica (Tabla 2-32), las medianas de las concentraciones se mantienen en el rango de 1 a 4 [ng/m³N] en el periodo con mediciones, con valores máximos medidos de 3 a 17 [ng/m³N] desde 2017.

Tabla 2-32 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	16	40	47	47	48	42	20
Max.	13	10	13	5	17	11	3
3rd Qu.	5	6	5	3	4	2	1
Mediana	3	4	2	2	2	1	1
Media	4	4	3	2	3	3	1
1st Qu.	1	2	1	1	1	1	0
Min.	1	1	0	1	1	0	0

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 24 de septiembre de 2015, y de los días 6, 9, 15 y 24 de febrero de 2016, correspondientes a 73 [ng/m³N], 2.578 [ng/m³N], 1.871 [ng/m³N], 3.532 [ng/m³N] y 2.786 [ng/m³N] respectivamente, ya que se consideran *outliers*. Además, se excluyen otros cinco valores, con concentraciones de 0 [ng/m³N] por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 2-17 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. Se observa que las fracciones de arsénico en MP10 en todas las estaciones se han mantenido relativamente estables a través del tiempo, tendiendo a disminuir levemente los últimos dos años. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-33, Tabla 2-34 y Tabla 2-35, observándose que para el año 2020 la mediana de la fracción era de 0,009%, 0,008% y 0,006% para las estaciones Ferrocarril, J.J. Latorre y Subestación Eléctrica respectivamente.

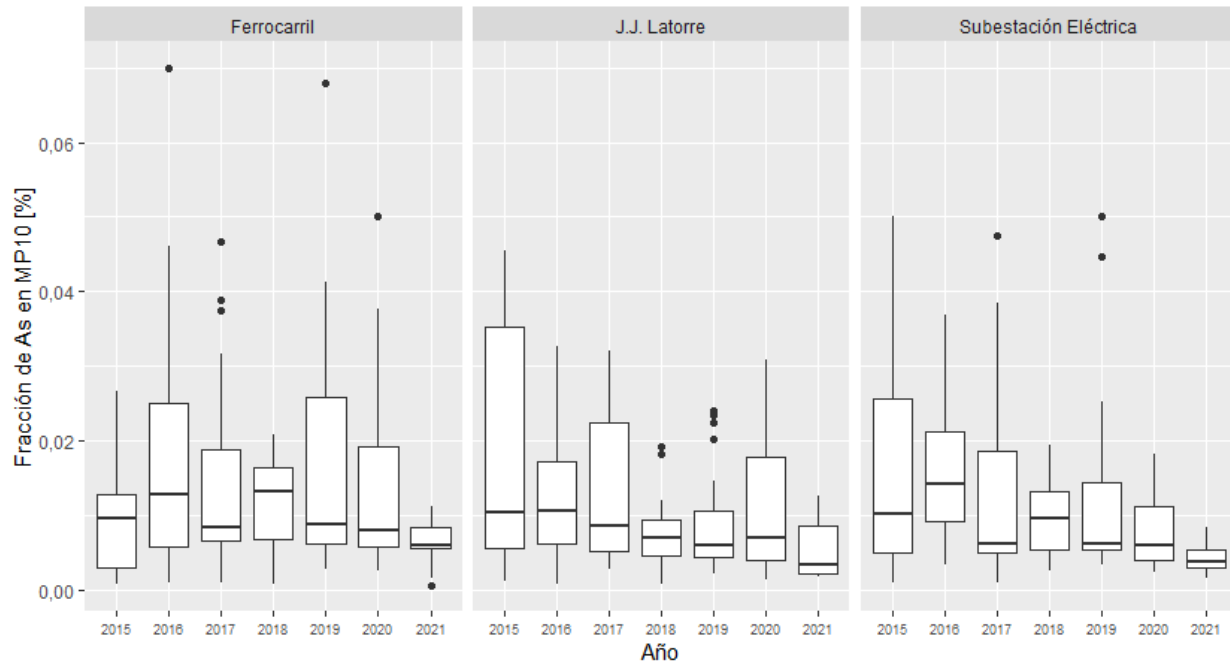


Figura 2-17 Fracción de As en MP10 [%] cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-33 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	20	57	58	60	60	54	25
Max.	0,035	0,070	0,047	0,021	0,068	0,050	0,020
3rd Qu.	0,016	0,027	0,020	0,016	0,024	0,018	0,008
Mediana	0,010	0,015	0,008	0,010	0,010	0,009	0,006
Media	0,012	0,018	0,015	0,011	0,016	0,014	0,006
1st Qu.	0,005	0,007	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004
Min.	0,001	0,000	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-34 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	16	46	44	47	48	43	20
Max.	0,045	0,040	0,059	0,029	0,025	0,063	0,013
3rd Qu.	0,025	0,020	0,019	0,009	0,011	0,015	0,007
Mediana	0,011	0,013	0,007	0,007	0,006	0,008	0,004
Media	0,016	0,014	0,013	0,008	0,009	0,012	0,005
1st Qu.	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,003
Min.	0,001	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,002

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-35 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	16	40	47	47	48	42	20
Max.	0,050	0,054	0,048	0,020	0,050	0,023	0,013
3rd Qu.	0,022	0,020	0,019	0,013	0,018	0,010	0,006
Mediana	0,013	0,012	0,008	0,009	0,010	0,006	0,003
Media	0,018	0,016	0,014	0,010	0,014	0,007	0,005
1st Qu.	0,006	0,009	0,005	0,005	0,006	0,003	0,002
Min.	0,001	0,002	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-18 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Subestación Eléctrica. Se observa que la concentración de As aumenta durante el otoño e invierno en dichos años, siendo mayor entre los meses de marzo y agosto, tanto en el valor de la mediana como en los valores máximos.

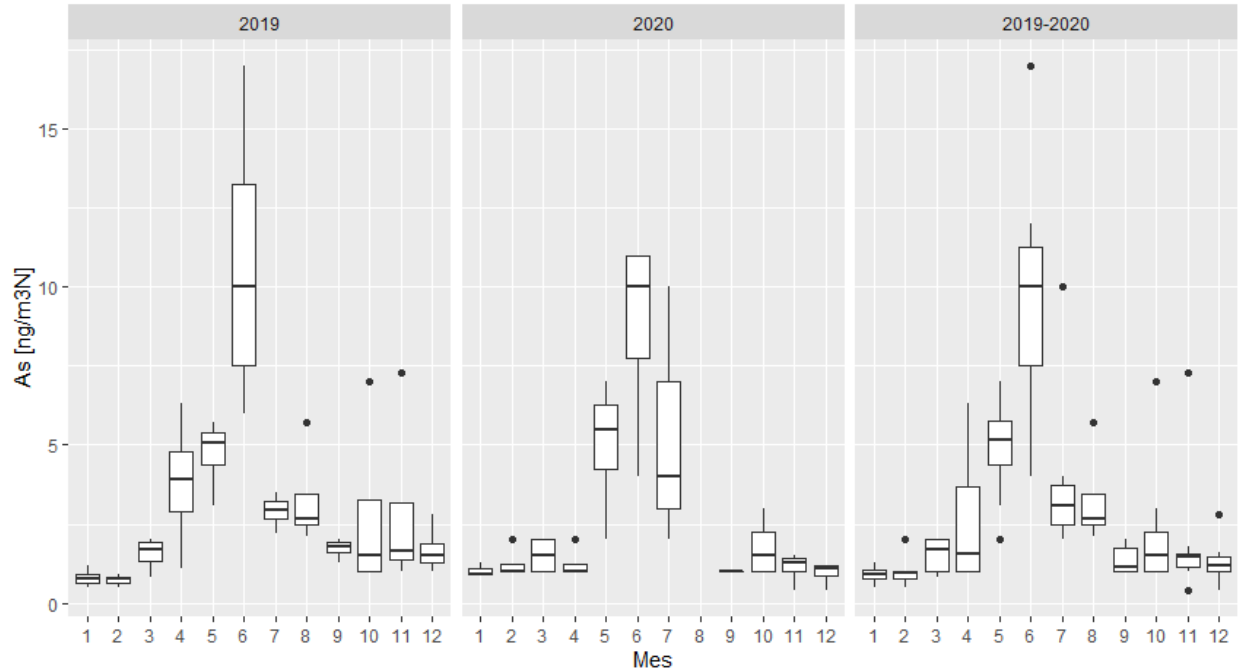


Figura 2-18 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m3N], cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.5 Estaciones cercanas a fundición Altonorte

En la Figura 2-19 se muestra la ubicación de la fundición Altonorte, donde se observa que su localidad más cercana es La Negra, y la ciudad más cercana es Antofagasta. Respecto de las estaciones de monitoreo se observa que la estación más cercana es la Sur que se encuentra a 1,4 kilómetros al sureste de la fundición. Le siguen en cercanía la estación La Negra-Altonorte y la estación La Negra-Inacal a 3,5 kilómetros al norte y 4,5 kilómetros, respectivamente, y por último la estación Coviefi (ubicada en Antofagasta) a 17,5 kilómetros en dirección noroeste.

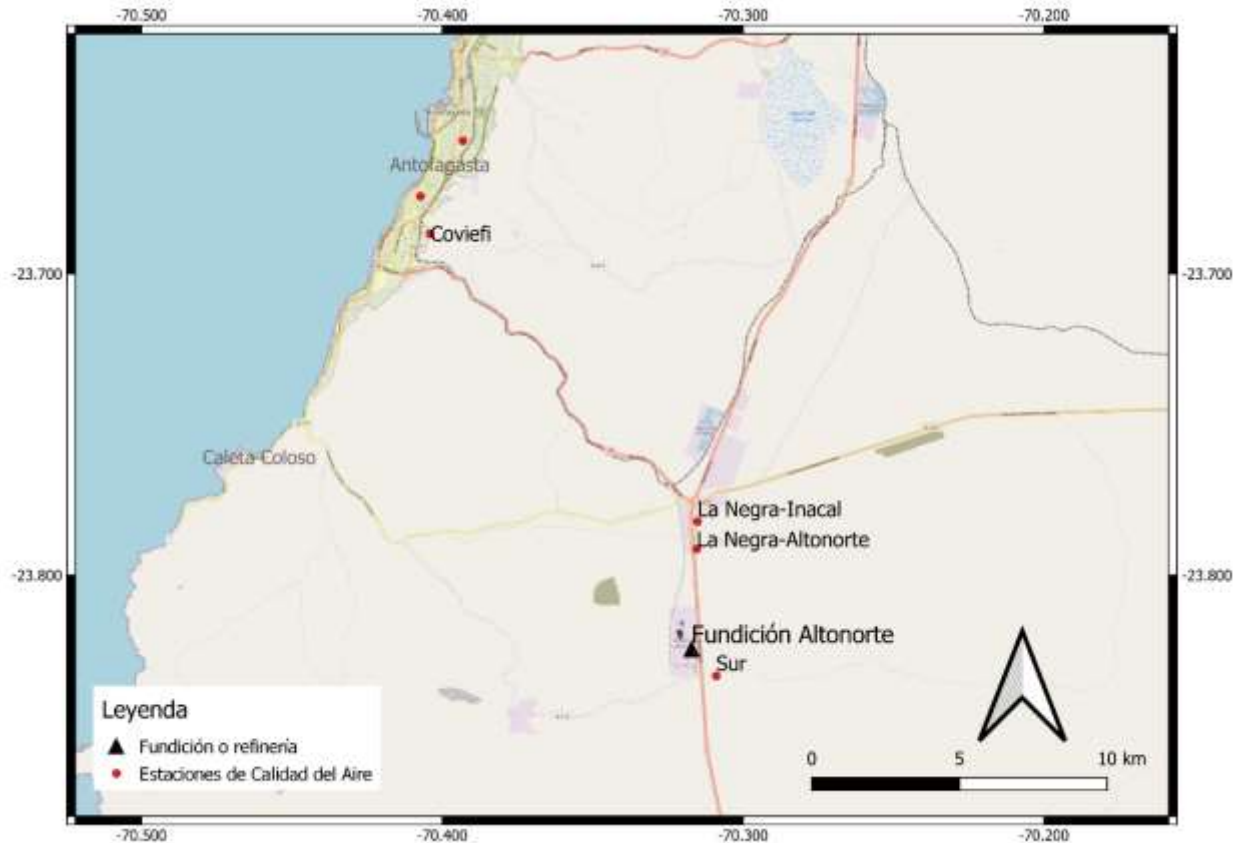


Figura 2-19 Mapa fundición Altonorte, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

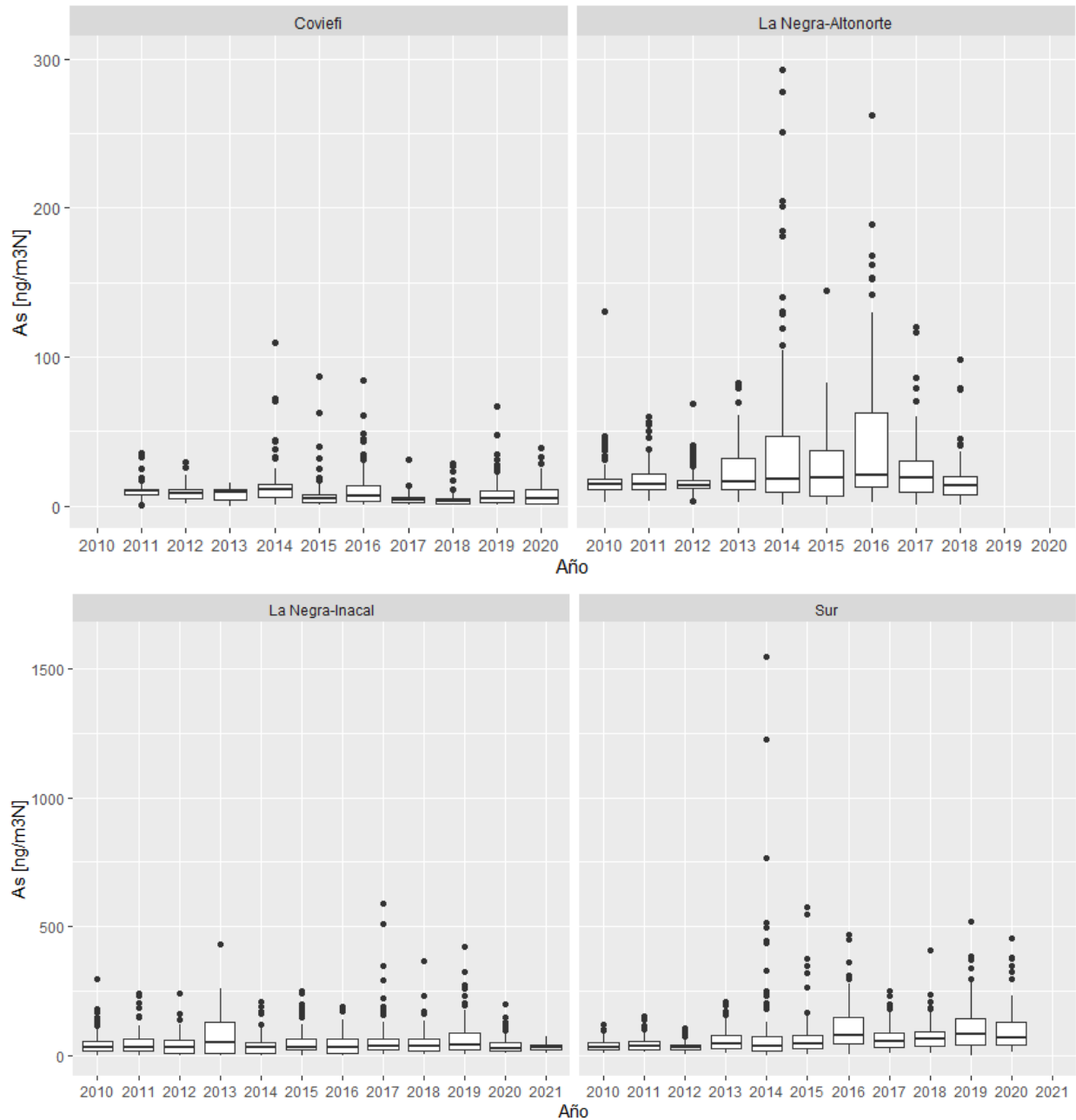
Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-20 se presenta la evolución de las concentraciones de As medidas en las estaciones Coviefi, La Negra-Altonorte, La Negra-Inacal y Sur, ubicadas en las cercanías de Altonorte. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-36, la Tabla 2-37, Tabla 2-38 y la Tabla 2-39, respectivamente.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Altonorte ya contaba con una planta de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo la regulación debía cumplir con los límites establecidos en la norma de emisión a partir de diciembre 2016. En general en todas las estaciones menos La Negra-Inacal se observa una disminución de los estadígrafos entre el año 2016 y 2017, disminución que no es constante en el tiempo ya que en la estación Coviefi, el año 2019 las concentraciones aumentan hasta niveles levemente inferiores a los del año 2016, mientras que en la estación Sur sucede lo mismo, pero a partir del año 2018. Debido a que La Negra – Altonorte no tiene mediciones luego del año 2018, no es posible saber si hubo un aumento en las concentraciones de la zona luego de dicho año.

De las cuatro estaciones, se observa que los valores de la estación Sur son los mayores y los de las estaciones en La Negra son sistemáticamente mayores que los valores de la estación de Coviefi. Lo anterior está dentro de lo esperado considerando la distancia de las estaciones respecto de la fundición Altonorte (ver Figura 2-19) y que la estación Sur recibe vientos principalmente desde la dirección de la fundición (ver Anexo de la Sección 10.3.2). Cabe destacar que se observan diferencias relevantes entre ambas estaciones de La Negra, las cuales se explicarían por la altura de la captura. Adicionalmente cabe destacar que la estación de La Negra-Altonorte no cuenta con mediciones para los últimos años producto de problemas de operación de la estación.

Se observa también que los valores se han mantenido relativamente estables en el tiempo, lo que se relaciona con la relativa estabilidad de las emisiones estimadas durante el período (ver Figura 3-7 de la Sección 3.3.1) debido a la operación regular de la fundición sólo con periodos de mantención normales, con la excepción de la estación La Negra – Altonorte, donde se presenta una mayor dispersión entre los años 2013 y 2017. Cabe destacar que la fundición Altonorte ya cumplía con la mayor parte de las exigencias establecidas en la Norma del año 2013, por lo cual fueron necesarias solo modificaciones menores en comparación las otras fundiciones.



Nota 1: Estaciones La Negra-Inacal y Sur se muestran en escala diferente.

Nota 2: En estación Sur no se muestra valor 9.335 $\text{ng/m}^3\text{N}$, reportado el 28 de junio 2014, ni 2.762 $\text{ng/m}^3\text{N}$ del 21 de junio de 2014.

Figura 2-20 Concentraciones de As en MP10 [$\text{ng/m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coviefi (ver Tabla 2-36) se observa que las medianas de las concentraciones de As se han mantenido en el rango entre 3 y 11 [$\text{ng/m}^3\text{N}$], observándose que en los últimos dos años de la serie los estadígrafos se han mantenido con desviaciones menores y una mediana de 5 [$\text{ng/m}^3\text{N}$].

Tabla 2-36 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	122	110	110	99	90	119	98	101	104	93	0
Max.	S/I	35	30	15	110	87	84	31	29	67	39	S/I
3rd Qu.	S/I	11	11	11	15	8	14	6	5	10	11	S/I
Mediana	S/I	10	9	9	11	5	7	4	3	5	5	S/I
Media	S/I	10	9	8	15	8	11	5	4	8	8	S/I
1st Qu.	S/I	7	5	4	6	2	3	2	1	2	2	S/I
Min.	S/I	1	2	0	1	1	0	1	1	1	1	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores 167 y 2.621 [ng/m³N], correspondientes a los días 1 y 4 de abril de 2015, el valor 276 [ng/m³N] del día 6 de mayo de 2017 y el valor 235 [ng/m³N] del día 29 de julio de 2017, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Negra-Altonorte (ver Tabla 2-37) se observa que las medianas de las concentraciones de As se han mantenido relativamente estables durante todo el periodo entre 13 y 21 [ng/m³N]. Respecto a los valores máximos, se observa una dispersión relevante desde los 60 [ng/m³N] del año 2011, a valores casi 5 veces superiores, alcanzando los 293 [ng/m³N] el año 2014. Si bien, no se observa una tendencia al aumento o reducción en los valores de la mediana ni en los rangos de valores de los cuartiles, se observa que en general se mantienen dentro de un rango similar de valores. Esta estación no ha tenido nuevas mediciones desde el año 2018 debido a problemas de energía.

Tabla 2-37 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	122	121	122	122	110	116	119	113	45	0	0	0
Max.	131	60	69	83	293	145	262	120	98	S/I	S/I	S/I
3rd Qu.	18	22	17	32	47	38	63	30	20	S/I	S/I	S/I
Mediana	15	15	13	16	18	19	21	19	14	S/I	S/I	S/I
Media	17	18	15	24	43	26	42	24	20	S/I	S/I	S/I
1st Qu.	11	11	12	11	9	7	13	9	8	S/I	S/I	S/I
Min.	2	3	3	3	1	1	2	1	1	S/I	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año debido a problemas de energía.

Nota: Se excluyen los valores de los días 4 de octubre de 2014, 9 de agosto de 2015 y 17 de octubre de 2015, correspondientes a 1 [ng/m³N], ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Negra-Inacal (ver Tabla 2-38) se observa que las medianas de las concentraciones de As se han mantenido relativamente estable durante todo el periodo entre 28 y 50 [ng/m³N]. Respecto a los valores máximos, se observa también una relativa estabilidad en el tiempo, con excepciones en los años 2013, 2017 y 2019. Si bien, no se observa una tendencia

al aumento o reducción en los valores de la mediana ni en los rangos de valores de los cuartiles, se observa que en general se mantienen dentro de un rango similar de valores.

Tabla 2-38 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	119	103	105	104	122	120	107	107	108	109	110	42
Max.	296	240	240	430	210	250	190	590	367	421	199	73
3rd Qu.	57	63	60	130	50	63	65	64	66	85	50	42
Mediana	31	30	30	50	30	30	30	35	38	40	28	32
Media	45	48	41	76	40	52	46	61	52	68	42	34
1st Qu.	17	20	10	10	10	20	10	20	18	20	18	21
Min.	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	8	10

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sur (ver Tabla 2-39) se observa que la mediana de las concentraciones, desde el año 2015, se ubica en el rango entre 43 y 84 [ng/m³N]. En general, tampoco se observa una tendencia clara al alza o reducción de los estadígrafos descriptores de las concentraciones de Arsénico, manteniéndose relativamente estables. En el año 2014 se observa una concentración de arsénico inusualmente alta. Esto se debería a las altas concentraciones de arsénico que se presentaron durante el mes de junio de dicho año, en donde todas las estaciones registraron mayores concentraciones en reiteradas ocasiones a lo largo del mes. Esto se podría explicar por una mayor entrada de concentrados de cobre a la fundición con un porcentaje más alto de arsénico durante esa fecha, además de corresponder a un mes de invierno, lo que es desfavorable debido al efecto de inversión térmica. Se destaca que aún fuera de la máxima y su efecto en la media, los demás estadígrafos presentan valores bajos que los años adyacentes.

Tabla 2-39 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	119	115	102	120	115	117	118	114	116	114	95	0
Max.	120	152	105	208	9.335	574	469	252	408	522	455	S/I
3rd Qu.	49	53	42	78	7	78	146	86	92	141	129	S/I
Mediana	31	37	31	47	36	43	79	55	65	84	70	S/I
Media	36	44	34	61	202	70	108	64	74	103	103	S/I
1st Qu.	20	23	21	26	19	26	46	32	35	39	40	S/I
Min.	7	11	3	8	1	2	2	6	6	1	11	S/I

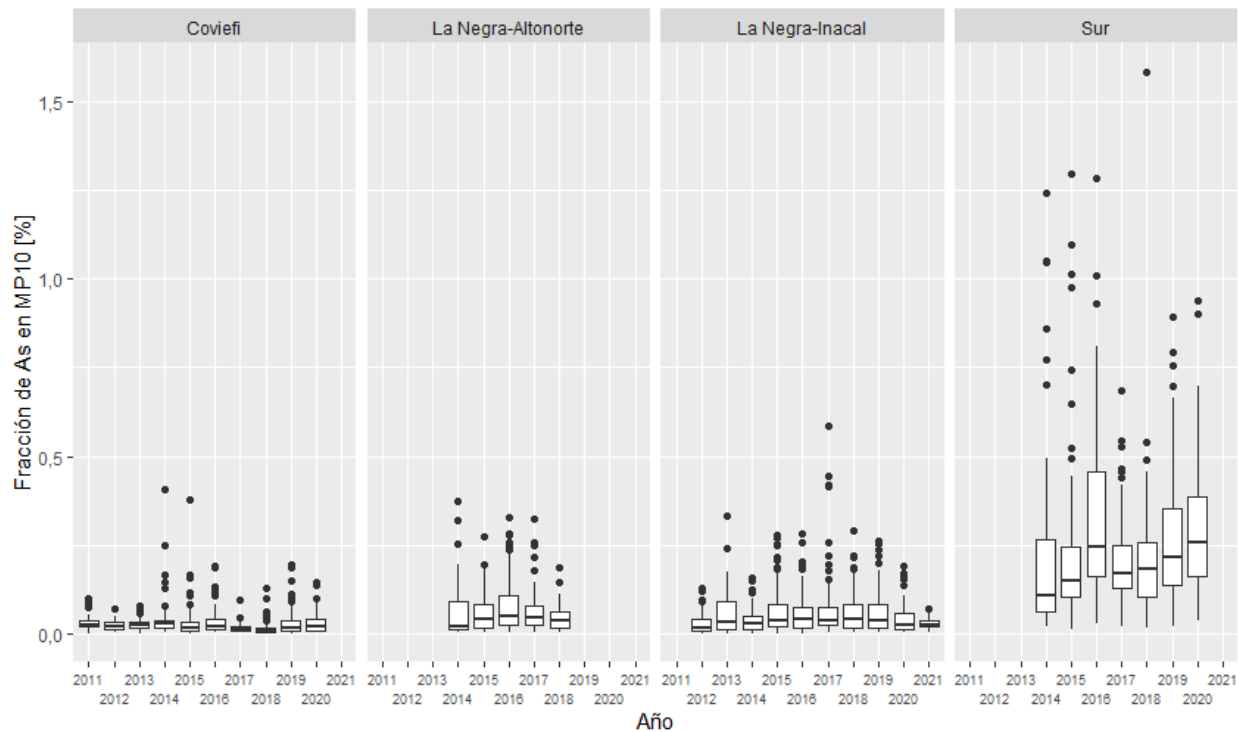
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen diez valores, con concentraciones entre 1 y 5 [ng/m³N], por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-21 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. En general los valores se mantienen estables a través del tiempo, exceptuando los valores de la estación Sur, en donde se observan pequeñas variaciones interanuales, tendiendo a aumentar. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-40, Tabla 2-41, Tabla 2-42 y Tabla 2-43, observándose que para el año 2020 la mediana de la fracción era de

0,021%, 0,026% y 0,258% para las estaciones Coviefi, La Negra-Inacal y Sur, respectivamente, mientras que la estación La Negra–Altonorte no cuenta con datos para dicho año. La elevada fracción observada en la estación Sur es coherente con la cercanía y dirección del viento, además de encontrarse lejos, al menos en comparación, de otras fuentes industriales como las ubicadas en La Negra.



Nota: En estación Sur no se muestran los valores 5,946% y 2,786%, correspondientes a los días 7 y 12 de junio de 2014 respectivamente.

Figura 2-21 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-40 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	122	110	110	87	90	119	98	100	104	83	0
Max.	S/I	0,098	0,071	0,081	0,407	0,378	0,193	0,095	0,128	0,197	0,144	S/I
3rd Qu.	S/I	0,037	0,032	0,033	0,039	0,034	0,042	0,021	0,017	0,038	0,042	S/I
Mediana	S/I	0,026	0,022	0,024	0,030	0,017	0,021	0,014	0,009	0,019	0,021	S/I
Media	S/I	0,029	0,024	0,026	0,041	0,030	0,034	0,016	0,015	0,028	0,030	S/I
1st Qu.	S/I	0,020	0,014	0,018	0,017	0,007	0,011	0,007	0,005	0,008	0,010	S/I
Min.	S/I	0,002	0,003	0,000	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,000	0,002	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-41 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021 ¹
N	0	0	0	0	44	116	118	112	45	0	0	0
Max.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,372	0,275	0,329	0,323	0,186	S/I	S/I	S/I
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,090	0,084	0,109	0,078	0,064	S/I	S/I	S/I
Mediana	S/C	S/C	S/C	S/C	0,021	0,040	0,050	0,044	0,038	S/I	S/I	S/I
Media	S/C	S/C	S/C	S/C	0,069	0,056	0,077	0,056	0,047	S/I	S/I	S/I
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,012	0,016	0,026	0,023	0,018	S/I	S/I	S/I
Min.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,003	0,002	0,004	0,005	0,005	S/I	S/I	S/I

1. Sin energía debido al uso de la energía que abastece a la estación por parte de terceros.

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-42 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	103	104	122	110	101	107	108	96	110	42
Max.	S/C	S/C	0,128	0,331	0,156	0,279	0,284	0,585	0,291	0,263	0,190	0,069
3rd Qu.	S/C	S/C	0,041	0,092	0,051	0,083	0,076	0,073	0,081	0,083	0,057	0,035
Mediana	S/C	S/C	0,016	0,032	0,028	0,039	0,041	0,037	0,041	0,037	0,026	0,024
Media	S/C	S/C	0,028	0,055	0,036	0,061	0,057	0,069	0,058	0,061	0,040	0,028
1st Qu.	S/C	S/C	0,009	0,011	0,012	0,020	0,018	0,023	0,016	0,018	0,014	0,020
Min.	S/C	S/C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,004	0,002	0,006	0,005

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-43 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	0	56	117	118	113	116	114	95	0
Max.	S/C	S/C	S/C	S/C	5,946	1,294	1,281	0,683	1,583	0,893	0,940	S/I
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,322	0,246	0,455	0,248	0,255	0,355	0,386	S/I
Mediana	S/C	S/C	S/C	S/C	0,110	0,148	0,246	0,172	0,184	0,217	0,258	S/I
Media	S/C	S/C	S/C	S/C	0,374	0,216	0,321	0,197	0,200	0,271	0,308	S/I
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,062	0,105	0,163	0,127	0,102	0,138	0,163	S/I
Min.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,021	0,012	0,029	0,020	0,017	0,019	0,036	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-22 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Sur, estación más cercana a la fundición. Se observa que la concentración de As aumenta durante el invierno en dichos años, siendo mayor entre los meses de mayo y septiembre, tanto en el valor de la mediana como en los valores máximos.

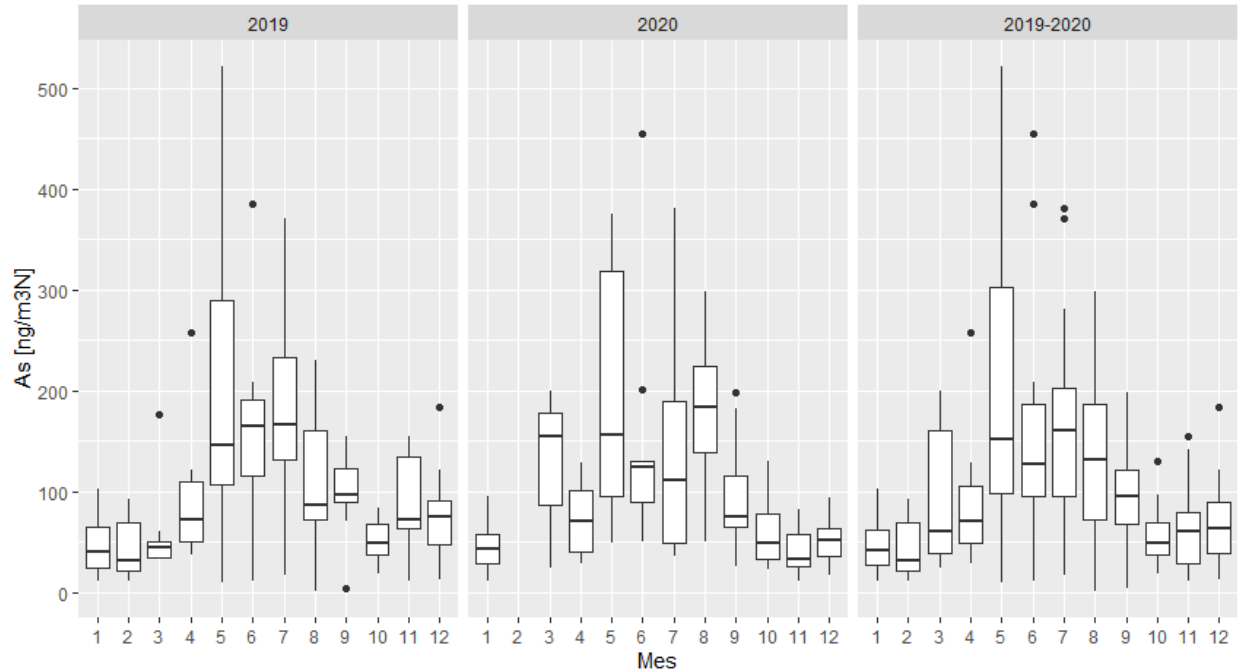


Figura 2-22 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m³N], cercanías fundición Altonorte, estación Sur

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.6 Estaciones cercanas a fundición Potrerillos

En la Figura 2-23 se muestra la ubicación de la fundición Potrerillos, donde se observa que su localidad más cercana es El Salvador, donde se encuentra la estación de monitoreo Cine Inca. Respecto de las estaciones de monitoreo, se observa que la estación más cercana es Doña Inés, ubicada en la misma fundición. Le sigue en cercanía la estación CAP, a 2,7 kilómetros al noroeste de la fundición. Por último, se encuentran las estaciones Intelec y Cine Inca, a 21,4 y 25,5 kilómetros respectivamente, también en dirección noroeste. Cabe destacar que ninguna de las estaciones cercanas a esta fundición tiene representatividad poblacional.



Figura 2-23 Mapa fundición Potrerillos, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

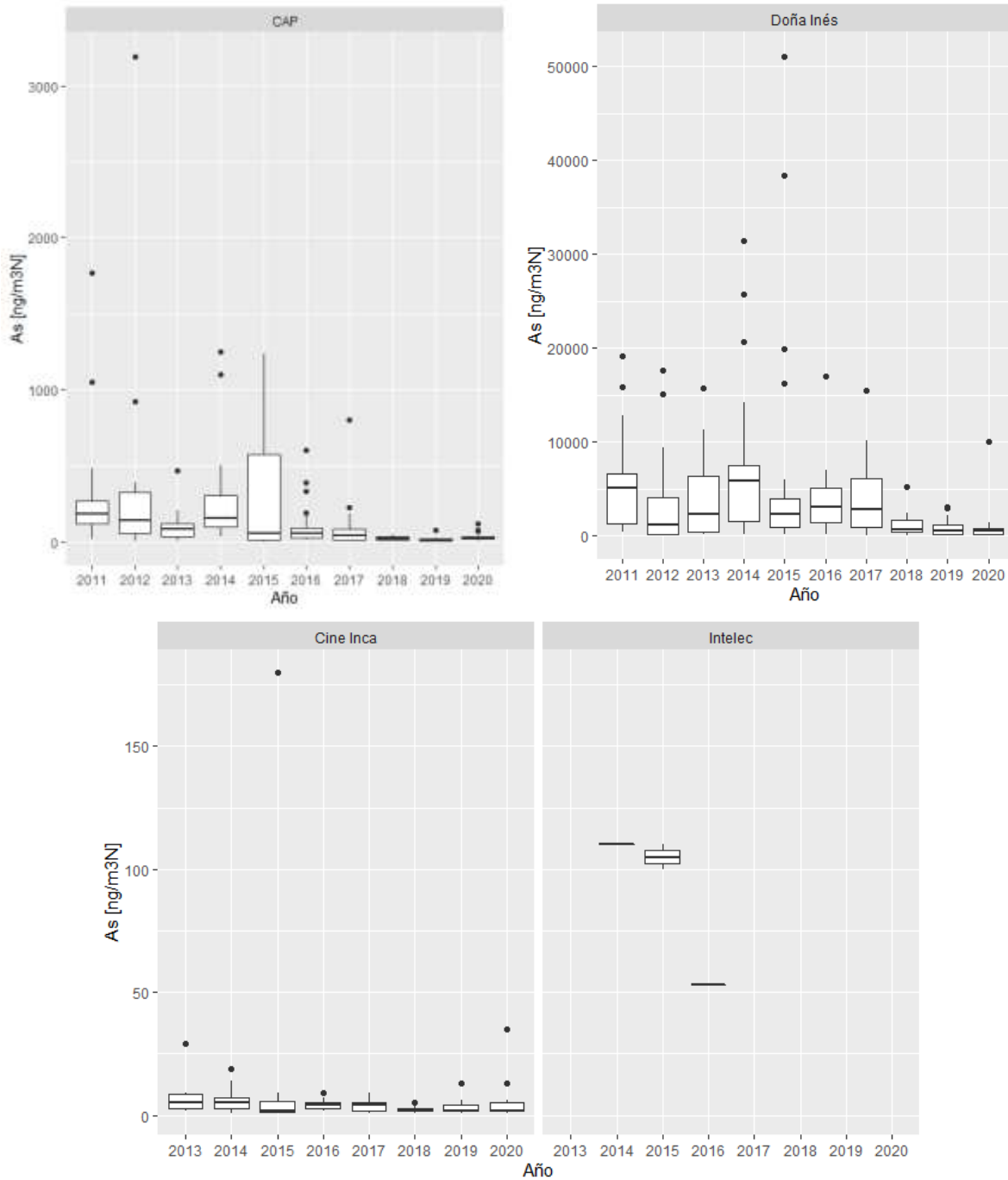
En la Figura 2-24 se presenta la evolución de la concentración de As medida en todas las estaciones ubicadas en las cercanías de Potrerillos, mientras que sus estadígrafos están resumidos en las siguientes cuatro tablas.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Potrerillos no contaba con plantas de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir las exigencias de los límites de emisión establecidos por la norma a partir de diciembre 2018. Por lo tanto, la fundición tuvo obras asociadas a la instalación de tecnologías para cumplir con los límites a partir de diciembre del 2018, lo cual significó una baja en los niveles de producción, con una producción de finos de cobre durante el 2019 cercana a la mitad de los producido durante el 2018. Lo anterior se refleja en los estadígrafos donde se observan menores concentraciones en el año 2019 en las estaciones CAP y Doña Inés.

La estación Doña Inés presenta concentraciones muy superiores al resto de las estaciones debido a que se ubica en la fundición misma. Luego le sigue la estación CAP con concentraciones mayores a Cine Inca e Intelec debido a su mayor cercanía con la fundición y a que el viento en esta zona

viene predominantemente desde el sureste (ver Anexo de la Sección 10.3.3). Es fundamental resaltar la baja cantidad de observaciones por año con aproximadamente dos mediciones mensuales en las estaciones CAP, Doña Inés y Cine Inca, mientras que las mediciones en la estación Intelec son esporádicas, con cuatro mediciones en total entre los años 2014 y 2016.

Respecto a la serie de concentraciones se observa que el año 2018 hay una relevante disminución en las concentraciones de arsénico medidas. Al respecto cabe estacar que las emisiones de arsénico reportadas para dicho año, si bien son menores a las reportadas al año anterior, aún no alcanzaban los niveles significativamente menores reportados durante los años 2019 y 2020 (ver Figura 3-23 de la Sección 3.3.3). Al respecto se destaca que durante los años 2019 y 2020 ha habido meses con reporte de balances negativos, lo cual sugiere posibles problemas en el reporte de los datos, se destaca, sin embargo, que los reportes han cumplido con la normativa vigente.



Nota 1: En estación CAP no se muestran los valores 12.330 ng/m3N reportado con fecha 14 de julio de 2012, 8.760 ng/m3N reportado con fecha 17 de julio de 2012 y 7.644 ng/m3N, reportado con fecha del 2 de agosto de 2013.

Nota 2: Notar que las gráficas de las estaciones presentan escalas diferentes, sólo Cine Inca e Intelec usan la misma escala.

Figura 2-24 Concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Para la estación CAP (ver Tabla 2-44) se observa avances consistentes en la reducción de las concentraciones, especialmente a partir del año 2014, las cuales se acentúan en el periodo 2018-2020. De esta forma, se observan concentraciones con medianas en el rango de 41 a 180 [ng/m³N] desde 2011 a 2017, mientras que entre los años 2018 y 2020 las medianas de las concentraciones varían entre 9 y 25 [ng/m³N]. Cabe destacar que la cantidad de mediciones para esta estación son muy bajas, ya que se realizan únicamente dos mediciones al mes. Adicionalmente el consultor no contó con datos disponibles para el año 2021.

Tabla 2-44 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	24	24	23	24	22	24	24	24	22	23	0
Max.	1.770	12.330	7.644	1.251	1.234	605	801	51	73	118	S/I
3rd Qu.	270	360	134	307	633	92	85	31	16	34	S/I
Mediana	180	150	85	151	61	56	41	20	9	25	S/I
Media	293	1.295	422	266	316	108	92	22	14	30	S/I
1st Qu.	115	62	35	97	14	29	12	9	5	16	S/I
Min.	20	2	3	31	2	15	3	3	2	5	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 7 de enero de 2013, 19 de agosto y 18 de octubre de 2015, correspondientes a 2, 1 y 1 [ng/m³N] respectivamente, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Cine Inca (Tabla 2-45), las medianas de las concentraciones de As se mantienen en el rango de 2 a 5 [ng/m³N] para los años con datos, con valores máximos medidos en el orden de 9 a 35 [ng/m³N], exceptuando el año 2015 en que se observa una medición de 180 [ng/m³N]. Esta es la estación con concentraciones de arsénico más consistentes, aun así, a grandes rasgos se observa una tendencia a una reducción en las concentraciones de arsénico. Nuevamente es relevante destacar que los datos reportados se basan en una muestra pequeña en comparación con estaciones de otras zonas con fundiciones, con una frecuencia aproximada de dos mediciones mensuales.

Tabla 2-45 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	18	20	19	24	15	17	20	22	0
Max.	S/I	S/I	29	19	180	9	9	5	13	35	S/I
3rd Qu.	S/I	S/I	9	7	6	5	5	3	4	5	S/I
Mediana	S/I	S/I	5	5	2	4	4	2	2	2	S/I
Media	S/I	S/I	7	6	13	4	4	3	3	5	S/I
1st Qu.	S/I	S/I	3	3	2	3	2	2	2	2	S/I
Min.	S/I	S/I	2	1	1	2	1	1	1	1	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Para la estación Doña Inés (ver Tabla 2-46) se observan concentraciones de valores altos para As, en comparación con las otras estaciones de medición. Aun así, se observa cambios a partir del año 2018, con medianas en el rango de 1.135 a 5.774 [ng/m³N] desde 2011 a 2017, mientras que entre los años 2018 y 2020 las medianas varían entre 551 y 675 [ng/m³N]. Cabe destacar que la cantidad de mediciones para esta estación son muy bajas y que a la fecha no se cuenta con mediciones disponibles para el año 2021.

Tabla 2-46 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	24	22	22	22	22	22	24	22	22	18	0
Max.	19.100	17.610	15.710	31.429	51.116	16.962	15.455	5.162	3.080	10.070	S/I
3rd Qu.	6.550	4.063	6.350	7.428	3.936	5.118	6.132	1.601	1.119	808	S/I
Mediana	5.100	1.135	2.262	5.774	2.244	3.066	2.832	675	529	551	S/I
Media	5.642	3.583	3.823	7.606	7.329	3.775	3.867	1.057	827	1.056	S/I
1st Qu.	1.300	180	436	1.484	889	1.336	852	338	134	144	S/I
Min.	400	20	98	112	143	95	20	44	26	21	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2-47 se muestran los estadígrafos para la estación Intelec. Los datos descritos corresponden sólo a cuatro mediciones puntuales en el período 2014-2016, lo cual no permite realizar ningún tipo de análisis estadístico.

Tabla 2-47 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0
Max.	S/I	S/I	110	110	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
3rd Qu.	S/I	S/I	110	108	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Mediana	S/I	S/I	110	105	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Media	S/I	S/I	110	105	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
1st Qu.	S/I	S/I	110	103	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Min.	S/I	S/I	110	100	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

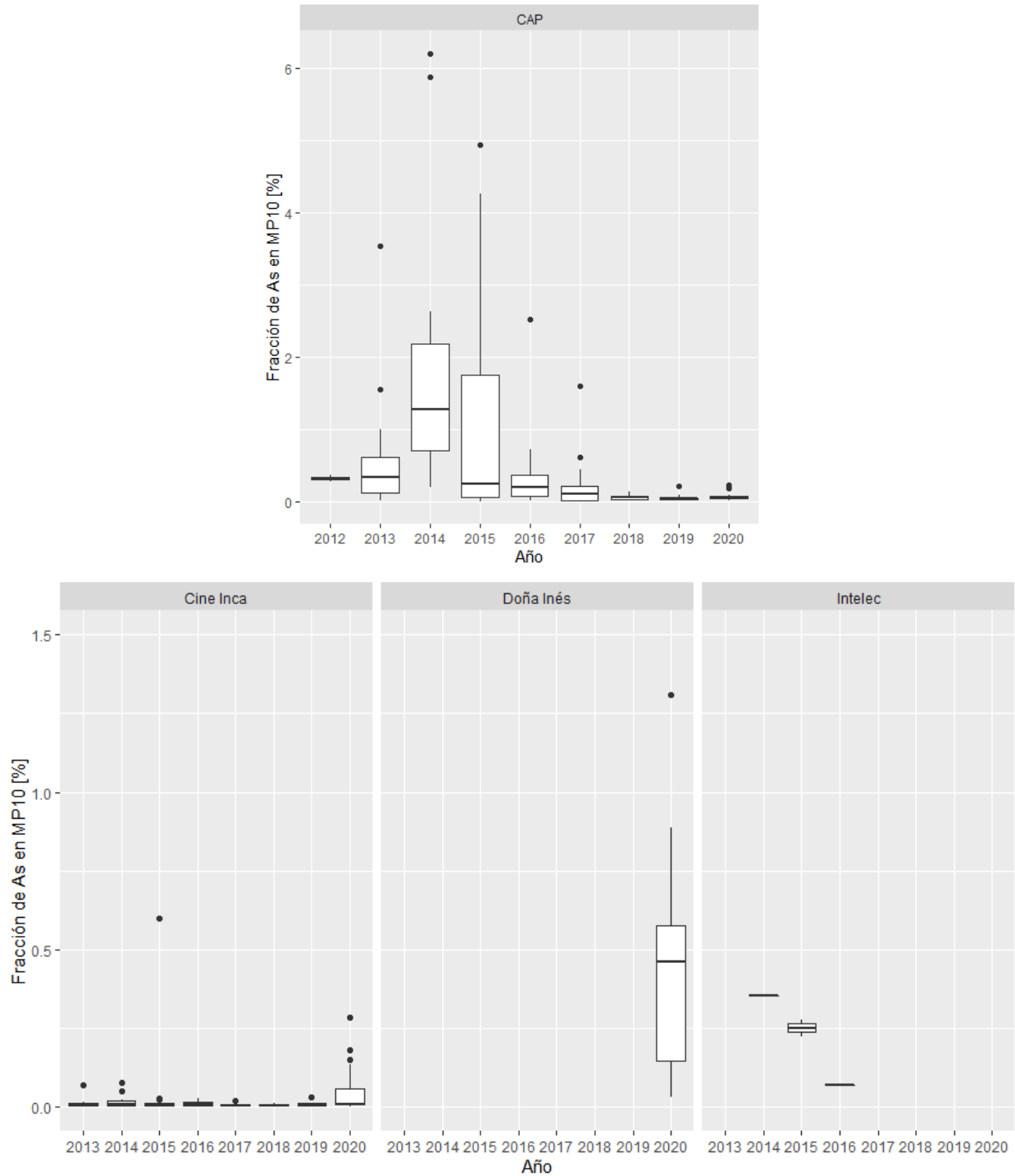
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-25 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante los muestreos. Los estadígrafos se presentan en las cuatro tablas posteriores¹⁰. Se observa que las fracciones estimadas para CAP tienen concentraciones medianas de As más altas que las otras estaciones para todo el periodo de estudio, las que van desde 5 veces el valor de la estación Cine Inca (en el año 2019) hasta 89 veces, diferencia observada en 2014, el año en el

¹⁰ Para la estación Doña Inés fue posible hacer este análisis sólo para el año 2020, debido a que no se dispone de información de mediciones de MP10 en los años anteriores.

que se observa la mayor concentración mediana de As para la estación CAP. Esto es esperable considerando que la estación CAP es la que se encuentra más cerca de la fundición, sumado a que la dirección predominante del viento es del Sureste, donde se encuentra la fundición (ver Anexo de la Sección 10.3.3). De esta forma, la contribución de la fundición respecto del total del MP10 se espera que sea mayor a la observada en otras estaciones, lo cual se refleja en una mayor fracción de arsénico en el MP10. Situación similar ocurre con Doña Inés donde en el año 2020 la fracción mediana es cercana a 0,5%, lo cual es incluso mayor que la fracción de CAP, lo cual indica que la contribución de la fundición al MP10 en dicha estación es aún mayor. Pese a lo anterior, la descripción debe considerar que se cuenta con una baja cantidad de muestreos por año, esto al compararlo con otras zonas con fundición.



Nota: Para la estación Doña Inés fue posible hacer este análisis sólo para el año 2020 debido a que no se dispone de información de mediciones de MP10 para los demás años.

Nota 2: En estación Doña Inés no se muestra el valor 7,042% correspondiente al día 28 de abril de 2020.

Figura 2-25 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-48 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	23	24	22	24	24	24	22	23	0
Max.	0,368	3,539	6,203	4,936	2,521	1,602	0,131	0,209	0,236	S/I
3rd Qu.	0,346	0,619	1,887	1,832	0,372	0,218	0,071	0,051	0,076	S/I
Mediana	0,324	0,334	0,891	0,305	0,201	0,101	0,054	0,038	0,052	S/I
Media	0,324	0,524	1,483	1,149	0,334	0,207	0,057	0,046	0,071	S/I
1st Qu.	0,302	0,142	0,470	0,081	0,080	0,022	0,030	0,025	0,039	S/I
Min.	0,281	0,012	0,194	0,010	0,019	0,007	0,010	0,008	0,012	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-49 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	18	17	19	24	15	17	20	22	0
Max.	S/I	0,069	0,079	0,600	0,027	0,020	0,012	0,031	0,284	S/I
3rd Qu.	S/I	0,013	0,022	0,013	0,016	0,011	0,008	0,012	0,059	S/I
Mediana	S/I	0,006	0,010	0,008	0,009	0,007	0,006	0,007	0,009	S/I
Media	S/I	0,012	0,018	0,040	0,011	0,008	0,007	0,009	0,049	S/I
1st Qu.	S/I	0,005	0,007	0,004	0,006	0,005	0,005	0,006	0,008	S/I
Min.	S/I	0,004	0,004	0,002	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-50 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
Max.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	7,042	S/I
3rd Qu.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,664	S/I
Mediana	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,489	S/I
Media	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,810	S/I
1st Qu.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,150	S/I
Min.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,030	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-51 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0
Max.	S/I	S/I	0,355	0,278	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
3rd Qu.	S/I	S/I	0,355	0,264	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Mediana	S/I	S/I	0,355	0,251	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Media	S/I	S/I	0,355	0,251	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
1st Qu.	S/I	S/I	0,355	0,238	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Min.	S/I	S/I	0,355	0,224	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la siguiente Figura 2-26 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación CAP, estación más cercana a la fundición (sin considerar la estación Doña Inés, la cual registra mediciones en un orden de magnitud mayor). No se observa una tendencia estacional clara, lo que puede deberse a la baja cantidad de mediciones disponibles.

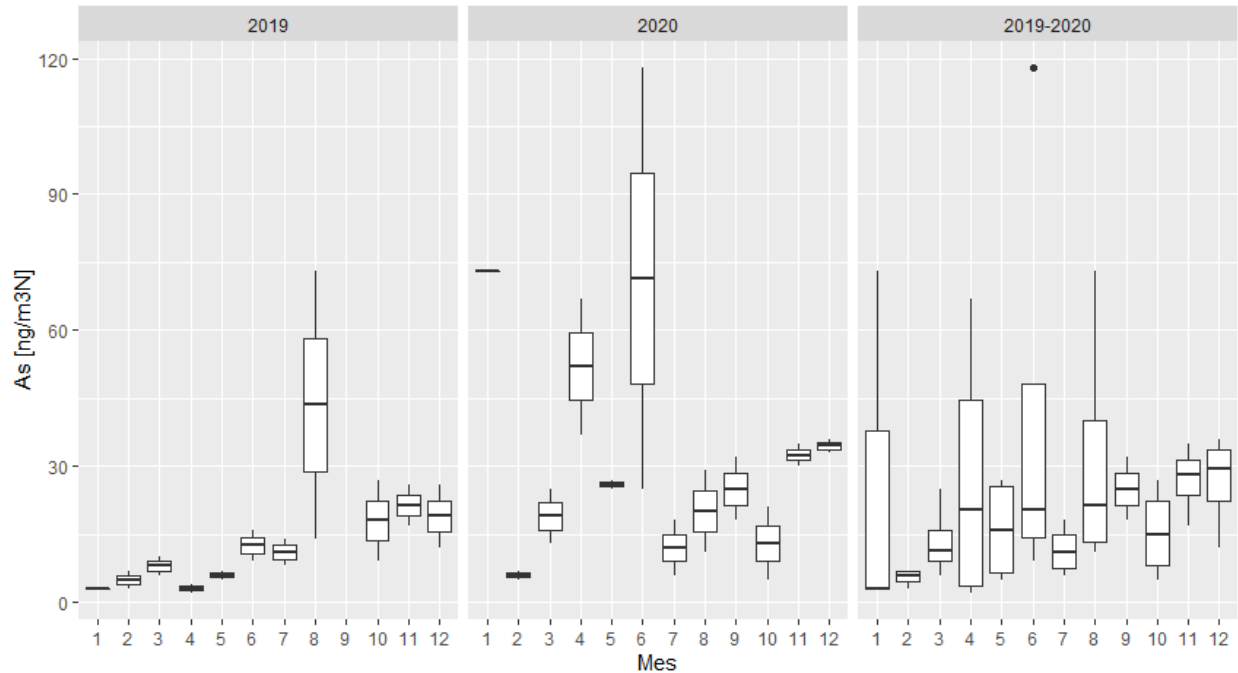


Figura 2-26 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m³N], cercanías fundición Potrerillos, estación CAP

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.7 Estaciones cercanas a fundición Hernán Videla Lira

En la Figura 2-27 se muestra la ubicación de la fundición Hernán Videla Lira, donde se observa que su localidad más cercana es Paipote y su ciudad más cercana es Copiapó. Respecto de las estaciones de monitoreo, se observa que la estación más cercana es Paipote, que se encuentra 1,5 kilómetros al noroeste de la fundición. Le sigue en cercanía la estación San Fernando, la cual se encuentra a 5 kilómetros también en dirección noroeste. Hacia el sur de la fundición se encuentra la estación Tierra Amarilla, a una distancia de 5,7 kilómetros. Por último, se puede observar también la estación Copiapó, la cual se encuentra a 9,7 kilómetros en dirección noroeste.



Figura 2-27 Mapa fundición Hernán Videla Lira, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Tabla 2-22 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones Copiapó, Paipote, San Fernando y Tierra Amarilla, ubicadas en las cercanías de la fundición Hernán Videla Lira. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-52, Tabla 2-53, Tabla 2-54 y Tabla 2-55, respectivamente.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Hernán Videla Lira no contaba con plantas de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir los límites de emisión exigidos por norma de emisión a partir de diciembre 2018. Exceptuando la estación de San Fernando, donde no se observan mayores cambios, se observa una mejora en los estadígrafos entre el año 2018 y 2019. La excepción corresponde a la máxima¹¹, donde el año 2019 se observan valores superiores, alcanzando a duplicar los valores máximos reportados el año 2018.

¹¹ Estos valores máximos ocurren los días 10 de abril en Tierra Amarilla, 22 de mayo en Copiapó y Paipote, y 18 de junio en San Fernando.

Por otra parte, llama la atención que las concentraciones de arsénico del año 2020 sean de las más altas, considerando que 2019 y 2020 tuvieron niveles de producción similares. Debido a que no se cuenta con una estimación de emisiones con una metodología válida para el año 2019, no es posible realizar un análisis entre las emisiones reportadas en 2019 y 2020. Sin embargo, una reestimación propia del consultor basada en la intensidad de emisiones observada desde septiembre del 2020 hasta agosto 2021, estima que las emisiones del 2020 fueron 73% superiores a las del 2019. Si bien esta es sólo una estimación propia, está en línea con los cambios observados en las concentraciones de arsénico.

De las cuatro estaciones, se observa que las concentraciones de la estación Paipote son los más altos, como se esperaría dada su cercanía a la fundición (ver Figura 2-27). En la misma línea, las concentraciones de la estación Copiapó son los más bajos, lo cual se explica no solo por su mayor distancia hacia la fuente, sino que también por la predominancia de viento desde el noroeste (ver Anexo de la Sección 10.3.4).

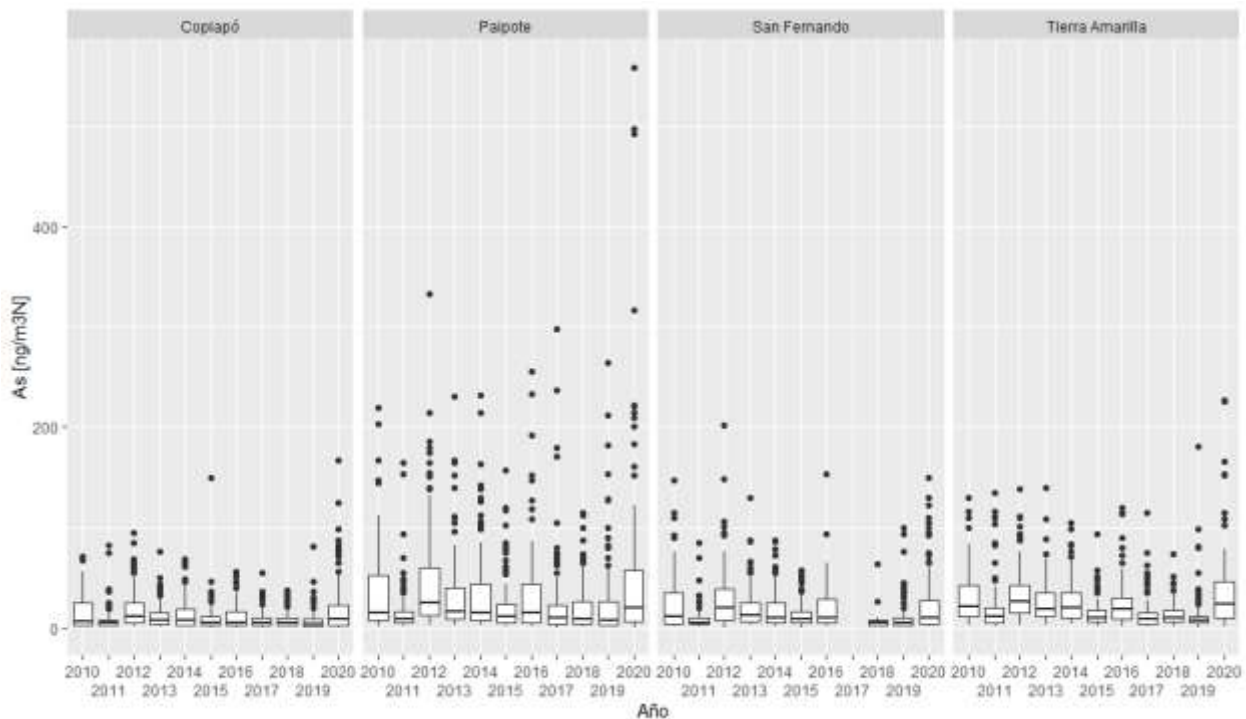


Figura 2-28 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

En la estación Copiapó (ver Tabla 2-52) se observa que desde 2017 a 2019 la mediana de las concentraciones de As se mantuvo en el rango de 3 a 5 [ng/m³N], ya observándose una disminución significativa respecto a años previos. Sin embargo, el 2020 se observó una mediana

de 8 [ng/m³N], similar a los valores observados entre 2013 y 2014. Similarmente, en cuanto al estadígrafo de máxima, desde 2016 a 2019 los valores se mantienen entre 38 y 81 [ng/m³N], que en 2020 alcanza 167 [ng/m³N], equivalente a alrededor de 3 veces el valor promedio de los máximos de los años previos. Lo anterior resulta en el registro de concentraciones promedios más altas del periodo descrito, igualando al año 2012 con una concentración media de 19 [ng/m³N].

Tabla 2-52 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	115	97	120	107	119	121	114	149	83	103	120	0
Max.	71	82	94	76	68	150	56	55	38	81	167	S/I
3rd Qu.	24	7	24	14	19	11	16	10	9	9	23	S/I
Mediana	6	4	11	7	7	4	4	5	5	3	8	S/I
Media	15	8	19	11	13	9	11	8	7	7	19	S/I
1st Qu.	2	2	4	3	3	2	2	2	2	1	2	S/I
Min.	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores de los días 4 de julio de 2017 y 23 de agosto de 2020, correspondientes a 0 [ng/m³N], ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Paipote (ver Tabla 2-53) se observa que desde 2017 a 2019 la mediana de las concentraciones de As se mantiene en el rango de 7 a 10 [ng/m³N], mientras que el 2020 se observó una mediana de 20 [ng/m³N], más de 2 veces el promedio de los tres años previos. En cuanto al estadígrafo de máxima, desde 2016 a 2019 los valores se mantienen entre 256 y 298 [ng/m³N], a excepción de 2018, en que el máximo solo alcanza los 114 [ng/m³N]. Mientras que en 2020 se observan varias mediciones superiores, alcanzando un máximo de 559 [ng/m³N], equivalente a 2.4 veces el promedio de los años previos, año en que se observan distribuciones más comparables con años previos, como 2012. La consecuencia de estos valores más altos es que el valor medio del año 2020 es el más alto de los 11 años con información: 54 [ng/m³N].

Tabla 2-53 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	117	107	121	120	121	126	121	165	116	116	119	0
Max.	219	164	333	230	232	157	256	298	114	264	559	S/I
3rd Qu.	52	16	60	39	43	24	43	22	26	25	57	S/I
Mediana	15	8	25	16	15	11	15	10	9	7	20	S/I
Media	37	16	45	32	35	22	30	22	19	23	54	S/I
1st Qu.	7	4	12	8	7	5	4	3	3	2	6	S/I
Min.	1	1	2	2	2	1	0	0	1	1	0	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluye el valor de concentración de As del día 1 de junio de 2015, correspondiente a 1.133 [ng/m³N], ya que se considera *outlier* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la estación San Fernando (ver Tabla 2-54) y la estación Tierra Amarilla (Tabla 2-55), se observan tendencias similares a la estación Copiapó. En el caso de la estación San Fernando, desde el año 2013 las concentraciones medianas de As se mantienen alrededor de 10 [ng/m³N], exceptuando los años 2018 y 2019 donde los estadígrafos tienden a disminuir. Por otra parte, en la estación Tierra Amarilla las concentraciones medianas de As desde el año 2013 tienen mayor variabilidad, manteniéndose en el rango de 7 a 23 [ng/m³N]. En el caso de ambas estaciones, las concentraciones medianas de As se acercan más a lo observado en 2016, sin embargo, sus valores medios representan los valores similares a los observados en el año 2012.

Tabla 2-54 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	113	107	121	119	119	132	112	0	16	112	120	0
Max.	147	84	202	130	87	57	153	S/I	64	100	150	S/I
3rd Qu.	35	9	38	24	25	16	28	S/I	7	9	27	S/I
Mediana	11	4	20	12	9	8	9	S/I	4	4	10	S/I
Media	23	8	28	18	18	12	19	S/I	10	10	24	S/I
1st Qu.	4	3	7	6	5	4	4	S/I	2	2	3	S/I
Min.	1	1	0	2	1	0	1	S/I	1	1	1	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluye el valor de concentración de As del día 4 de julio de 2012, correspondiente a 0 [ng/m³N], ya que se considera *outlier* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-55 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	117	107	119	118	122	133	122	168	120	120	122	0
Max.	129	134	138	139	104	93	120	115	73	181	227	S/I
3rd Qu.	42	20	42	35	34	17	30	14	17	11	46	S/I
Mediana	21	11	26	18	20	9	19	8	10	7	23	S/I
Media	30	19	33	25	26	14	24	12	13	13	34	S/I
1st Qu.	11	5	14	11	10	6	8	4	5	4	10	S/I
Min.	2	1	2	2	3	0	1	1	1	0	1	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-29 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante los muestreos. Los estadígrafos se presentan en las cuatro siguientes tablas, desde la Tabla 2-56 a la Tabla 2-59. Las menores medianas se observan en la estación San Fernando, en donde entre los años 2014 y 2020 estas varían entre 0,006 y 0,023%. Por otra parte, en la estación Tierra Amarilla se observan las mayores medianas, las que se encuentran en el rango de 0,013 y 0,043%. En la estación Paipote las medianas varían entre 0,016 y 0,043% y en la estación Copiapó están en el rango de 0,007 a 0,026%. Lo anterior está en línea con lo esperado, pues da cuenta

de que la fundición tiene mayor contribución en las estaciones más cercanas, es decir, Tierra Amarilla y Paipote.

En todas las estaciones se observa un aumento de todos los estadígrafos en general en el año 2020, especialmente en las fracciones de As máximas, las que alcanzan su mayor valor respecto a los demás años en cada una de las estaciones. Esto significaría que las emisiones de la fundición tuvieron una mayor contribución en el MP10 registrado en las estaciones, lo cual sería señal de que el año 2020 hubo mayores emisiones en comparación con el período previo.

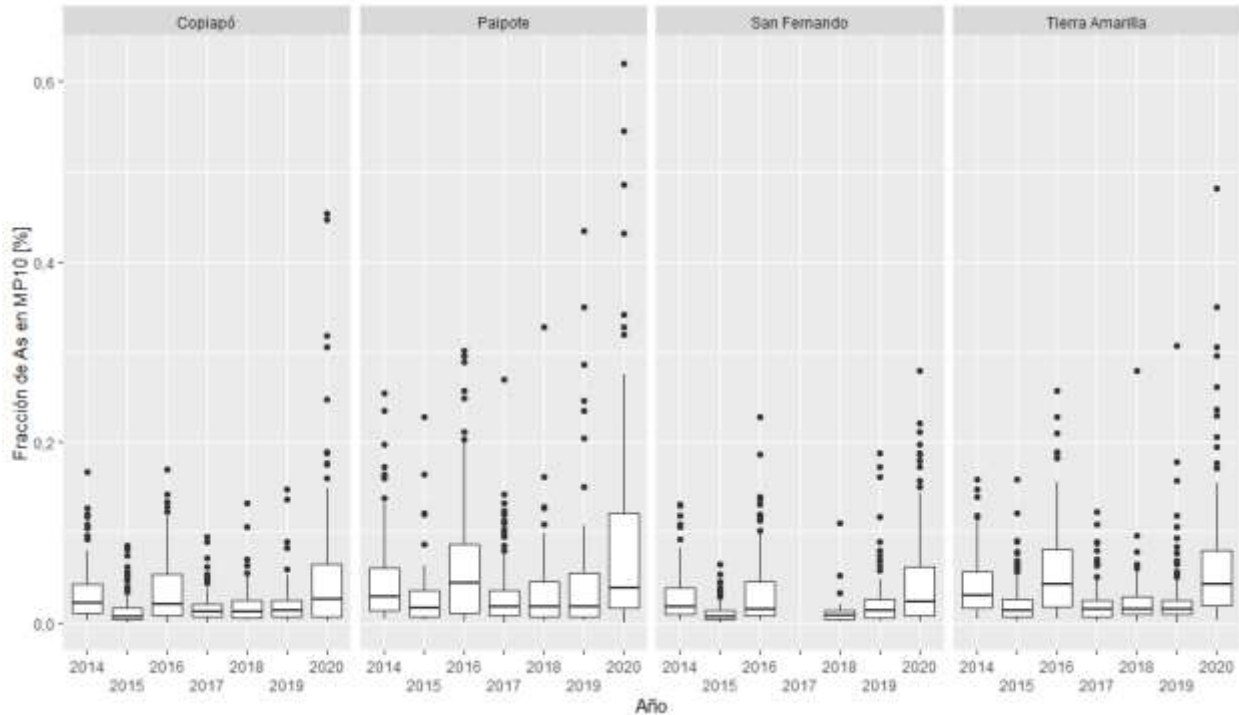


Figura 2-29 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-56 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	0	119	121	114	148	83	103	120	0
Max.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,167	0,085	0,169	0,095	0,132	0,148	0,453	S/I
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,042	0,016	0,053	0,021	0,024	0,024	0,064	S/I
Mediana	S/C	S/C	S/C	S/C	0,022	0,007	0,020	0,012	0,012	0,013	0,026	S/I
Media	S/C	S/C	S/C	S/C	0,033	0,015	0,035	0,017	0,019	0,020	0,055	S/I
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,011	0,004	0,008	0,006	0,006	0,006	0,007	S/I
Min.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-57 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	0	121	126	120	164	116	116	119	0
Max.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,254	0,228	0,301	0,270	0,328	0,434	0,620	S/I
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,061	0,035	0,087	0,036	0,045	0,055	0,121	S/I
Mediana	S/C	S/C	S/C	S/C	0,029	0,016	0,043	0,018	0,017	0,017	0,039	S/I
Media	S/C	S/C	S/C	S/C	0,047	0,026	0,063	0,029	0,032	0,044	0,086	S/I
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,013	0,007	0,011	0,008	0,007	0,007	0,016	S/I
Min.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,003	0,002	0,001	0,000	0,002	0,002	0,000	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-58 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	0	119	132	111	0	16	112	120	0
Max.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,131	0,065	0,228	S/I	0,110	0,188	0,279	S/I
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,039	0,013	0,045	S/I	0,013	0,026	0,062	S/I
Mediana	S/C	S/C	S/C	S/C	0,017	0,006	0,015	S/I	0,007	0,013	0,023	S/I
Media	S/C	S/C	S/C	S/C	0,027	0,011	0,034	S/I	0,018	0,023	0,048	S/I
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,009	0,003	0,007	S/I	0,004	0,005	0,008	S/I
Min.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,002	0,000	0,002	S/I	0,001	0,001	0,001	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de As ni de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-59 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	0	122	132	122	167	120	120	122	0
Max.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,158	0,159	0,257	0,123	0,279	0,307	0,481	S/I
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,057	0,026	0,081	0,025	0,029	0,025	0,080	S/I
Mediana	S/C	S/C	S/C	S/C	0,030	0,013	0,043	0,015	0,015	0,014	0,043	S/I
Media	S/C	S/C	S/C	S/C	0,042	0,022	0,057	0,020	0,023	0,026	0,067	S/I
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,016	0,007	0,018	0,007	0,009	0,009	0,019	S/I
Min.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,004	0,001	0,004	0,001	0,001	0,000	0,002	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-30 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Paipote, estación más cercana a la fundición. Se observan mayores concentraciones de As en los meses de invierno, particularmente desde junio a agosto, lo cual se explica por las condiciones meteorológicas durante invierno.

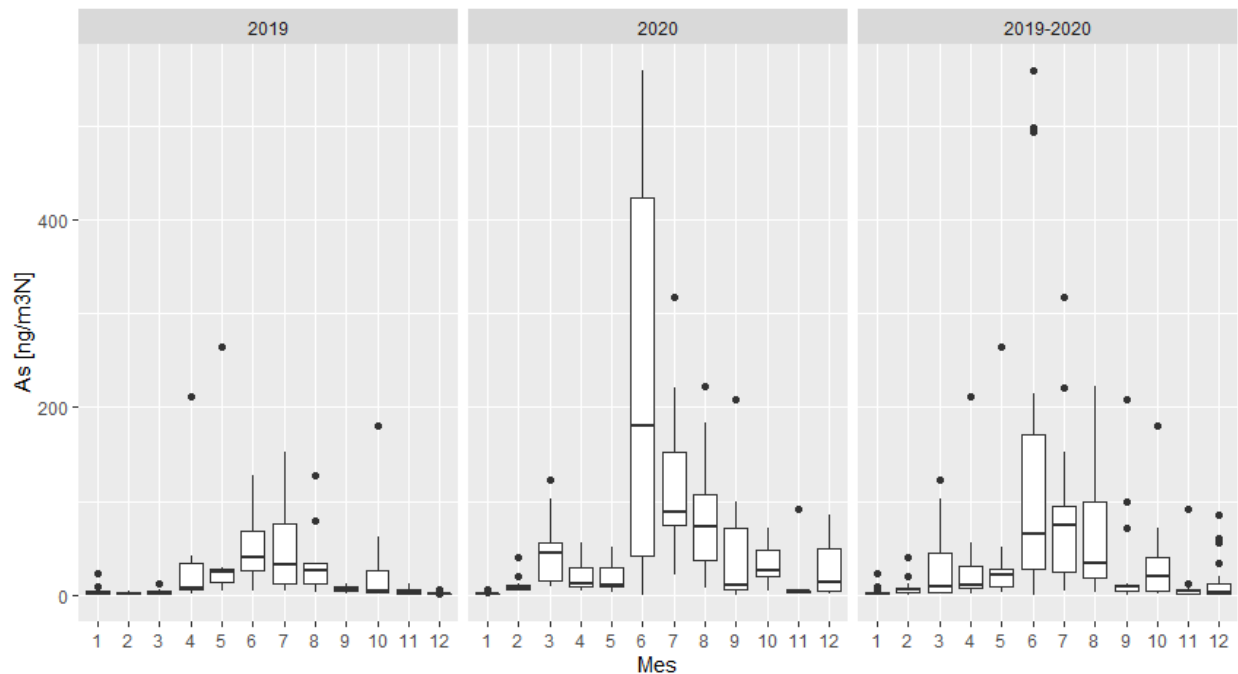


Figura 2-30 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m³N], cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.8 Estaciones cercanas a fundición Ventanas

En la Figura 2-31 se muestra la ubicación de la fundición Ventanas, donde se observan distintas localidades cercanas como La Greda, Loncura, Quinteros y Puchuncaví, entre otras. Respecto de las estaciones de monitoreo, se observan múltiples estaciones cercanas en diferentes direcciones. En dirección norte, se encuentra la estación La Greda a 2 kilómetros y la estación Ventanas a 2,6 kilómetros. En dirección este, se encuentra la estación Los Maitenes, a 2,7 kilómetros. Al sureste de la fundición se encuentra la estación Valle Alegre a 6,4 kilómetros. La estación Sur, justamente se encuentra 4 kilómetros al sur de la fundición. La estación Quintero se encuentra 5 kilómetros al oeste, y la estación Quintero Centro 5,3 kilómetros al suroeste. Por último, la estación Puchuncaví se encuentra a 8,7 km al noreste de la fundición.

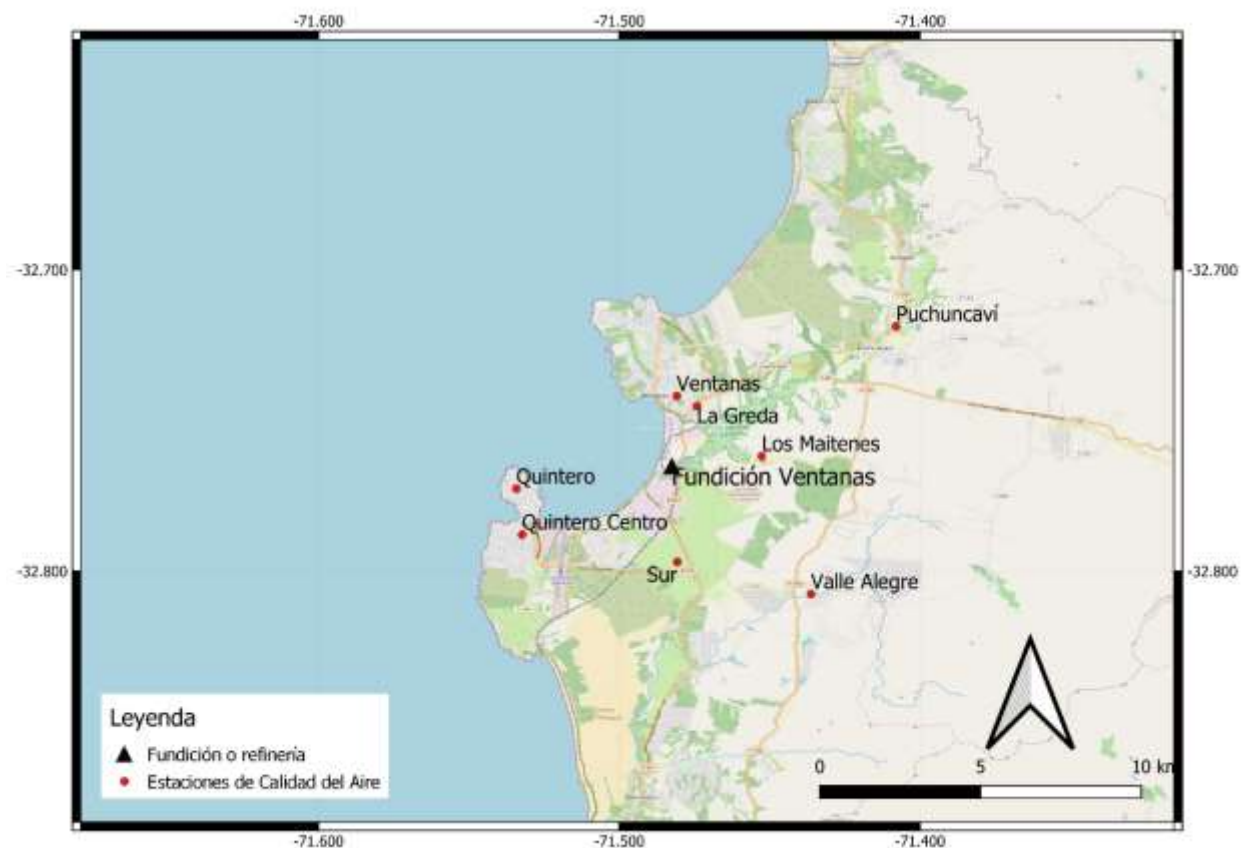


Figura 2-31 Mapa fundición Ventanas, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

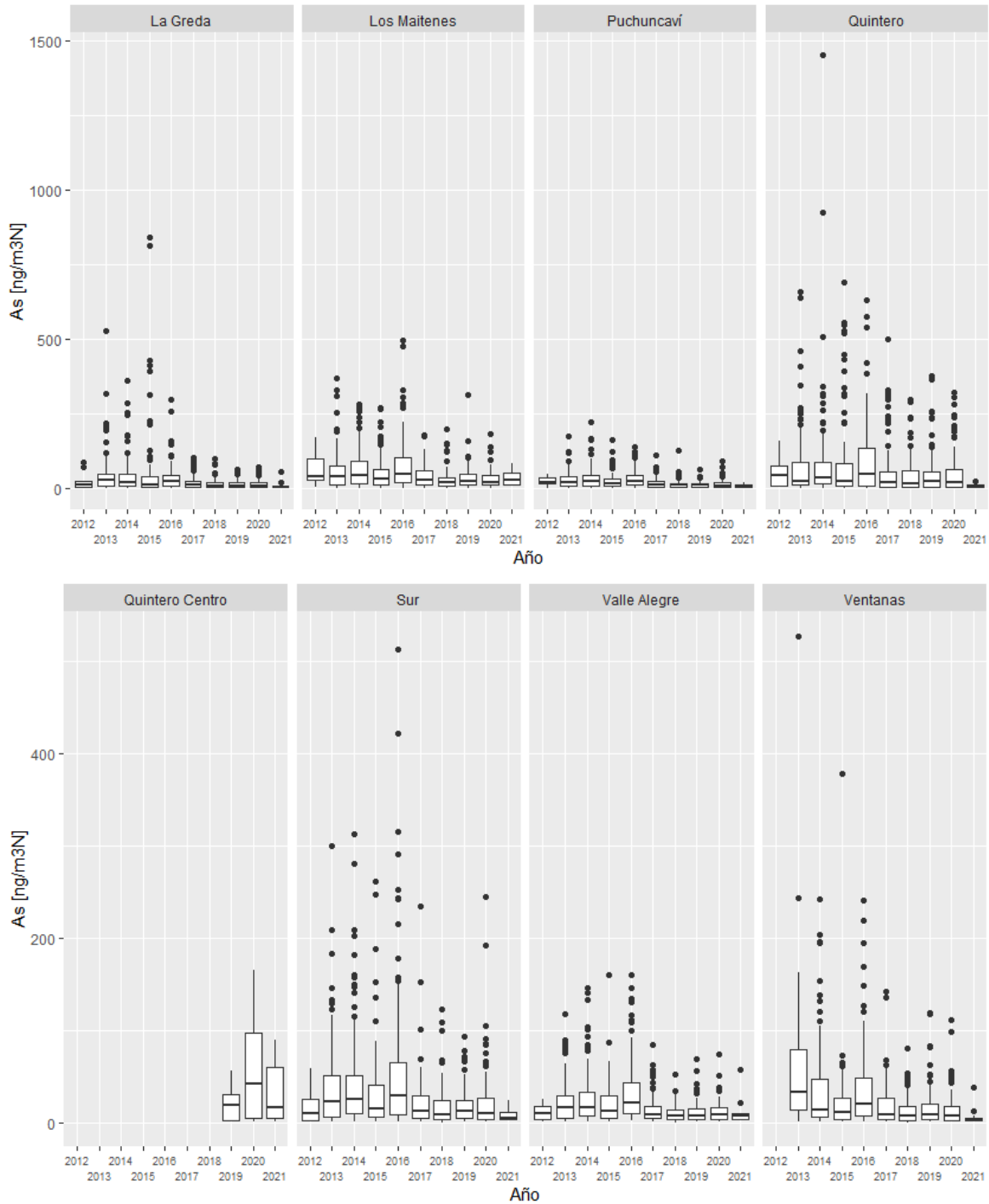
En la Figura 2-32 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Quintero Centro, Sur, Valle Alegre y Ventanas,

ubicadas en las cercanías de la fundición Ventanas. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan a continuación, desde la Tabla 2-60 a la Tabla 2-67.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Ventanas ya contaba con una planta de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir los límites de emisión establecidos en la norma a partir de diciembre 2016. Es posible observar cómo en general las concentraciones de arsénico de todas las estaciones en la zona tienden a disminuir a partir del año 2017.

De todas las estaciones, se observa que los valores de la estación Quintero son los mayores, seguidos por la estación Los Maitenes y, en menor medida, la estación Sur y Ventanas. La estación La Greda alcanza los mayores valores registrados, en el año 2015, sin embargo, desde 2017 es de las estaciones con los menores valores, junto con Valle Alegre y Puchuncaví desde 2018. Las altas concentraciones de As en la estación Quintero se explican por condiciones meteorológicas específicas que hacen que las emisiones de la zona de la fundición tengan mayor impacto en las concentraciones de As medidas en esta estación. Lo mismo sucede en el caso de las concentraciones de SO₂ (ver Sección 6.2.5.3 en informe complementario sobre la revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico). Las menores concentraciones de As en la estación Valle Alegre y Puchuncaví, especialmente desde 2018, están dentro de lo esperado considerando que son las más lejanas a la fundición Ventanas (ver Figura 2-31).

En todas las estaciones se observa una disminución desde 2016 a 2017, que tiende a estabilizarse en valores menores, y en general se observa una disminución mayor en el año 2021. Esto se condice con las emisiones de arsénico de la fundición presentadas en la Figura 3-40 de la Sección 3.3.5, donde se observa que las emisiones comienzan a disminuir a partir del año 2016 manteniéndose luego relativamente estables en el tiempo. El impacto de las mejoras operacionales de la planta se observa especialmente en la reducción de las concentraciones máximas observadas.



Nota 1: La gráfica de estaciones Quintero, Sur, Valle Alegre y Ventanas tiene una escala diferente.

Figura 2-32 Concentraciones de As en MP10 [$\text{ng/m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Greda (ver Tabla 2-60) se observa que desde el año 2017 la mediana de las concentraciones se ha mantenido en el rango de 5 a 10 [ng/m³N], observándose que en los últimos tres años de la serie los estadígrafos se han mantenido con desviaciones menores, lo que contrasta especialmente con los amplios rangos observados en los años previos, especialmente en 2015. En cuanto al periodo anterior se observan medianas de concentración entre 14 y 26 [ng/m³N], además de valores máximos significativamente mayores, lo que resultaba en valores medios entre 2 y 3 veces mayores. Si bien el año 2012 tiene valores menores, se destaca que sólo se tienen nueve observaciones, lo cual hace que sus estadígrafos no den cuenta de la situación real durante dicho año.

Tabla 2-60 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	9	107	119	115	119	117	118	120	121	11
Max.	87	527	361	839	298	105	97	64	71	56
3rd Qu.	23	47	48	40	44	25	19	20	19	9
Mediana	10	26	17	14	22	10	8	9	7	5
Media	24	42	40	54	35	18	14	14	14	11
1st Qu.	5	6	6	5	9	3	3	5	4	4
Min.	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 22 de marzo de 2015, 9 de octubre de 2015, 29 de noviembre de 2011 y 11 de octubre de 2018, correspondientes a 0 [ng/m³N] y del día 20 de enero de 2018, correspondiente a 1 [ng/m³N], ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Los Maitenes (ver Tabla 2-61) se observa que la mediana de las concentraciones de As, desde el año 2017, se ubica en el rango de 19 a 27 [ng/m³N]. En cuanto a valores máximos, los mayores valores se observan en 2016, alcanzando 497 [ng/m³N]. Se observa que a partir del año 2017 los estadígrafos tienden a ser menores que en el período anterior, lo cual resulta en concentraciones medias cercanas a la mitad de las concentraciones medias del período 2013-2016.

Tabla 2-61 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	10	107	118	118	121	122	118	119	119	10
Max.	169	367	280	270	497	180	199	314	182	82
3rd Qu.	100	77	89	64	101	60	36	45	42	53
Mediana	40	41	45	30	47	25	20	21	19	27
Media	61	61	64	50	76	39	29	32	30	33
1st Qu.	27	12	17	11	19	10	6	9	10	10
Min.	4	1	1	1	1	1	1	1	1	7

Fuente: Elaboración propia

En la estación Puchuncaví (ver Tabla 2-62) se observa que la mediana de las concentraciones, desde el año 2017, se ubica en el rango de 6 a 10 [ng/m³N], muy acotado. En general, no se observa una tendencia clara al alza o reducción de los estadígrafos descriptores de las concentraciones de Arsénico desde 2018 en adelante, manteniéndose en niveles similares. Se destaca nuevamente que se observa una disminución relevante, observándose valores medios cercanos a la mitad de los valores observados en el período entre los años 2013 y 2017.

Tabla 2-62 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	9	107	122	118	120	121	119	118	119	10
Max.	46	176	221	161	137	110	125	61	92	19
3rd Qu.	37	38	44	30	44	24	16	16	18	11
Mediana	21	20	24	14	24	10	10	10	8	6
Media	24	28	34	22	30	16	13	12	14	8
1st Qu.	16	8	8	7	11	5	5	5	5	4
Min.	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

En la estación Quintero (ver Tabla 2-63) se observa que la mediana de las concentraciones de As, desde el año 2017, se ubica en el rango de 15 a 24 [ng/m³N], exceptuando el año 2021 el cual presenta una mediana de las concentraciones de 5 [ng/m³N], sin embargo, se debe tener en consideración la baja cantidad de muestras de dicho año. En el año 2016 se observó un aumento de las concentraciones medidas, lo que se refleja en un aumento de todos los estadígrafos descriptivos, exceptuando el valor máximo. La máxima concentración de As se observa el año 2014. Se observa claramente la disminución de concentraciones desde 2017, pero desde ese año no se identifica una tendencia clara al alza o reducción de los estadígrafos descriptores de las concentraciones de Arsénico. Se destaca que los valores máximos observados son superiores a los observados en otras estaciones, lo cual responde a condiciones meteorológicas especiales que resultan en que las emisiones de la zona de la fundición tengan mayor impacto en Quintero. Este mismo fenómeno se observa en el caso de las concentraciones de SO₂.

Tabla 2-63 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	9	103	112	108	115	116	101	115	110	8
Max.	157	658	1.453	690	631	501	299	376	321	23
3rd Qu.	74	88	85	83	135	57	59	56	64	10
Mediana	43	23	37	23	48	18	15	24	20	5
Media	52	78	92	84	96	55	44	49	50	8
1st Qu.	7	11	15	7	9	4	5	5	4	3
Min.	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

La estación Quintero Centro (ver Tabla 2-64) cuenta con menos información, disponiendo sólo de 33 datos distribuidos entre los años 2019 y 2021. De esta forma se advierte que es complejo obtener conclusiones de esta estación. A modo descriptivo, se observa que los estadígrafos de las mediciones aumentan de 2019 a 2020, aumentando la mediana de 19 [ng/m³N] a 43 [ng/m³N], así como las emisiones máximas aumentan de 56 a 166 [ng/m³N]. El año 2021 los estadígrafos nuevamente disminuyen.

Tabla 2-64 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	0	0	0	0	12	12	9
Max.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	56	166	90
3rd Qu.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	30	97	60
Mediana	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	19	43	16
Media	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	20	57	34
1st Qu.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	2	5	5
Min.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	1	1	1

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sur (ver Tabla 2-65) se observa que la mediana de las concentraciones de As, desde el año 2017, se ubica en el rango de 8 a 13 [ng/m³N]. En cuanto a valores máximos, al igual que en Los Maitenes, se observa un peak en 2016 con 513 [ng/m³N]. Al igual que en Quintero, se observa una clara disminución desde 2017, y desde ese año no se observa una tendencia clara al alza o reducción de los estadígrafos descriptores de las concentraciones de Arsénico.

Tabla 2-65 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	10	106	116	114	118	115	117	116	118	10
Max.	59	300	312	262	513	234	123	93	245	24
3rd Qu.	25	52	52	41	65	29	25	25	27	12
Mediana	10	22	25	15	30	13	8	12	10	5
Media	16	40	46	31	57	22	17	18	22	9
1st Qu.	2	6	10	6	9	5	4	5	4	3
Min.	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2

Fuente: Elaboración propia

En las estaciones Valle Alegre (ver Tabla 2-66) y Ventanas (ver Tabla 2-67) se observa una clara disminución desde 2017. En los años previos, comparativamente, la estación Ventanas tenía una mayor dispersión en las mediciones. En ambas estaciones se observa una concentración mediana en el rango de 7 a 9 [ng/m³N] desde 2017, muy acotado, exceptuando el año 2021 en Ventanas, cuyo valor disminuye a 3 [ng/m³N].

Tabla 2-66 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	10	105	119	113	118	117	113	118	119	11
Max.	26	118	146	160	161	85	52	69	74	58
3rd Qu.	18	30	33	30	43	17	14	15	16	10
Mediana	10	16	16	12	22	9	7	8	9	7
Media	11	23	27	21	32	14	10	11	12	12
1st Qu.	4	5	8	5	10	5	3	4	4	4
Min.	1	1	1	1	2	1	0	1	1	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-67 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	70	116	113	121	121	113	119	120	11
Max.	S/I	526	242	378	240	142	80	120	111	38
3rd Qu.	S/I	79	47	27	49	27	18	20	18	6
Mediana	S/I	33	15	12	20	9	8	8	8	3
Media	S/I	58	35	21	38	19	13	16	14	7
1st Qu.	S/I	14	6	4	7	4	3	4	3	2
Min.	S/I	1	1	1	1	1	0	1	1	1

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-33¹² se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante los muestreos. Para todas las estaciones se observan mayores estadígrafos para el año 2016, exceptuando algunos valores máximos en años previos. Este peak se observa especialmente en las estaciones Quintero, Los Maitenes y Sur, donde también se observan medianas mayores para la fracción de As en MP10. Los estadígrafos se presentan desde la Tabla 2-68 a la Tabla 2-75.

Para el año 2020 la mediana de la fracción para la estación Ventanas fue 0,01%, para La Greda fue 0,02%, para Puchuncaví y Valle Alegre fue 0,03%, para la estación Sur fue 0,04%, en Quintero fue de 0,06%, mientras que para Los Maitenes fue de 0,09%. Lo anterior es una señal de cuál es el nivel de contribución de la fundición respecto del total de emisiones del MP10 en las diferentes estaciones. De esta forma, por ejemplo, en Ventanas es esperable que otras fuentes emisoras tales como el complejo termoeléctrico Ventanas de AES GENER, ENAP refinerías Aconcagua, tengan contribuciones relevantes, lo cual resulta en una menor contribución proporcional de la fundición y, por ende, menor fracción de Arsénico en el MP10. En el caso contrario, en Los Maitenes, el efecto de la fundición es mayor, ante la falta de otras fuentes emisoras locales que pudieran reducir el impacto proporcional de la fundición.

¹² No fue posible hacer este análisis para la estación Quintero Centro, por falta de antecedentes de MP10.

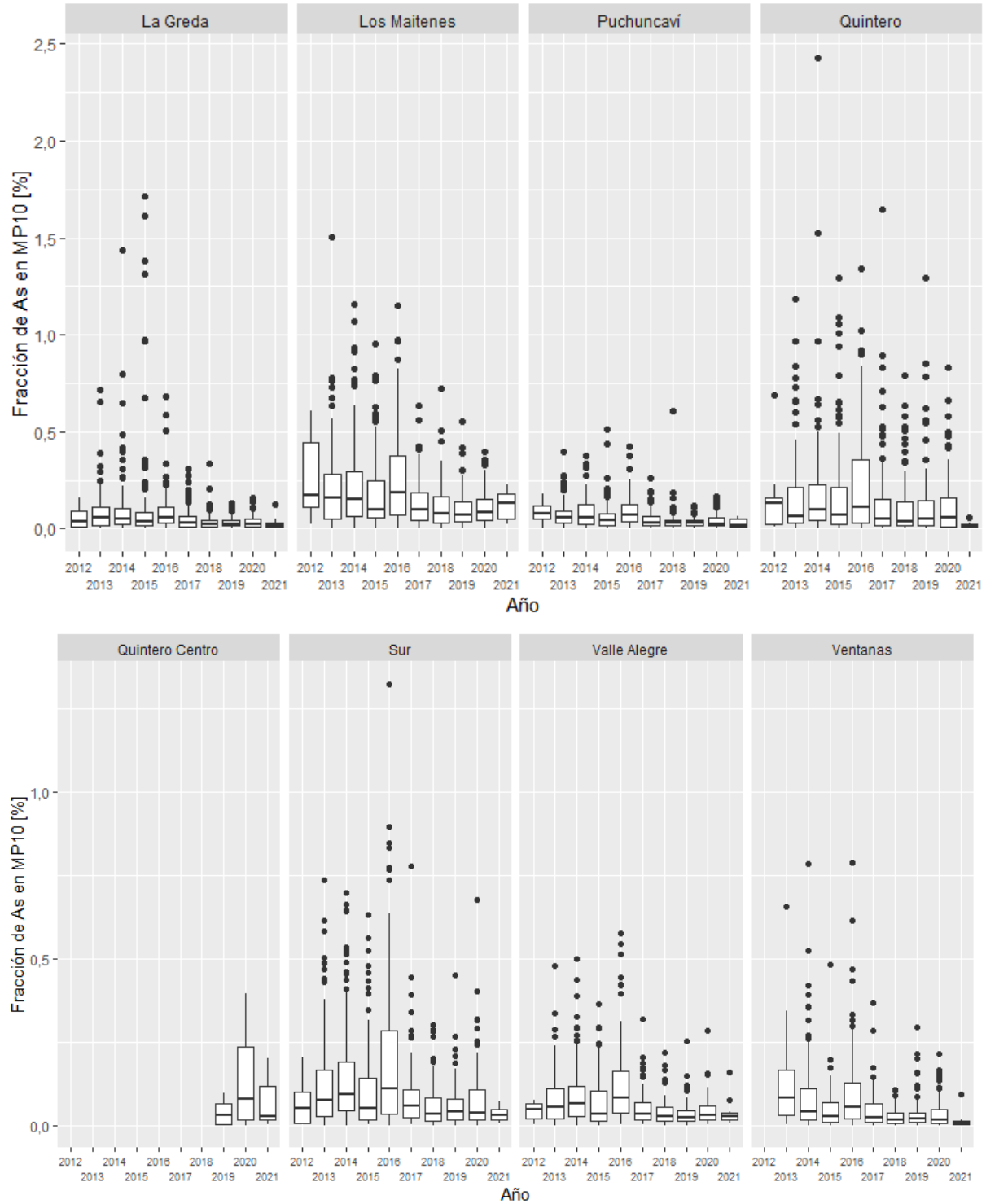


Figura 2-33 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-68 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	9	107	119	115	119	117	118	120	121	11
Max.	0,160	0,719	1,439	1,714	0,680	0,305	0,333	0,129	0,155	0,127
3rd Qu.	0,092	0,108	0,107	0,087	0,110	0,061	0,043	0,042	0,047	0,027
Mediana	0,034	0,060	0,051	0,039	0,059	0,030	0,022	0,023	0,022	0,017
Media	0,054	0,087	0,102	0,134	0,090	0,047	0,036	0,033	0,035	0,029
1st Qu.	0,012	0,019	0,021	0,014	0,029	0,012	0,011	0,014	0,010	0,011
Min.	0,005	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,005

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-69 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	10	107	118	118	121	122	118	119	119	10
Max.	0,609	1,507	1,161	0,951	1,152	0,637	0,723	0,554	0,398	0,227
3rd Qu.	0,445	0,283	0,297	0,248	0,378	0,185	0,164	0,138	0,148	0,181
Mediana	0,172	0,155	0,155	0,098	0,185	0,094	0,076	0,072	0,086	0,133
Media	0,260	0,210	0,233	0,177	0,260	0,133	0,111	0,100	0,103	0,121
1st Qu.	0,108	0,051	0,065	0,056	0,073	0,044	0,030	0,034	0,041	0,050
Min.	0,025	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002	0,004	0,004	0,004	0,026

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-70 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	9	107	122	118	120	121	119	118	119	10
Max.	0,177	0,397	0,376	0,510	0,424	0,259	0,605	0,118	0,165	0,061
3rd Qu.	0,120	0,090	0,121	0,077	0,126	0,063	0,042	0,040	0,053	0,047
Mediana	0,078	0,053	0,059	0,041	0,068	0,031	0,028	0,027	0,026	0,014
Media	0,088	0,073	0,086	0,064	0,085	0,043	0,038	0,030	0,038	0,027
1st Qu.	0,048	0,028	0,024	0,018	0,035	0,015	0,013	0,015	0,014	0,011
Min.	0,004	0,002	0,003	0,001	0,004	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-71 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	9	103	112	108	115	116	101	115	110	8
Max.	0,691	1,182	2,426	1,292	1,339	1,644	0,792	1,294	0,834	0,053
3rd Qu.	0,157	0,215	0,227	0,212	0,354	0,152	0,138	0,146	0,158	0,024
Mediana	0,131	0,062	0,099	0,068	0,114	0,051	0,039	0,052	0,057	0,013
Media	0,168	0,166	0,194	0,175	0,225	0,138	0,113	0,119	0,122	0,019
1st Qu.	0,023	0,027	0,042	0,020	0,026	0,013	0,016	0,013	0,011	0,007
Min.	0,007	0,001	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,005

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-72 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019*	2020*	2021*
N	0	0	0	0	0	0	0	4	12	9
Max.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,097	0,395	0,202
3rd Qu.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,067	0,238	0,118
Mediana	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,031	0,080	0,030
Media	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,040	0,139	0,076
1st Qu.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,004	0,020	0,017
Min.	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	0,002	0,002	0,003

* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-73 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	10	106	116	114	118	115	117	116	118	10
Max.	0,204	0,737	0,696	0,632	1,323	0,777	0,303	0,450	0,677	0,075
3rd Qu.	0,101	0,169	0,191	0,143	0,286	0,108	0,085	0,082	0,107	0,051
Mediana	0,055	0,076	0,096	0,051	0,110	0,058	0,037	0,041	0,040	0,033
Media	0,073	0,133	0,154	0,109	0,204	0,086	0,060	0,059	0,076	0,036
1st Qu.	0,009	0,029	0,045	0,018	0,035	0,024	0,013	0,017	0,018	0,019
Min.	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,007

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-74 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	10	105	119	113	118	117	113	118	119	11
Max.	0,079	0,479	0,499	0,364	0,576	0,320	0,220	0,252	0,285	0,161
3rd Qu.	0,065	0,112	0,118	0,106	0,164	0,069	0,057	0,045	0,059	0,041
Mediana	0,049	0,055	0,065	0,037	0,083	0,036	0,029	0,026	0,033	0,027
Media	0,045	0,080	0,091	0,072	0,119	0,051	0,041	0,036	0,044	0,042
1st Qu.	0,022	0,020	0,030	0,014	0,039	0,019	0,015	0,013	0,019	0,019
Min.	0,004	0,002	0,002	0,002	0,006	0,003	0,003	0,001	0,005	0,007

Fuente: Elaboración propia

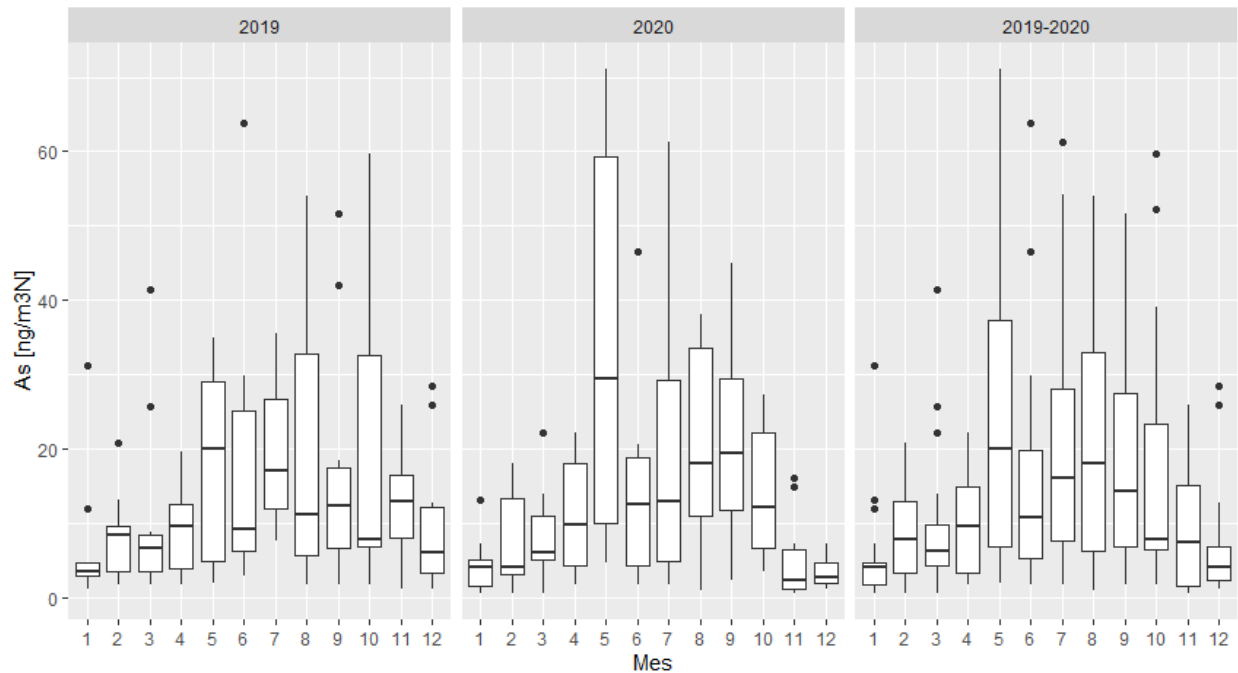
Tabla 2-75 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	70	116	113	121	121	113	119	120	11
Max.	S/C	0,657	0,784	0,481	0,788	0,369	0,110	0,297	0,217	0,095
3rd Qu.	S/C	0,166	0,112	0,069	0,128	0,066	0,040	0,041	0,049	0,016
Mediana	S/C	0,084	0,042	0,029	0,056	0,024	0,017	0,020	0,019	0,009
Media	S/C	0,116	0,088	0,048	0,097	0,046	0,028	0,036	0,038	0,018
1st Qu.	S/C	0,033	0,016	0,012	0,021	0,012	0,007	0,010	0,008	0,006
Min.	S/C	0,005	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de As ni de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-34 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación La Greda, estación más cercana a la fundición. Se observa que la concentración de As aumenta durante el invierno en dichos años, siendo mayor en los meses de mayo hasta octubre, tanto en el valor de la mediana como en los valores máximos.


Figura 2-34 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m³N], cercanías fundición Ventanas, estación La Greda

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.9 Estaciones cercanas a refinería ENAP Aconcagua

En la Figura 2-35 se muestra la ubicación de la refinería ENAP, donde se observa que la ciudad más cercana es Concón. Respecto de las estaciones de monitoreo, Junta de Vecinos, Concón y

Las Gaviotas son las más cercanas, ubicadas a una distancia relativamente similar. Junta de Vecinos y Concón se ubican en dirección suroeste a 3,2 y 2,2 km respectivamente, y Las Gaviotas se encuentra a 1,6 km al noreste de la refinería. La estación Colmo se ubica 4,9 km al este.



Figura 2-35 Mapa refinería ENAP Aconcagua, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-36 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones Colmo, Concón, Junta de Vecinos y Las Gaviotas, ubicadas en las cercanías de la Refinería ENAP. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-76, Tabla 2-77, Tabla 2-78, Tabla 2-79, respectivamente.

De las cuatro estaciones, se observa que los valores son similares entre ellas, sin embargo, se distinguen valores levemente mayores en la estación Las Gaviotas, especialmente en los años 2011, 2012 y 2017. Lo anterior se puede deber a la similitud en cercanía entre estaciones (ver Figura 2-35). Debido a que la refinería no es una fuente relevante de arsénico, los valores de concentraciones de arsénico son relativamente bajos en comparación con otras zonas del país. De hecho, la caída en las concentraciones entre el año 2016 y 2017 sugiere que las

concentraciones observadas se ven influenciadas por las emisiones de la Fundición de Ventanas que se ubica 17,9 km hacia el norte.

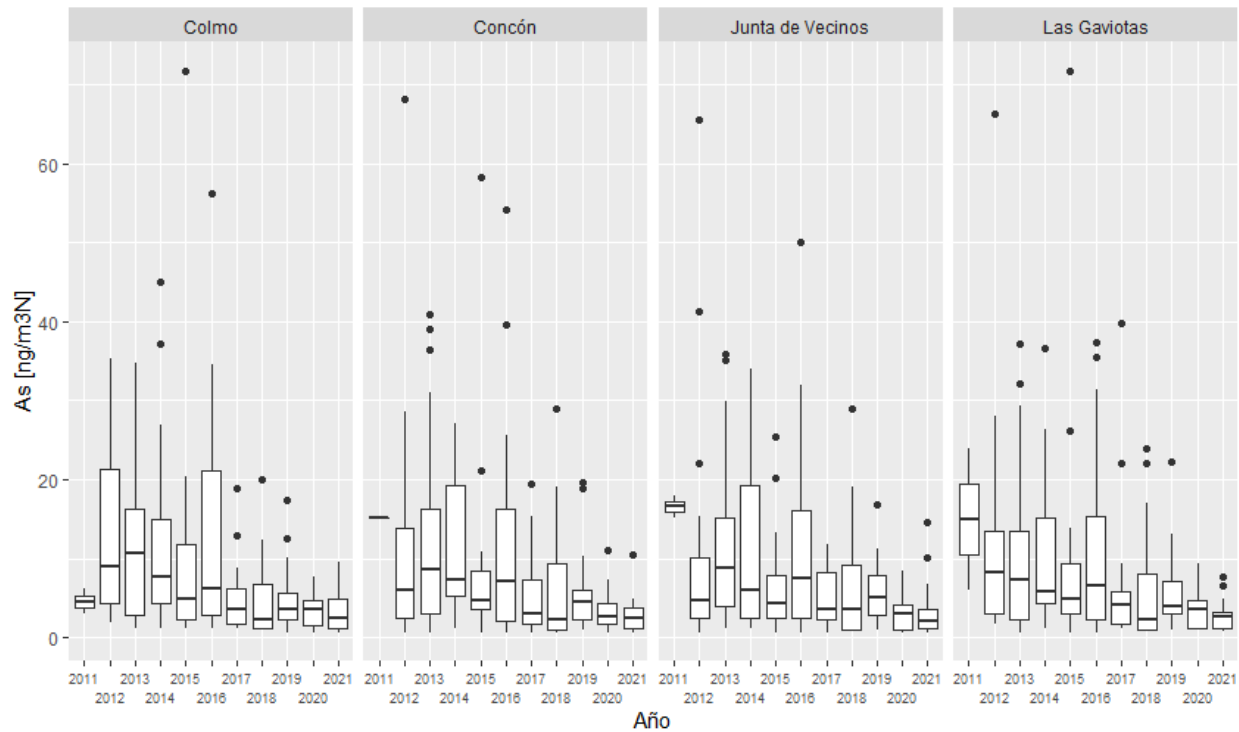


Figura 2-36 Concentraciones de As en MP10 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes estadígrafos se observa que en general, en todas las estaciones hay una tendencia a la disminución de la concentración mediana entre los años 2013 y 2021, observándose un leve aumento en el año 2016 y 2019. Las concentraciones medianas de As se mantienen entre 2 y 4 $\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$ en los años 2020 y 2021. Se destaca que a partir del año 2017 las medias se han encontrado entre 3 y 5 $\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$, representando poco más de la mitad de las concentraciones observadas en el período anterior al año 2017. Sin perjuicio de lo anterior, se destaca que sólo se cuentan con dos mediciones mensuales por estación, lo cual es una frecuencia baja en comparación con la frecuencia cercana a 10 mediciones mensuales que se observan en otras zonas.

Tabla 2-76 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	22	23	21	20	24	19	24	22	23	20
Max.	6	35	35	45	72	56	19	20	17	8	9
3rd Qu.	5	21	16	15	12	21	6	7	6	5	5
Mediana	5	9	11	8	5	6	3	2	4	4	2
Media	5	12	11	13	10	13	5	5	5	3	3
1st Qu.	4	4	3	4	2	3	2	1	2	1	1
Min.	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Nota: Se excluye el valor de concentración de As 56 [ng/m³N], correspondiente al día 11 de junio de 2020, ya que se considera *outlier* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-77 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	21	22	20	17	23	23	24	24	24	20
Max.	15	68	41	27	58	54	20	29	20	11	10
3rd Qu.	15	14	16	19	8	16	7	9	6	4	4
Mediana	15	6	9	7	5	7	3	2	5	3	2
Media	15	12	13	12	9	12	6	6	6	3	3
1st Qu.	15	2	3	5	4	2	2	1	2	2	1
Min.	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-78 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	22	23	17	19	22	21	23	24	24	20
Max.	18	66	36	34	25	50	12	29	17	8	14
3rd Qu.	17	10	15	19	8	16	8	9	8	4	4
Mediana	17	5	9	6	4	7	3	3	5	3	2
Media	17	10	12	11	7	12	5	7	6	3	3
1st Qu.	16	2	4	2	2	2	2	1	3	1	1
Min.	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

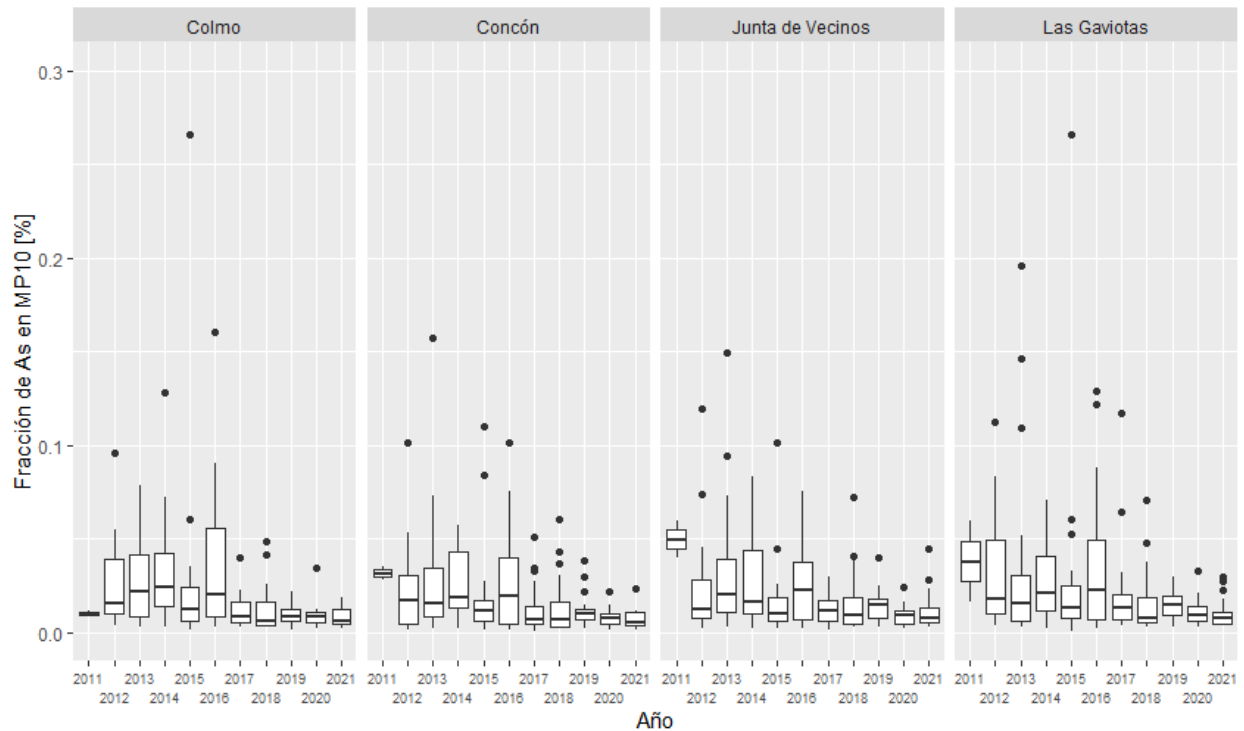
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-79 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	21	24	22	19	24	21	24	24	24	20
Max.	24	66	37	37	72	37	40	24	22	9	8
3rd Qu.	19	13	13	15	9	15	6	8	7	5	3
Mediana	15	8	7	6	5	7	4	2	4	4	3
Media	15	12	10	10	10	11	6	6	6	4	3
1st Qu.	10	3	2	4	3	2	2	1	3	1	1
Min.	6	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-37 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante los muestreos. El comportamiento de estos valores es similar al de los valores de concentraciones de As presentados en la Figura 2-36, sin distinciones claras. Los estadígrafos se presentan en las cuatro siguientes tablas, desde la Tabla 2-80 a la Tabla 2-83.



Nota: En estación Concón no se muestran los valores 30,098% y 10,081% correspondientes a los días 10 y 19 de mayo del 2021 respectivamente.

Figura 2-37 Fracción de As en MP10 [%], cercanías refinería ENAP, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-80 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	22	23	21	20	24	19	24	22	23	20
Max.	0,012	0,096	0,079	0,128	0,266	0,160	0,040	0,049	0,022	0,035	0,019
3rd Qu.	0,011	0,039	0,042	0,043	0,024	0,056	0,016	0,017	0,013	0,011	0,012
Mediana	0,010	0,016	0,022	0,024	0,012	0,020	0,009	0,006	0,009	0,009	0,006
Media	0,010	0,027	0,029	0,032	0,028	0,035	0,012	0,012	0,010	0,009	0,008
1st Qu.	0,009	0,010	0,009	0,014	0,006	0,009	0,006	0,004	0,006	0,006	0,005
Min.	0,008	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-81 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	21	22	20	17	23	23	24	22	24	20
Max.	0,035	0,102	0,157	0,057	0,110	0,101	0,051	0,060	0,039	0,022	30,098
3rd Qu.	0,034	0,031	0,034	0,043	0,018	0,040	0,014	0,016	0,013	0,010	0,011
Mediana	0,032	0,017	0,016	0,018	0,012	0,020	0,007	0,007	0,010	0,008	0,007
Media	0,032	0,023	0,030	0,027	0,022	0,026	0,013	0,013	0,012	0,008	2,016
1st Qu.	0,030	0,005	0,008	0,014	0,006	0,005	0,005	0,003	0,007	0,005	0,004
Min.	0,028	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-82 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	22	23	17	19	22	21	23	22	24	20
Max.	0,060	0,119	0,149	0,083	0,101	0,076	0,030	0,073	0,040	0,024	0,045
3rd Qu.	0,055	0,029	0,039	0,044	0,019	0,038	0,017	0,018	0,018	0,012	0,013
Mediana	0,050	0,012	0,021	0,016	0,010	0,022	0,012	0,010	0,015	0,009	0,008
Media	0,050	0,024	0,033	0,028	0,018	0,029	0,013	0,016	0,014	0,009	0,012
1st Qu.	0,045	0,008	0,011	0,010	0,006	0,007	0,006	0,004	0,007	0,005	0,005
Min.	0,040	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-83 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	21	24	22	19	24	21	24	22	24	20
Max.	0,060	0,112	0,196	0,071	0,266	0,129	0,117	0,071	0,030	0,033	0,030
3rd Qu.	0,049	0,049	0,031	0,041	0,025	0,050	0,020	0,019	0,019	0,014	0,011
Mediana	0,038	0,018	0,015	0,021	0,014	0,023	0,013	0,008	0,015	0,010	0,008
Media	0,038	0,031	0,034	0,029	0,031	0,035	0,020	0,016	0,015	0,011	0,010
1st Qu.	0,027	0,010	0,006	0,012	0,008	0,007	0,007	0,005	0,010	0,007	0,005
Min.	0,016	0,004	0,003	0,002	0,001	0,002	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-38 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Las Gaviotas, estación que presenta concentraciones de arsénico relativamente mayores. No se observa una estacionalidad clara en la concentración de As, ya que en el año 2019 se distinguen valores relativamente mayores en los meses de junio a noviembre, mientras que en el año 2020 no hay una tendencia clara, observándose mayores valores en los meses de abril y septiembre. Esto se puede deber a la baja cantidad de mediciones hechas en la estación.

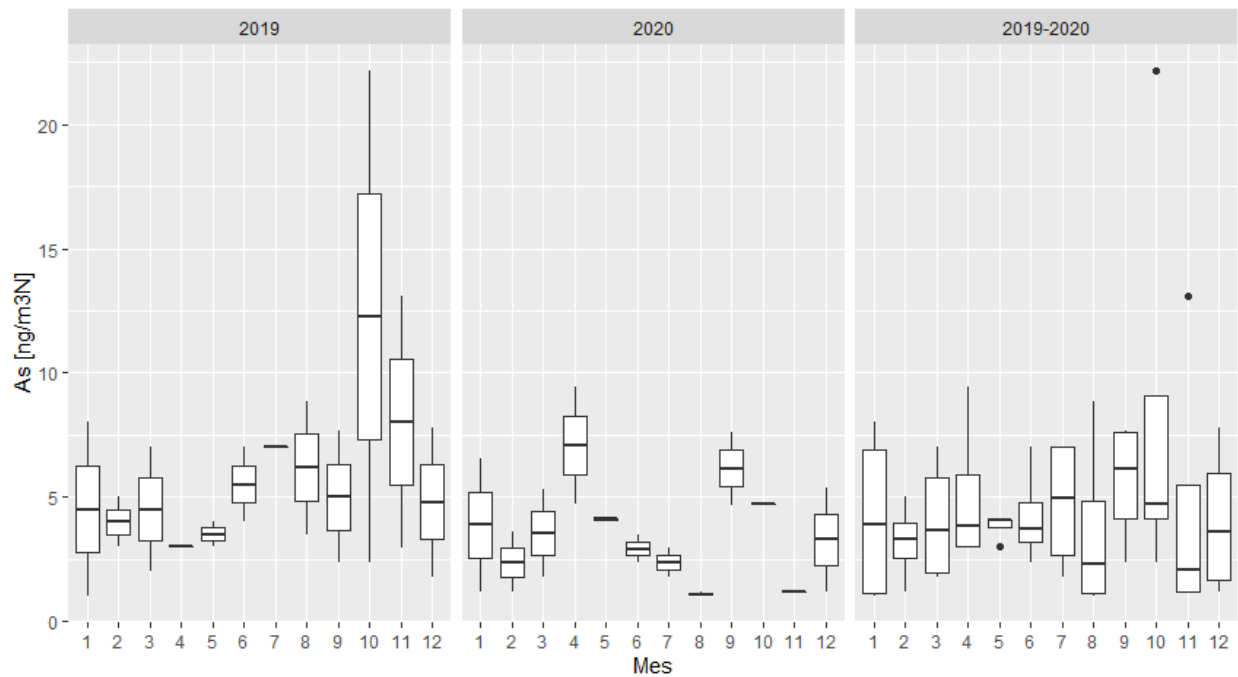


Figura 2-38 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m³N], cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.10 Estaciones cercanas a fundición Chagres

En la Figura 2-39 se muestra la ubicación de la fundición Chagres, donde se observa que su localidad más cercana es Catemu. Respecto de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, se observa que la estación más cercana es Catemu, que se encuentra 2,9 kilómetros al norte de la fundición. Le sigue en cercanía la estación Lo Campo a 5,4 kilómetros en dirección este.

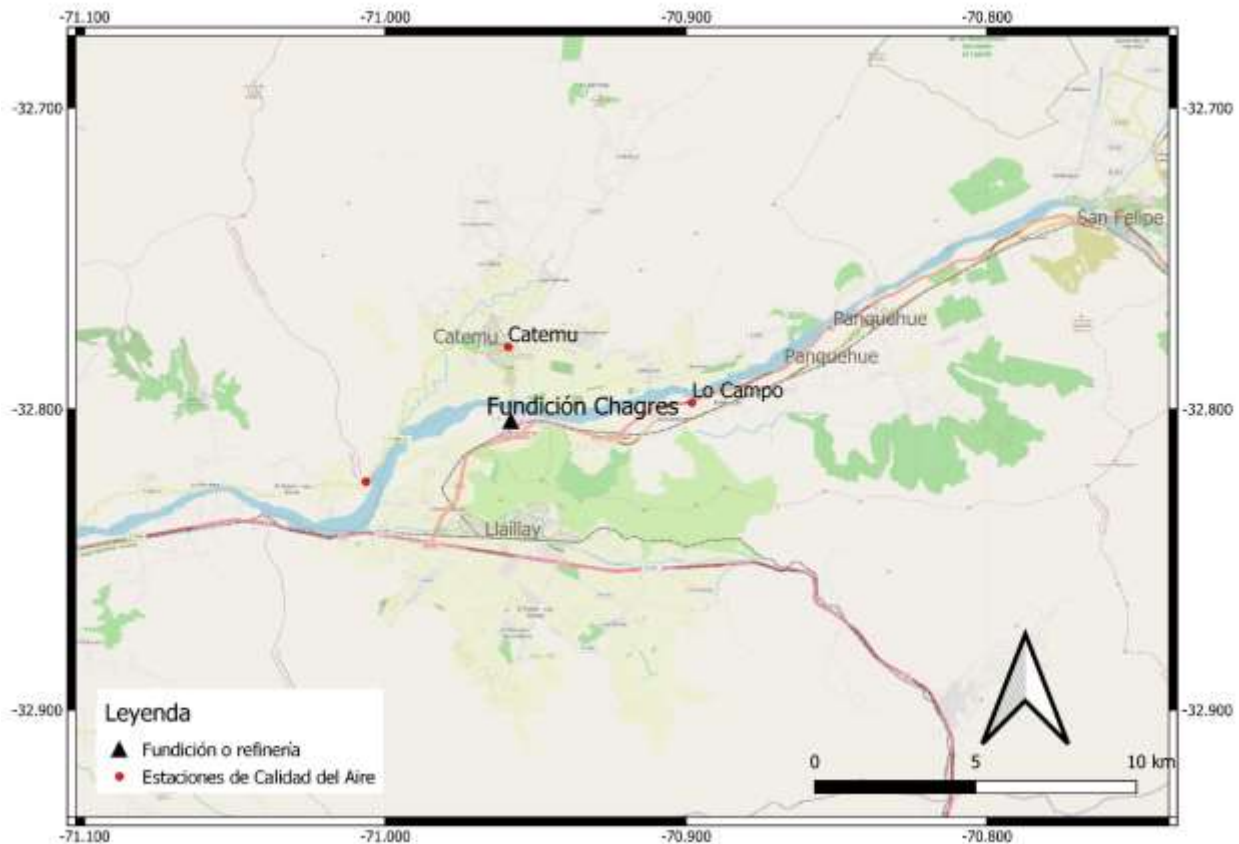


Figura 2-39 Mapa fundición Chagres, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-40 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones Catemu y Lo Campo, ubicadas en las cercanías de Chagres. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-84 y Tabla 2-85, respectivamente.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Chagres ya contaba con una planta de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir con los límites de emisión establecidos en la norma a partir de diciembre de 2016. A pesar de haber cumplido con los límites de emisión exigidos, se observa que en el año 2017 hubo un aumento en todos los estadígrafos de ambas estaciones de las concentraciones de arsénico, lo cual

coincide con que las emisiones reportadas de arsénico no disminuyeron en dicho año según lo que se describe en la Sección 3.3.6. Este aumento es temporal, puesto que al año 2018 ya se observa la recuperación a niveles similares a los observados en 2017, mientras que el 2019 y 2020 se observa una mejora importante en los estadígrafos de las concentraciones de arsénico. Esto se corresponde con una baja en la capacidad de producción de la fundición desde el año 2019 que se mantuvo hasta el año 2021.

Pese a lo anterior, se debe destacar que se cuenta con escasos datos de medición, ya que la caracterización química de las muestras del MP10 se realiza una vez al mes desde mediados del año 2018¹³, mientras que en los años previos se realizaba cada tres meses¹⁴.

Se observa que los valores de la estación Lo Campo en general son mayores, a pesar de estar a una mayor distancia de la fundición y a que el viento en la estación Catemu viene predominantemente desde el sur (ver Anexo de la Sección 10.3.6). Esto se podría explicar por una dirección del viento en la estación Lo Campo dominante desde el Oeste (ver Anexo de la Sección 10.3.6), además de la baja cantidad de mediciones disponibles en ambas estaciones (desde 4 a 13 por año), las cuales corresponden a medias mensuales.

¹³ Se realiza una caracterización química de un compósito mensual de las muestras de MP10 tomadas cada tres días

¹⁴ Se realiza una caracterización química de un compósito trimestral de las muestras de MP10 tomadas cada tres días

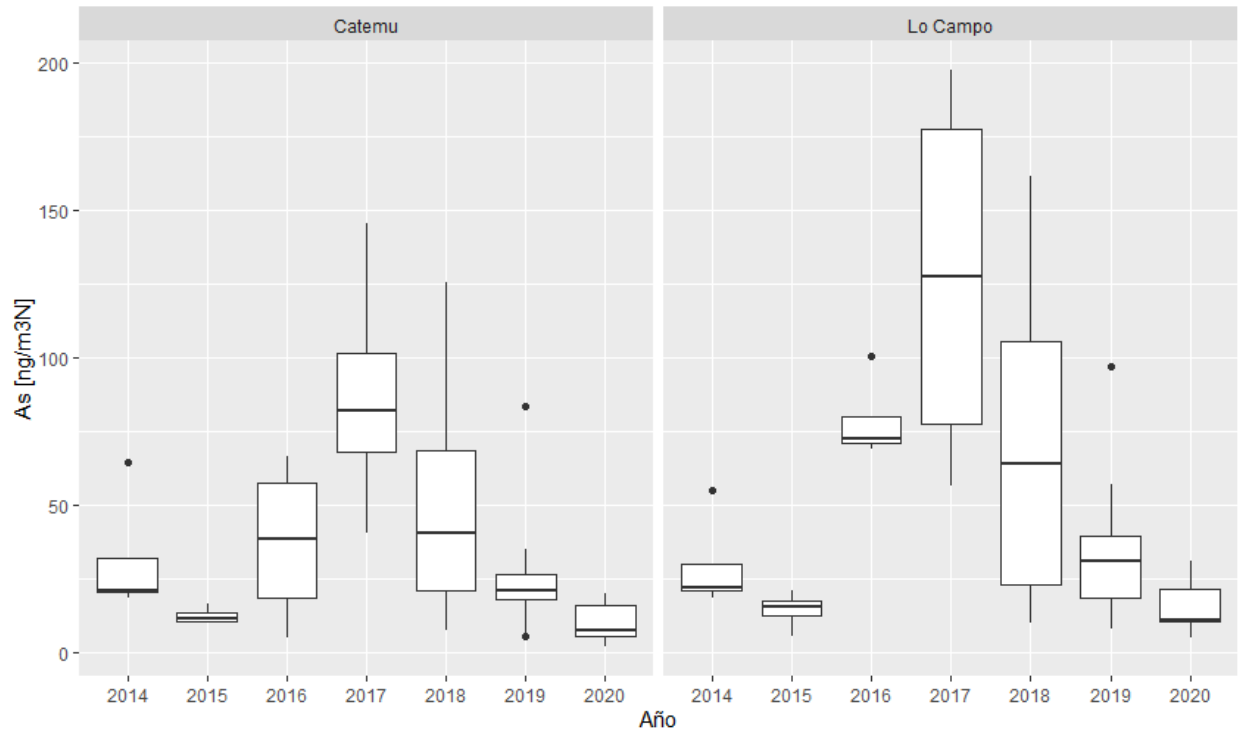


Figura 2-40 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chagres, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

En la estación Catemu (ver Tabla 2-84) se observa que entre los años 2014 y 2019 la mediana de las concentraciones de As se ha mantenido en el rango de 12 a 41 [ng/m³N], exceptuando el año 2017 donde se observa un aumento de todos los estadígrafos, con una mediana de 82 [ng/m³N]. El año 2020 se identifica una disminución de la mediana de un 83% respecto a la media de las medianas de los años anteriores. Es importante destacar que esto no se condice con la aplicación de la normativa, la cual comienza a regir para esta fundición a partir del año 2017. Cabe recordar que se cuenta con una baja cantidad de datos, que a su vez corresponden a medias trimestrales hasta 2017 y posteriormente mensuales, por lo que los estadígrafos analizados no muestran la variabilidad real que puede haberse observado diariamente.

Tabla 2-84 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	4	4	4	4	8	12	12	0
Max.	65	17	67	146	125	84	20	S/I
3rd Qu.	32	14	58	102	69	27	16	S/I
Mediana	21	12	39	82	41	21	8	S/I
Media	32	13	37	88	51	26	10	S/I
1st Qu.	21	11	18	68	21	18	6	S/I
Min.	19	11	5	41	8	6	2	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Lo Campo (ver Tabla 2-85) se observa que la concentración mediana de As tiende a aumentar entre los años 2016 y 2018, donde alcanza valores entre 64 y 128 [ng/m³N] — aumento que también se observa en Catemu en los mismos años—, mientras que los demás años se mantiene entre 11 y 31 [ng/m³N]. En cuanto a las concentraciones máximas, estas aumentan entre los años 2016 a 2019 – lo mismo sucede en Catemu en los mismos años –, alcanzando valores entre 97 y 198 [ng/m³N], mientras que en los demás años se mantienen entre 21 y 55 [ng/m³N].

Tabla 2-85 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	4	4	4	4	8	12	11	0
Max.	55	21	101	198	162	97	31	S/I
3rd Qu.	30	18	80	178	105	40	22	S/I
Mediana	22	16	73	128	64	31	11	S/I
Media	29	15	79	127	70	35	16	S/I
1st Qu.	21	13	71	77	23	19	11	S/I
Min.	19	6	69	57	10	8	5	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-41 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas a partir del muestreo. Es importante mencionar que, en este caso, debido a que las mediciones de As se realizan trimestralmente hasta 2017 y de manera mensual posterior a esa fecha, a partir de la caracterización química del total de MP10 recolectado en filtros que se implementan en ciertos días, se calculó la fracción de As a partir del valor mensual dividido por el promedio de las mediciones diarias de filtros de MP10. Se observa una distribución muy similar a la presentada en la Figura 2-40. Sólo para el año 2018 y 2019, destaca la concentración de As medida por la estación Lo Campo respecto a la de Catemu, con una mediana aproximadamente 2.5 veces mayor para ambos años.

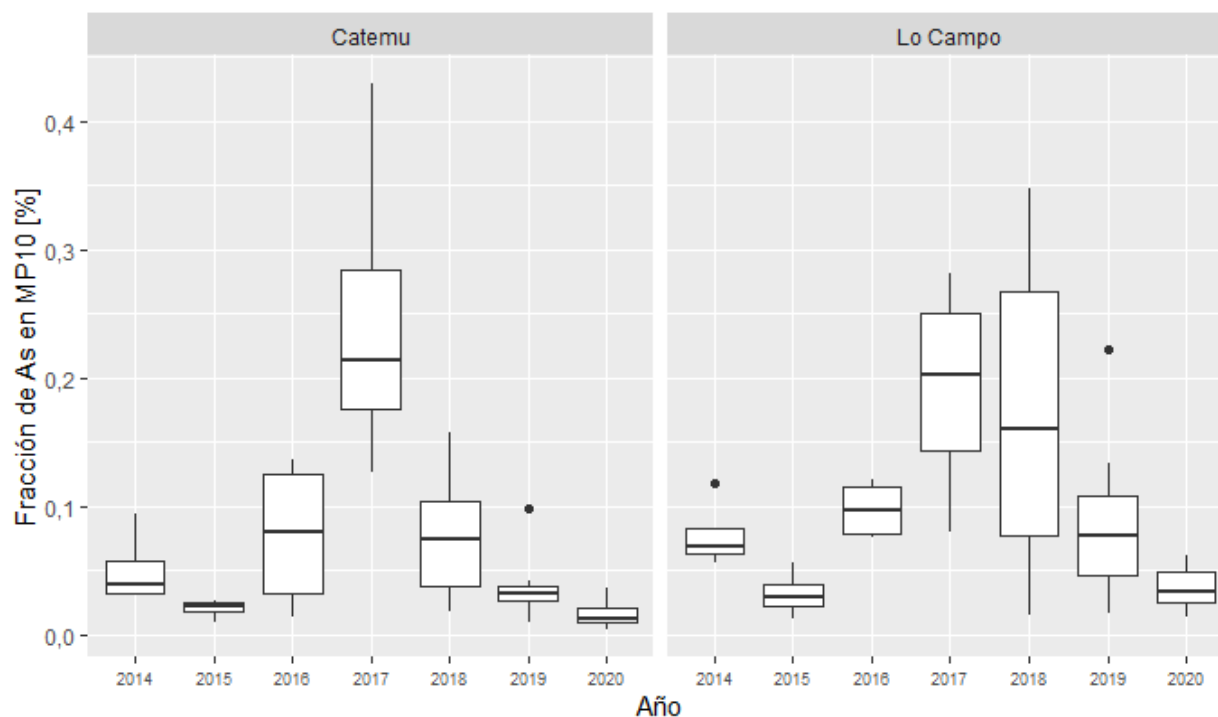


Figura 2-41 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Chagres, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-86 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	4	4	4	4	8	12	12	0
Max.	0,094	0,026	0,135	0,430	0,157	0,098	0,035	S/I
3rd Qu.	0,057	0,025	0,125	0,284	0,104	0,038	0,021	S/I
Mediana	0,039	0,022	0,080	0,214	0,074	0,031	0,012	S/I
Media	0,051	0,020	0,077	0,246	0,077	0,034	0,016	S/I
1st Qu.	0,032	0,017	0,032	0,175	0,038	0,026	0,010	S/I
Min.	0,031	0,009	0,014	0,126	0,018	0,009	0,004	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-87 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	4	4	4	4	8	12	11	0
Max.	0,118	0,056	0,121	0,281	0,348	0,222	0,062	S/I
3rd Qu.	0,083	0,039	0,115	0,250	0,267	0,107	0,049	S/I
Mediana	0,069	0,029	0,096	0,202	0,160	0,077	0,033	S/I
Media	0,078	0,032	0,097	0,191	0,173	0,084	0,037	S/I
1st Qu.	0,063	0,021	0,078	0,143	0,077	0,045	0,025	S/I
Min.	0,055	0,012	0,076	0,079	0,015	0,016	0,013	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de esta fundición, dado que las mediciones son mensuales o trimestrales, hay muy pocos datos y por lo tanto no se presenta un análisis de su estacionalidad.

2.3.2.11 Estaciones cercanas a fundición Caletones

En la Figura 2-42 se muestra la ubicación de la fundición Caletones, donde se observa que su localidad más cercana es Coya. Respecto de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, se observa que la estación más cercana es Sewell, que se encuentra 6,8 kilómetros al noreste de la fundición. Le sigue en cercanía Coya Población y Coya Club a 13,1 y 13,6 kilómetros en dirección suroeste, respectivamente.

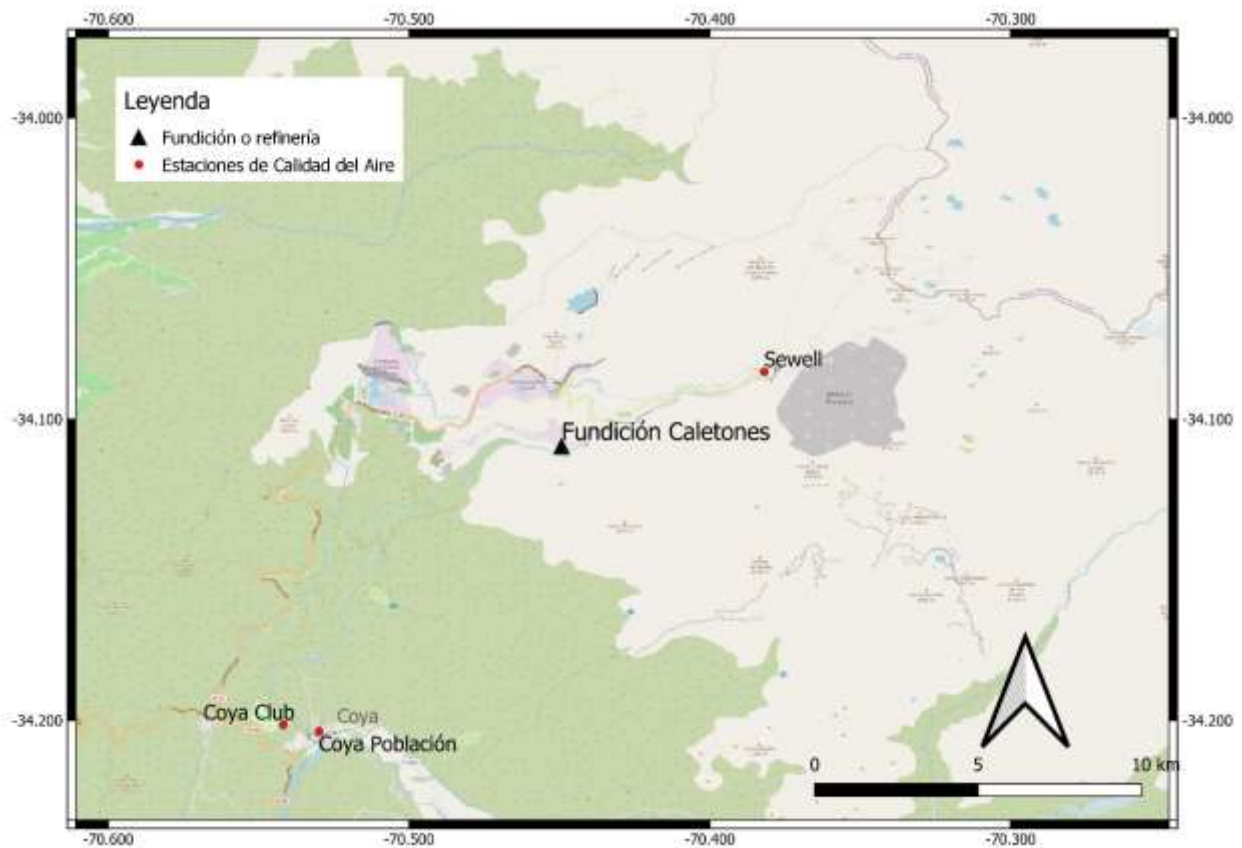


Figura 2-42 Mapa fundición Caletones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-43 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones Coya Club, Coya Población y Sewell, ubicadas en las cercanías de Caletones. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-88, Tabla 2-89 y Tabla 2-90, respectivamente.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Caletones no contaba con plantas de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir las exigencias de emisiones de la norma a partir de diciembre de 2018. Su bien desde el 2015 se observa una mejora en las concentraciones de arsénico, es posible observar como las concentraciones disminuyen de forma aún más intensa a partir del año 2019 – año en que se debía comenzar a cumplir la norma – en todas las estaciones.

De las tres estaciones, se observa que las concentraciones de As de la estación Sewell superan a las concentraciones de las otras estaciones. Las altas concentraciones de la estación Sewell se condicen con la cercanía a la fundición (ver Figura 2-42) y con que alrededor de un 30% del tiempo el viento proviene del suroeste (ver Anexo de la Sección 10.3.7). Por otra parte, los valores registrados de la estación Coya Club son levemente mayores a los de Coya Población, sobre todo para el año 2015. La diferencia entre las estaciones Coya Club y Coya Población se podría explicar por las diferencias en vientos, a pesar de la cercanía geográfica. Coya Club presenta más horas con viento desde el Norte (donde se encuentra la fundición) lo que explicaría valores levemente mayores (ver Anexo de la Sección 10.3.7). Cabe destacar que las concentraciones reportadas para el año 2015 corresponden a medias mensuales, a diferencia del resto de las mediciones que corresponden a concentraciones diarias.

Por último, se observa un comportamiento de las concentraciones similar al de las emisiones de arsénico de la fundición (ver Figura 3-56 de la Sección 3.3.5), distinguiéndose una disminución constante a partir del año 2015 en general en los estadígrafos, los que vuelven a aumentar a partir del año 2020. Esto último se puede deber a que la fundición tendió a aumentar su producción hacia el régimen normal luego de la aplicación de las medidas para dar cumplimiento a la norma.

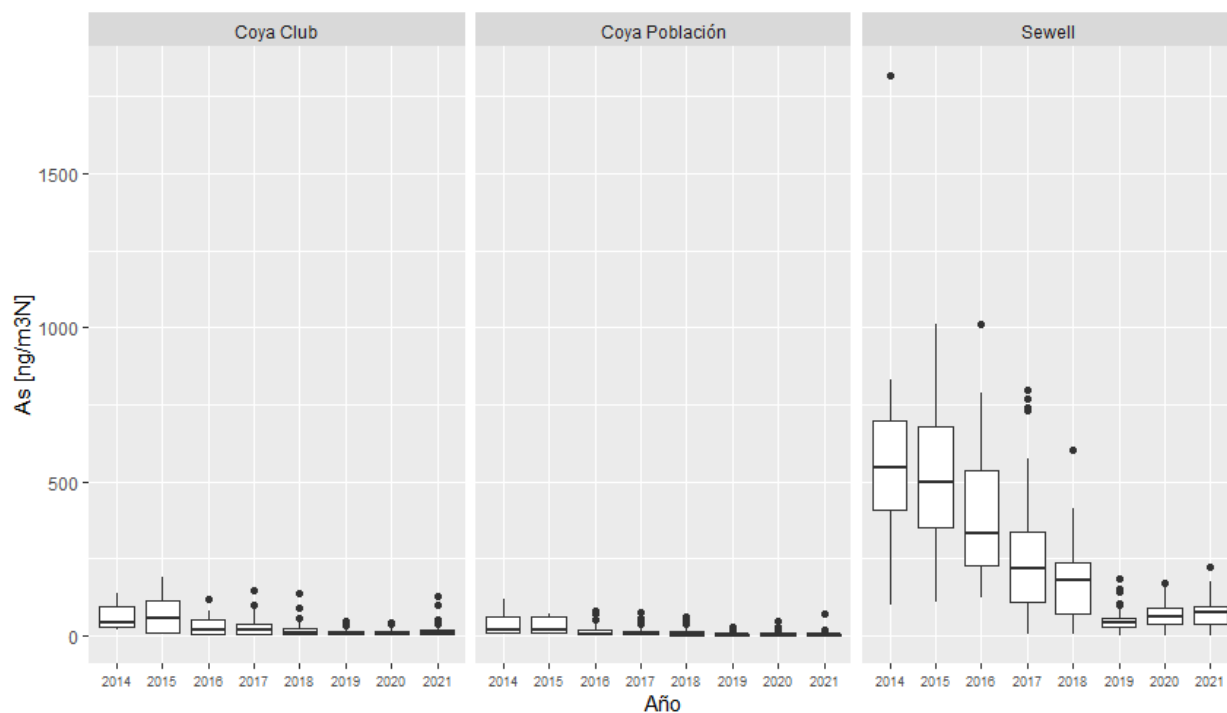


Figura 2-43 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coya Club (ver Tabla 2-88) se observa que la concentración mediana del año 2015 supera en promedio 3 veces la concentración mediana de los años 2016 al 2018. Sin embargo, las muestras para el año 2015 corresponden a solo doce valores, por lo que esta comparación no es concluyente. Entre los años 2016 a 2018 la mediana de las concentraciones de As se mantiene en un rango entre 12 y 21 [ng/m³N], y en los años 2019 y 2020 se observa una disminución, manteniéndose en el rango de 5 a 6 [ng/m³N]. Sin embargo, se observa un aumento el año 2021 a 10 [ng/m³N].

Tabla 2-88 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	12	12	27	48	46	47	47	46
Max.	140	190	120	146	139	46	42	127
3rd Qu.	95	113	50	39	24	13	15	19
Mediana	45	55	21	18	12	6	5	10
Media	63	72	32	29	20	10	10	18
1st Qu.	30	10	7	5	3	3	3	5
Min.	20	10	2	1	1	1	1	1

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coya Población (ver Tabla 2-89) se observa que la concentración mediana se ha mantenido relativamente estable durante todo el periodo entre 3 y 20 [ng/m³N]. Respecto a los valores máximos, se observa que se mantienen estables durante todo el periodo entre 28 y 120 [ng/m³N].

Tabla 2-89 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	12	12	57	111	107	105	108	110
Max.	120	70	80	77	62	28	46	72
3rd Qu.	60	63	20	17	15	7	9	7
Mediana	20	20	7	6	5	3	3	4
Media	38	34	14	12	10	5	6	5
1st Qu.	10	10	3	3	2	1	2	2
Min.	10	10	1	1	1	1	1	1

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 13 de julio y 8 de agosto de 2017 correspondientes a 1 [ng/m³N], ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sewell (ver Tabla 2-90) se observa que la mediana de las concentraciones entre los años 2016 y 2018 disminuye de 333 a 179 [ng/m³N], y luego presenta una mayor disminución, alcanzando una mediana promedio entre los años 2019 y 2020 de 53 [ng/m³N]. Esto se observa claramente en el gráfico de la Figura 2-43. Esta disminución a partir del año 2019 podría tener relación con que la fecha de inicio de cumplimiento de la norma es a partir de dicho año. Sin embargo, se observa un leve aumento de los estadígrafos en el año 2021.

Tabla 2-90 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell

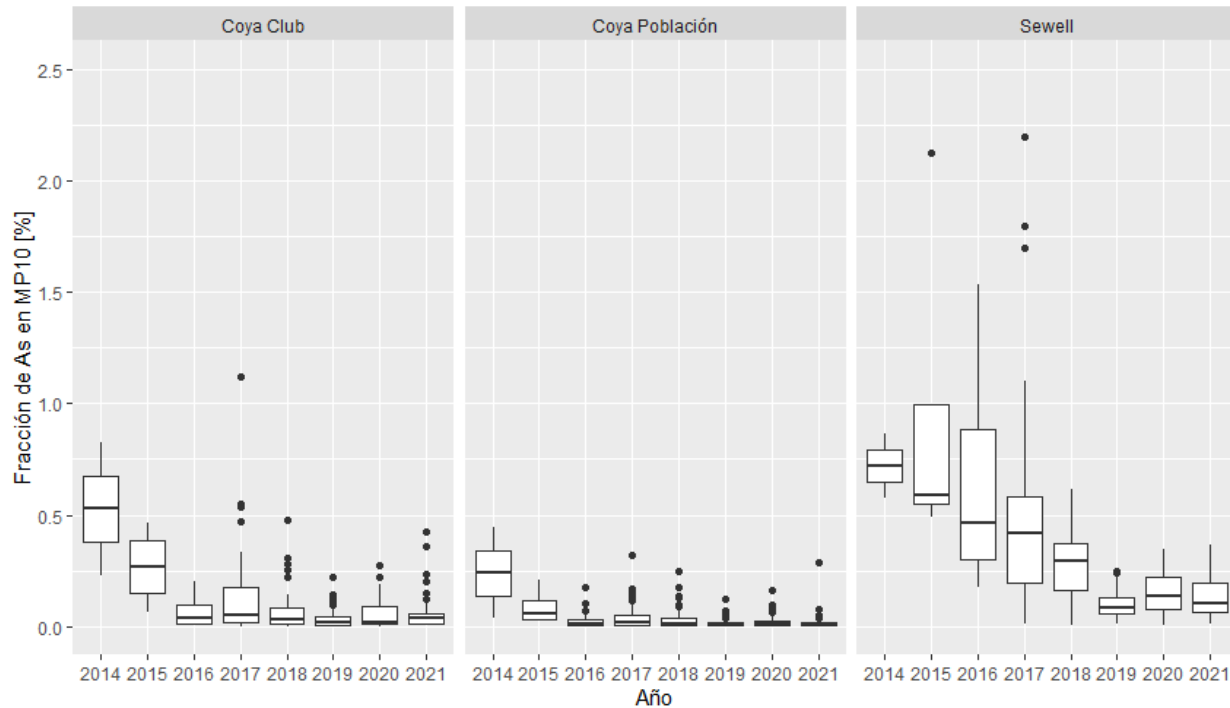
Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	12	12	24	50	48	45	48	46
Max.	1.820	1.010	1.013	797	601	185	171	221
3rd Qu.	698	680	535	338	237	56	89	96
Mediana	545	500	333	218	179	41	64	76
Media	614	524	388	261	172	51	67	74
1st Qu.	410	353	226	109	71	29	38	36
Min.	100	110	123	3	5	2	1	2

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-44 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. Se observa que en las estaciones Coya Club y Coya Población la fracción de As en MP10 es relativamente constante, sin presentarse grandes variaciones interanuales posteriores al 2016. Por su parte, en la estación Sewell se observa una tendencia a la disminución entre los años 2016 y 2019. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-91, Tabla 2-92 y Tabla 2-

93, observándose que para el año 2021 la mediana de la fracción para la estación Coya Club fue de 0,04%, mientras que para la estación Coya Población fue de 0,01% y para estación Sewell de 0,11%. Nuevamente, la mayor concentración de As como fracción en el MP10 en las mediciones de la estación Sewell se condicen con su mayor cercanía a la fundición.



Nota 1: En estación Sewell no se muestra valor 21,333%, reportado con fecha del 1 de octubre de 2015, ni el valor 3,729%, reportado con fecha del 20 de abril de 2017.

Figura 2-44 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Caletones, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-91 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	4	22	48	44	46	47	46
Max.	0,824	0,462	0,205	1,123	0,479	0,219	0,275	0,423
3rd Qu.	0,675	0,384	0,099	0,179	0,087	0,043	0,089	0,060
Mediana	0,527	0,267	0,037	0,054	0,033	0,019	0,022	0,042
Media	0,527	0,265	0,065	0,137	0,071	0,038	0,057	0,064
1st Qu.	0,379	0,148	0,016	0,016	0,010	0,009	0,011	0,016
Min.	0,231	0,063	0,007	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-92 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	4	52	111	103	104	108	110
Max.	0,444	0,212	0,176	0,321	0,248	0,122	0,164	0,288
3rd Qu.	0,342	0,114	0,032	0,050	0,038	0,019	0,028	0,019
Mediana	0,240	0,057	0,012	0,017	0,015	0,010	0,009	0,010
Media	0,240	0,089	0,024	0,035	0,032	0,016	0,020	0,016
1st Qu.	0,138	0,032	0,007	0,007	0,006	0,004	0,006	0,005
Min.	0,036	0,031	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-93 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	2	5	22	48	47	45	48	46
Max.	0,867	21,333	1,535	3,729	0,614	0,247	0,345	0,368
3rd Qu.	0,794	2,125	0,884	0,609	0,372	0,126	0,220	0,195
Mediana	0,721	0,615	0,462	0,424	0,293	0,086	0,138	0,106
Media	0,721	5,026	0,616	0,565	0,277	0,103	0,146	0,129
1st Qu.	0,648	0,568	0,298	0,199	0,162	0,057	0,076	0,066
Min.	0,576	0,488	0,178	0,014	0,008	0,012	0,004	0,015

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-45 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Sewell, estación más cercana a la fundición. Al contrario de lo que sucede en las estaciones cercanas a las demás fundiciones, las concentraciones tienden a disminuir en invierno, específicamente entre los meses de mayo y septiembre. Esto se explica por las mayores precipitaciones en invierno al encontrarse en una zona precordillerana y más lluviosa.

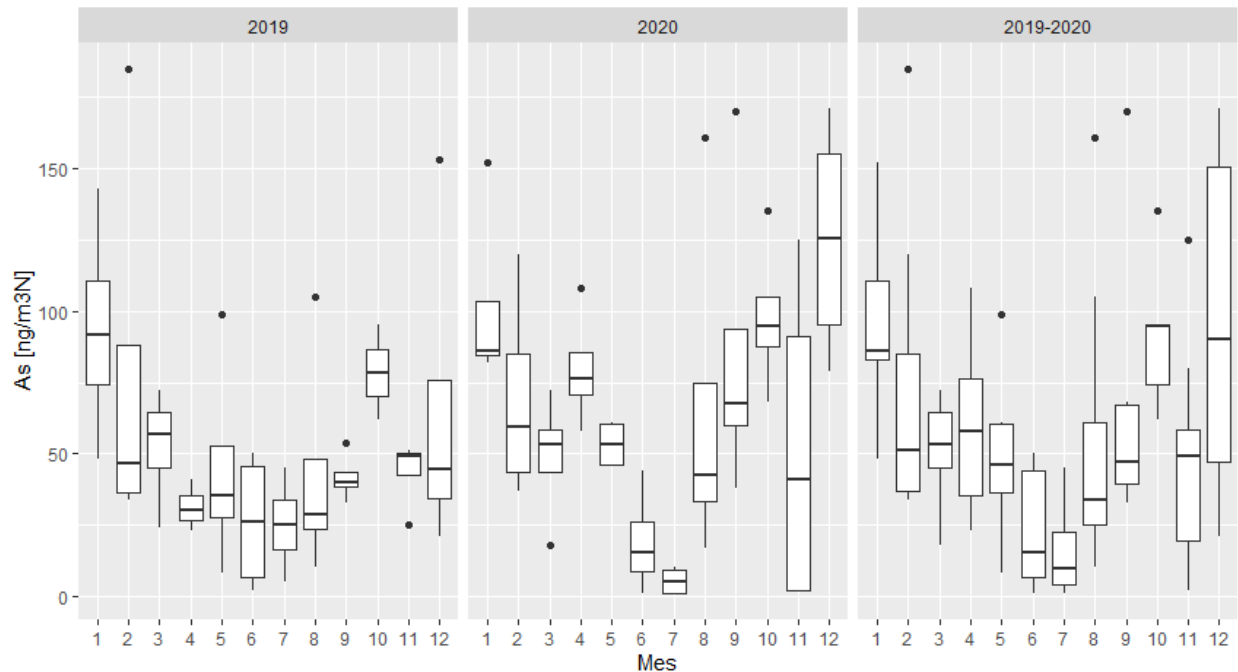


Figura 2-45 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m³N], cercanías fundición Caletones, estación Sewell

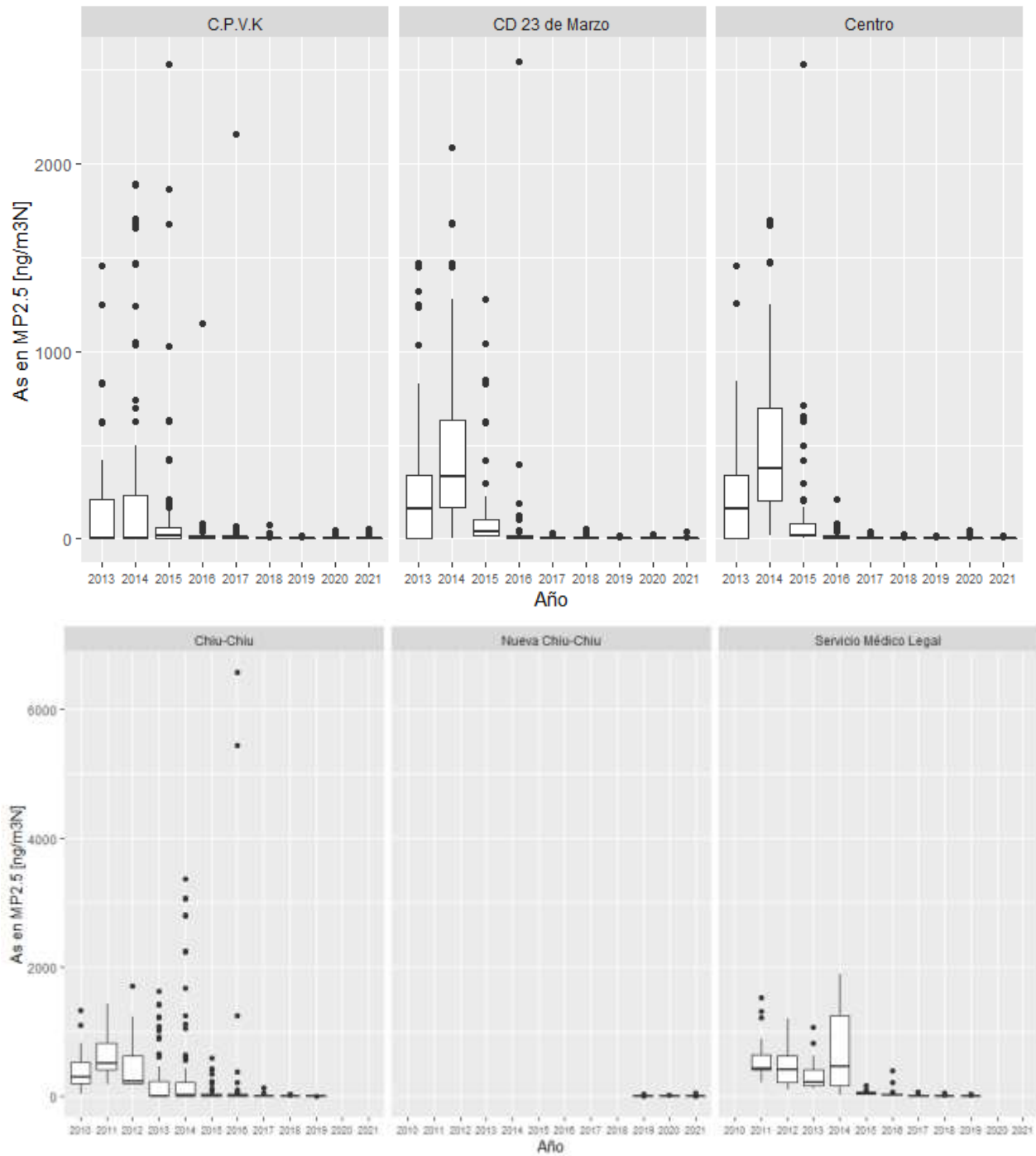
Fuente: Elaboración propia

2.3.3 Análisis longitudinal de As en MP2,5 por estaciones

A continuación, se describe la evolución en el tiempo de las concentraciones de arsénico medidas en MP2,5, con detalles por estación, para las estaciones en que se contaba con este antecedente. Cabe recordar que, entre las fundiciones, solo fue posible presentar el análisis de As en MP2,5 para las estaciones cercanas a la fundición Chuquicamata (ver Sección 2.3.3.1) y a la fundición Ventanas (ver Sección 2.3.3.3).

2.3.3.1 Estaciones cercanas a fundición Chuquicamata

Las estaciones cercanas a la fundición de Chuquicamata cuentan con mediciones de MP2,5 y caracterización química de este, lo que permite hacer también un análisis de las concentraciones de arsénico en material particulado fino. En la Figura 2-46 y Figura 2-47 se presenta la evolución temporal de la concentración de As en MP2,5 medida en las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo, Centro, Chiu-Chiu, Nueva Chiu-Chiu, Servicio Médico Legal y Hospital El Cobre. La estación Aukahuasi no cuenta con mediciones de MP2,5. Los estadígrafos de las concentraciones se presentan en la Tabla 2-94, Tabla 2-95, Tabla 2-96, Tabla 2-97, Tabla 2-99, y Tabla 2-100 respectivamente.



Nota 1: Las gráficas del primer conjunto de estaciones (C.P.V.K, CD 23 de Marzo, y Centro) tienen escalas de concentración diferente al segundo conjunto (Nueva Chiu-Chiu, y Servicio Médico Legal).

Nota 2: En estación C.P.V.K no se muestra valor 5.032 ng/m³N, reportado con fecha del 11 de abril 2014.

Figura 2-46 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, excepto Hospital El Cobre

Fuente: Elaboración propia

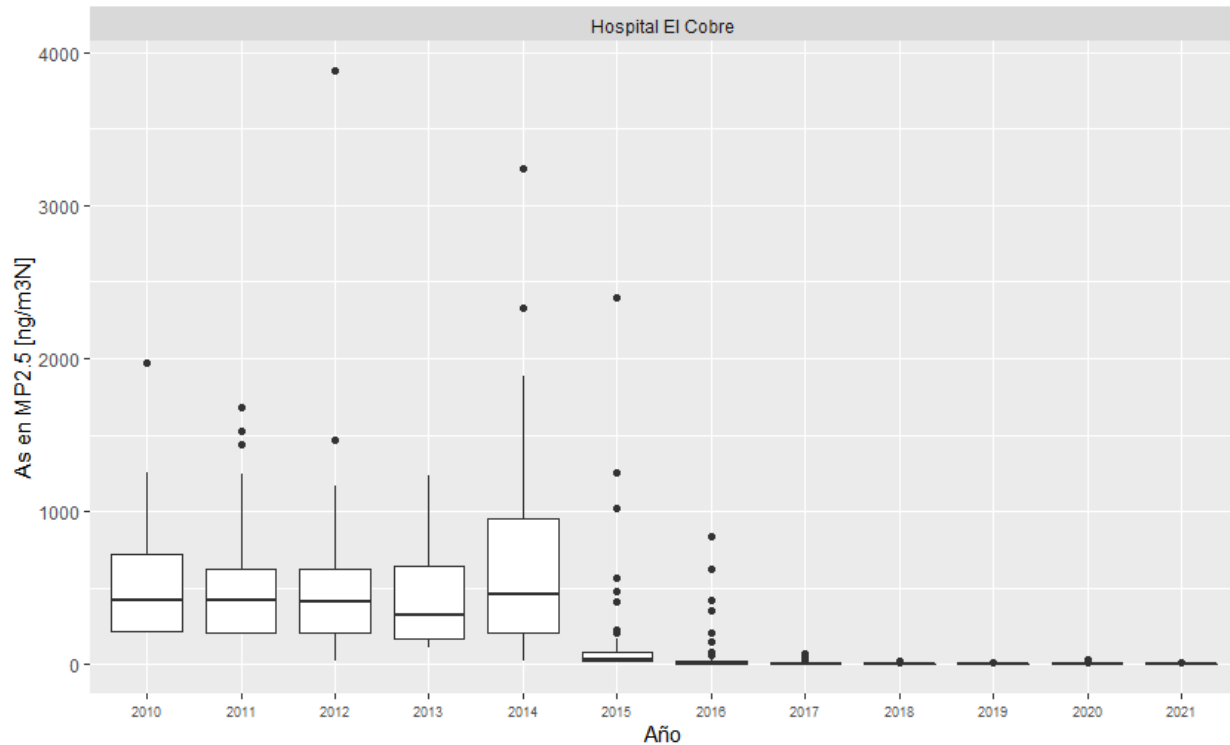


Figura 2-47 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre

Fuente: Elaboración propia

A diferencia del caso de concentración de arsénico en MP10 presentado en la Figura 2-7 y en la Figura 2-8, se observan mayores concentraciones de As en la estación CD 23 de Marzo durante los años 2013 a 2015. Debido a los mayores valores de dichos años en comparación con el resto, la escala del gráfico no permite hacer una comparación a simple vista de los valores de los años 2016 a 2021, por lo que se presenta también la Figura 2-48, donde se observan únicamente dichos años.

De esta forma, es posible observar que, a pesar de que para el año 2016 las concentraciones máximas de la estación CD 23 de Marzo son mayores respecto a las de las demás estaciones, las concentraciones tienden a ser muy similares entre las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo y Centro. Al igual que en el caso del MP10, las concentraciones en las estaciones Nueva Chiu-Chiu y Servicio Médico Legal se encuentran en una escala menor.

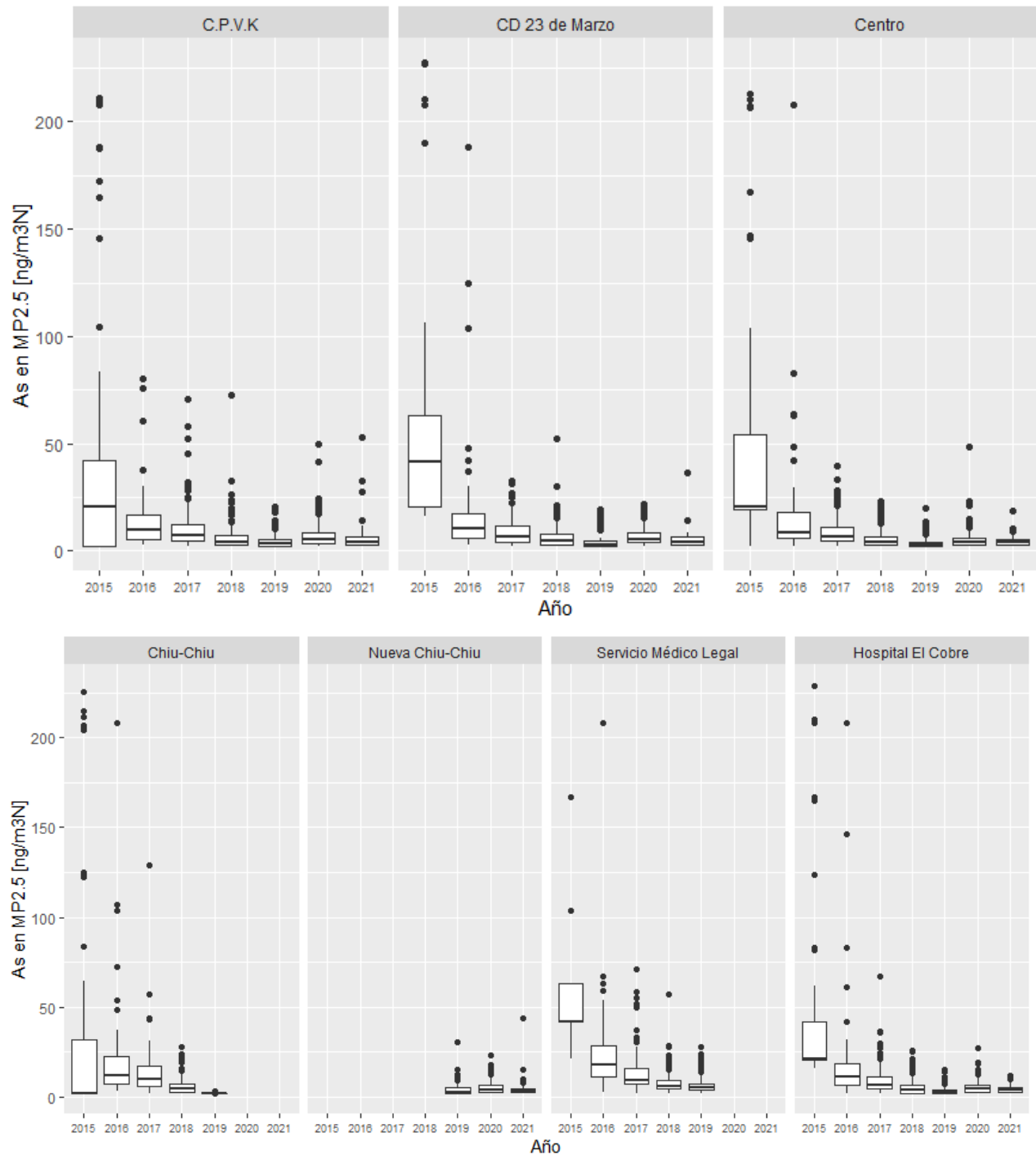


Figura 2-48 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, años 2015 a 2021, valores inferiores a 250 ng/m3N

Fuente: Elaboración propia

A partir de los estadígrafos se puede observar que las concentraciones de As van disminuyendo a través del tiempo en todas las estaciones, especialmente a partir del año 2015 en las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo, Centro y Hospital El Cobre y del año 2014 en las estaciones Chiu-Chiu y

Servicio Médico Legal. Para el año 2020, la mediana de las concentraciones de las distintas estaciones se mantiene entre 4 y 6 [ng/m³N].

Tabla 2-94 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	100	106	107	74	104	115	104	114	36
Max.	1.459	5.032	2.531	1.146	2.159	73	21	50	53
3rd Qu.	208	308	62	17	13	7	5	9	7
Mediana	2	2	21	10	7	4	3	6	4
Media	155	355	127	29	32	7	5	8	7
1st Qu.	2	2	2	5	5	3	2	3	3
Min.	2	2	2	3	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-95 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	70	41	66	85	108	118	117	119	35
Max.	1.469	2.086	1.277	2.542	33	52	19	22	37
3rd Qu.	340	630	106	18	11	8	5	8	7
Mediana	160	335	42	11	7	5	3	5	4
Media	258	531	166	51	9	7	4	7	6
1st Qu.	2	167	21	6	4	3	2	4	3
Min.	2	2	16	3	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-96 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	59	42	91	86	112	113	117	118	36
Max.	1.458	1.702	2.526	208	39	23	20	48	19
3rd Qu.	341	696	83	18	11	7	4	6	5
Mediana	160	375	21	9	7	4	2	4	4
Media	239	561	122	20	9	6	4	6	4
1st Qu.	2	207	20	6	4	3	2	2	3
Min.	2	21	2	2	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-97 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
N	32	66	43	113	113	114	88	114	117	19
Max.	1.331	1.424	1.703	1.627	3.371	587	6.563	129	28	3
3rd Qu.	530	825	625	227	210	34	25	17	7	2
Mediana	298	514	227	2	22	2	12	10	5	2
Media	395	615	448	259	335	46	176	13	6	2
1st Qu.	204	406	205	2	2	2	8	6	3	2
Min.	32	184	203	2	2	2	3	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-98 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu

Año	2019	2020	2021
N	87	120	36
Max.	31	23	44
3rd Qu.	5	7	5
Mediana	3	4	3
Median	4	5	5
1st Qu.	2	2	3
Min.	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-99 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [$\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	51	69	33	45	10	91	122	122	116	0	0
Max.	S/I	1.533	1.203	1.068	1.885	167	396	71	57	28	S/I	S/I
3rd Qu.	S/I	635	625	416	1255	63	30	16	9	7	S/I	S/I
Mediana	S/I	421	417	210	466	42	18	10	6	5	S/I	S/I
Median	S/I	526	467	339	683	61	33	14	9	6	S/I	S/I
1st Qu.	S/I	412	211	169	167	42	11	7	5	4	S/I	S/I
Min.	S/I	208	104	110	20	21	3	2	2	2	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-100 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	38	62	63	35	50	62	95	114	115	116	120	37
Max.	1.969	1.677	3.877	1.238	3.244	2.396	833	67	26	15	27	12
3rd Qu.	717	623	619	646	957	82	21	11	7	4	7	5
Mediana	417	418	412	317	456	34	11	7	4	2	5	4
Median	539	494	493	421	682	146	55	10	6	4	6	5
1st Qu.	211	209	209	171	208	20	7	5	2	2	3	2
Min.	204	205	21	110	20	16	2	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.2 Estaciones cercanas a termoeléctricas Andina y Mejillones

En la Figura 2-49 se presenta la evolución de la concentración de As medida en las estaciones ubicadas en las cercanías de las termoeléctricas Andina y Mejillones (ver Figura 2-15), sus estadígrafos resumidos en las siguientes dos tablas.

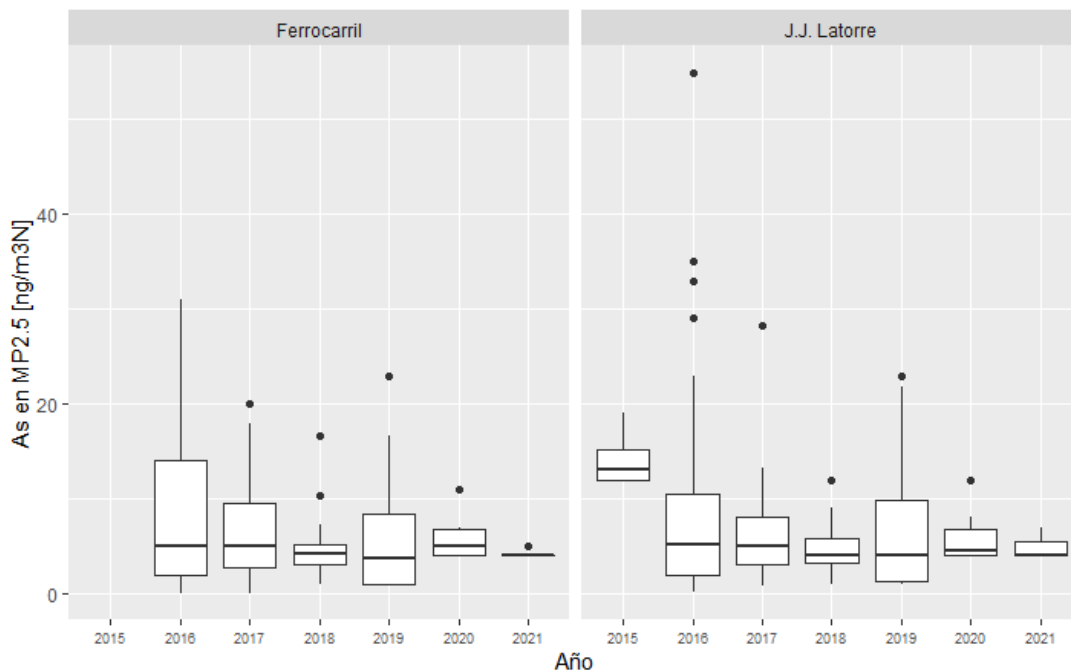


Figura 2-49 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones

Fuente: Elaboración propia

Para la estación Ferrocarril (ver Tabla 2-101) se observan las concentraciones medianas de As en el rango entre 4 y 5 [ng/m³N], con máximas entre 11 y 31 [ng/m³N] hasta 2020.

Tabla 2-101 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	57	40	35	34	11	5
Max.	S/I	31	20	17	23	11	5
3rd Qu.	S/I	14	10	5	8	7	4
Mediana	S/I	5	5	4	4	5	4
Media	S/I	9	7	5	6	6	4
1st Qu.	S/I	2	3	3	1	4	4
Min.	S/I	0	0	1	1	4	4

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación J.J. Latorre (Tabla 2-102), al igual que en la estación Ferrocarril, las concentraciones medianas de As se mantienen en el rango de 4 y 5 [ng/m³N], sin considerar los años 2015 y 2021 debido a que solo cuentan con cuatro y 3 mediciones respectivamente. Mientras que los valores máximos medidos se encuentran en el orden de 12 a 28 [ng/m³N], exceptuando el año 2016 en que se observa una medición de 55 [ng/m³N].

Tabla 2-102 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	4	46	33	26	26	10	3
Max.	19	55	28	12	23	12	7
3rd Qu.	15	11	8	6	10	7	6
Mediana	13	5	5	4	4	5	4
Media	14	10	6	5	6	6	5
1st Qu.	12	2	3	3	1	4	4
Min.	12	0	1	1	1	4	4

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.3 Estaciones cercanas a fundición Ventanas

En la Figura 2-50 se presentan las mediciones de As en MP2,5 en las estaciones cercanas a la fundición Ventanas (su ubicación disponible en la Figura 2-31 y Figura 2-35), incluida la estación Concón de ENAP. Los estadígrafos asociados se presentan en la Tabla 2-103.

Se observa que los valores de concentración presentan medianas entre 1 y 54 [ng/m³N]. En la estación Quintero es donde se observan las mayores concentraciones, seguido por Quintero Centro y La Greda, mientras que el valor observado en Concón es significativamente menor, lo que es coherente con su mayor lejanía y vientos predominantes desde el Sur. Los altos valores de Quintero en comparación a las otras dos estaciones cercanas no es del todo esperable si se considera que recibe vientos principalmente desde el Sur (ver Anexo de la Sección 10.3.5), sin embargo, esto se explica por ciertas condiciones meteorológicas de la zona que producen que las emisiones de la fundición se dirijan a estas estaciones. En 2017 se alcanzan los mayores

valores de máximas, exceptuando la Greda en que se observa en 2018 y Quintero Centro, estación que registra una menor cantidad de datos.

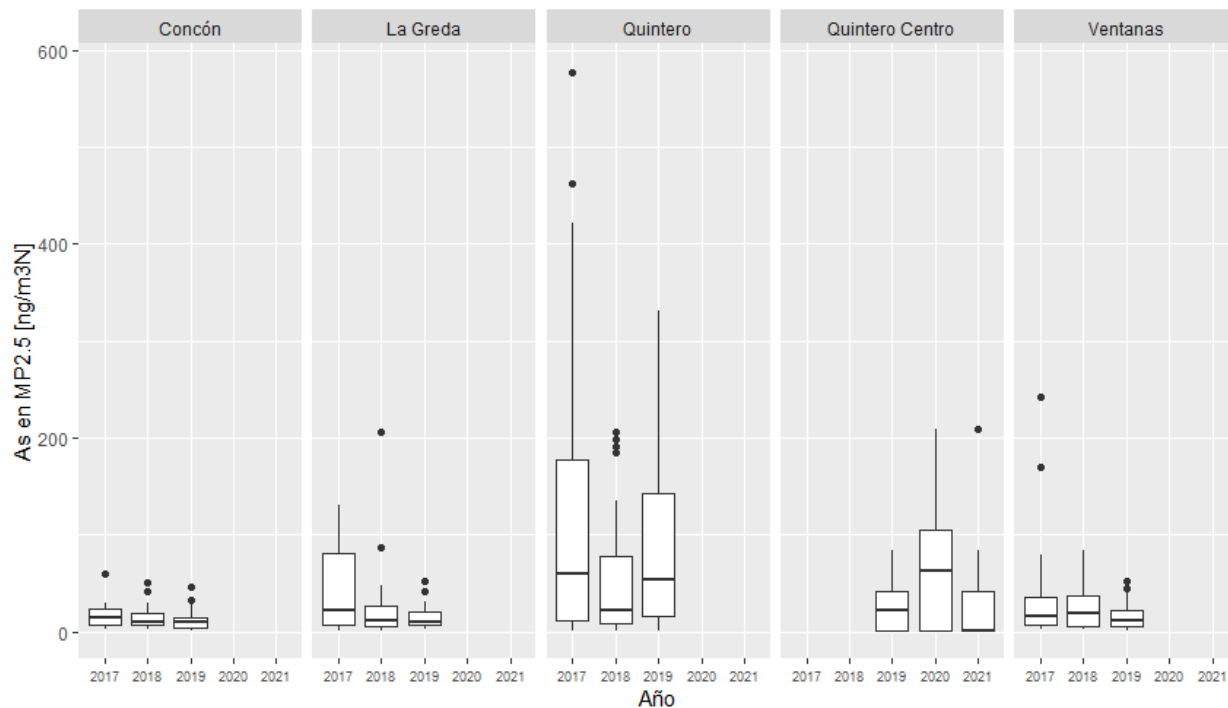


Figura 2-50 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en la región de Valparaíso

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-103 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en la región de Valparaíso

Estación	Concón			La Greda			Quintero			Quintero Centro			Ventanas		
Año	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2019	2020	2021	2017	2018	2019
N	23	28	21	25	28	26	30	29	29	12	12	7	24	26	27
Max.	60	50	47	130	205	52	577	206	331	83	208	208	242	83	52
3rd Qu.	23	18	15	81	26	20	178	78	143	42	104	42	36	37	21
Mediana	15	9	10	22	12	10	60	22	54	21	62	1	16	19	11
Media	16	14	13	41	24	15	121	56	87	25	71	42	37	23	16
1st Qu.	6	6	4	7	5	7	12	8	16	1	1	1	7	6	6
Min.	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.4 Estaciones de la ciudad de Santiago

En la Figura 2-51 se presentan las mediciones de As en MP2,5 en la estación Parque O’Higgins de la región Metropolitana. En este caso se cuenta con un perfil temporal extenso, en que se observa una clara disminución de las concentraciones de As en MP2,5 a partir de 2011. Desde el año 2003 hasta 2009, la concentración mediana se encontraba en el rango de 4 a 7 [ng/m3N], para luego

disminuir a 0 a 2 [ng/m3N] de 2010 a 2013, para posteriormente estabilizarse con una mediana de valor 0 [ng/m3N] desde 2014, lo que en 2017 y 2018 se acentúa por cuanto se observa que el 75% de los valores reportados son iguales a 0 [ng/m3N]. En cuanto al estadígrafo de máximas, hasta 2010 se alcanzaban concentraciones entre 37 y 58 [ng/m3N], mientras que desde 2011 estas se mantienen en el rango de 10 a 23 [ng/m3N]. Los estadígrafos asociados se presentan en la Tabla 2-104.

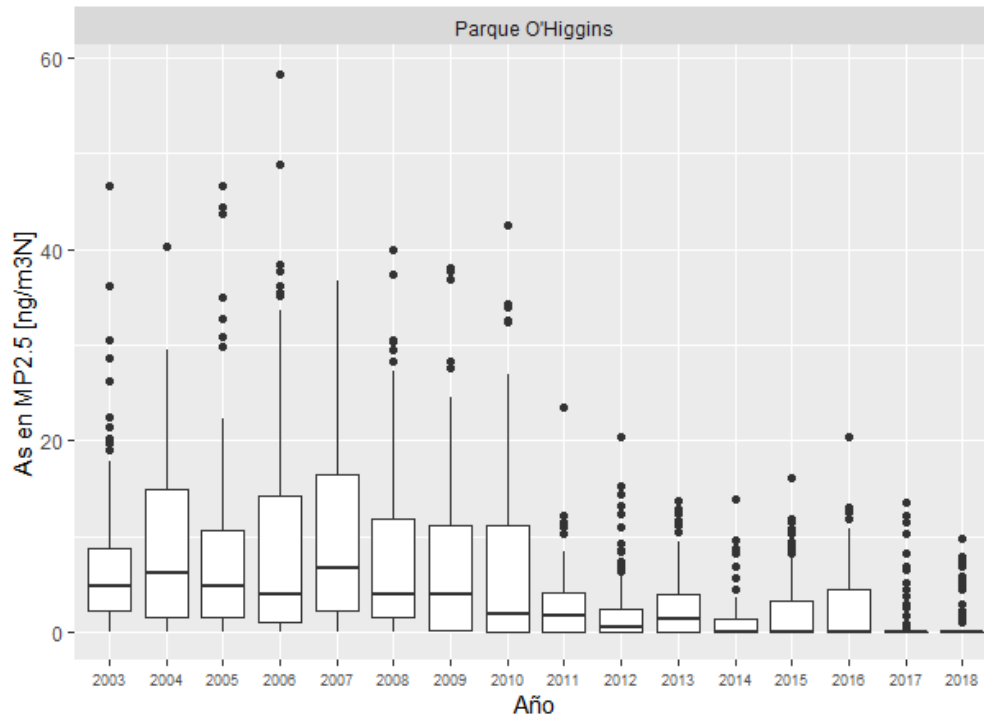


Figura 2-51 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en la estación Parque O’Higgins de la ciudad de Santiago

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-104 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en la estación Parque O’Higgins de la ciudad de Santiago

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
N	81	88	86	88	89	104	85	92
Max.	47	40	47	58	37	40	38	43
3rd Qu.	9	15	11	14	16	12	11	11
Mediana	5	6	5	4	7	4	4	2
Media	8	9	9	10	9	8	8	7
1st Qu.	2	2	2	1	2	1	0	0
Min.	0	0	0	0	0	0	0	0

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
N	98	109	92	49	88	89	84	80
Max.	23	20	14	14	16	20	14	10
3rd Qu.	4	2	4	1	3	4	0	0
Mediana	2	0	1	0	0	0	0	0
Media	3	2	3	2	2	3	1	1
1st Qu.	0	0	0	0	0	0	0	0
Min.	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.5 Estaciones de la ciudad de Temuco

En el caso de las mediciones disponibles en la región de La Araucanía, correspondientes a la ciudad de Temuco, estas se presentan en la Figura 2-52, con sus respectivos estadígrafos disponibles en la Tabla 2-105. En el caso de estas mediciones la mayoría corresponde a 0 [ng/m³N], donde tanto para Las Encinas como para Padre las Casas el 75% de los valores son iguales a 0 [ng/m³N], de modo que los valores mostrados fuera de rango equivalen a los únicos con valor no nulo. Cabe destacar que solo se cuenta con datos para 2019, lo que no permite profundizar en cuanto a la evolución de estas concentraciones.

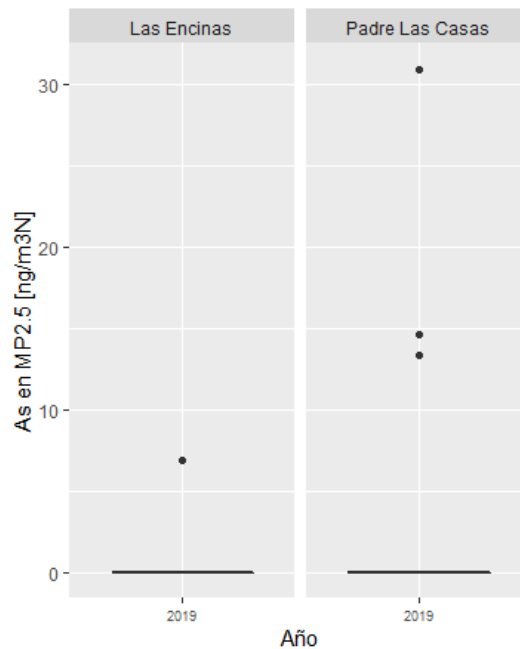


Figura 2-52 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en estaciones de la ciudad de Temuco

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-105 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m³N] en la ciudad de Temuco

Estación	Las Encinas	Padre Las Casas
Año	2019	2019
N	64	61
Max.	7	31
3rd Qu.	0	0
Mediana	0	0
Media	0	1
1st Qu.	0	0
Min.	0	0

Fuente: Elaboración propia

2.3.4 Comparación entre estaciones

En la siguiente Tabla 2-106 se muestra una comparación de las estaciones. Para cada grupo de estaciones cercanas a una fundición, se selecciona aquella en las que se observaron las mayores concentraciones, y aquella con representatividad poblacional en la que se haya observado la mayor concentración de As.

Para la mayoría de las fundiciones, la estación más cercana es aquella que presenta las más altas concentraciones de As, siendo la excepción las zonas de Chagres y Ventanas. Sin considerar las mediciones de la estación Doña Inés debido a que se encuentran en un orden de magnitud mayor, la estación Sur cercana a Altonorte tiene las mayores concentraciones medias, con 103 [ng/m³N] en 2020, año en el que también destacan Sewell cercana a Caletones con 67 [ng/m³N] y Aukahuasi, aldeaña a Chuquicamata, con 72 [ng/m³N].

En cuanto a las concentraciones máximas, en 2019 la mayor fue la estación Sur cercana a Altonorte, con 522 [ng/m³N], que en 2020 registró 455 [ng/m³N]. Pero en 2020 el mayor valor se observó en CD 23 de Marzo, cercana a la fundición Chuquicamata con 664 [ng/m³N]. Destaca también el mismo año la estación Paipote con 559 [ng/m³N] y Aukahuasi con 483 [ng/m³N].

De las estaciones con representatividad poblacional, La Negra cercana a Altonorte tiene las peores concentraciones medidas; destacan también en este aspecto las estaciones Los Maitenes y Quintero, cercanas a Ventanas y la estación Paipote, cercana a Hernán Videla Lira.

Cabe destacar que en la Sección 2.4.1 se presenta un resumen de las metodologías de análisis utilizadas para determinar las concentraciones de material particulado y arsénico en los filtros de cada una de las estaciones. De aquí se concluye que son comparables los métodos utilizados en todas las estaciones para el análisis de arsénico en MP10, exceptuando la estación La Negra – Inacal. Por otra parte, cabe destacar que no se tiene conocimiento de la metodología utilizada para las mediciones de MP10 en las estaciones La Negra – Inacal, y las estaciones cercanas a Minera Spence, Potrerillos y Chagres.

Tabla 2-106 Comparación de estaciones con mayores concentraciones de As en MP10 [ng/m³N]

Fuente	Estación con mayores valores de concentración				Media concentración		Máxima concentración	
	Nombre	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad Poblacional	2019	2020	2019	2020
Tocopilla	Super Site	2,9	NE	MP10, MP2,5, SO ₂	2	2	8	6
Chuquicamata	Aukahuasi	5,4	O	N/A	45	72	233	483
	CD 23 de Marzo	16,9	S	MP10, MP2,5	16	29	46	664
Spence	Spence	6,7	NE	S/I	9	10	17	15
Andina y Mejillones	Subestación Eléctrica	1	SO	N/A	3	3	17	11
Altonorte	Sur	1,4	SE	N/A	103	103	522	455
	La Negra-Inacal	4,5	N	MP10, SO ₂	68	42	421	199
Potrerillos*	Doña Inés	0,4	SO	N/A	827	1.056	3.080	10.070
Hernán Videla Lira	Paipote	1,5	NO	MP10, SO ₂	23	54	264	559
Ventanas	Quintero	5,0	SE	MP10, MP2,5, SO ₂	49	50	376	321
	Los Maitenes	2,7	E	MP10, MP2,5, SO ₂	32	30	314	182
ENAP Aconcagua	Las Gaviotas	1,6	E	SO ₂	6	4	22	9
Chagres	Lo Campo	5,4	E	MP10, SO ₂	35	16	97	31
Caletones	Sewell	6,8	NE	N/A	51	67	185	171
	Coya Población	13,1	SO	M10, SO ₂	10	10	28	46

N/A: La estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

S/I: No se dispone de información de representatividad para esa estación

* Notar que la fundición Potrerillos no tiene ninguna estación cercana con representatividad poblacional.

Fuente: Elaboración propia

2.4 Diagnóstico del estado del arte de monitoreo de As en aire

A continuación, se presenta un diagnóstico del estado del arte del monitoreo de la concentración de arsénico en el aire, tanto a nivel nacional como internacional.

2.4.1 Estado del arte a nivel nacional

En el D.S. 61/2008 del Ministerio de Salud (Ministerio de Salud, 2008) sobre el Reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos se definen las condiciones de instalación y funcionamiento de las estaciones de medición de contaminantes atmosféricos para que sus mediciones sean consideradas válidas por las autoridades sanitarias respectivas. Específicamente, en el Artículo 5 de dicho decreto se afirma que:

“Las estaciones de monitoreo sólo deberán emplear instrumentos de medición de concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos incluidos en la lista de Métodos Denominados de Referencia y Equivalentes publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica o que cuenten con certificación de alguna de las agencias de los países miembros de la Comunidad Europea que implementan las directrices del Comité Europeo para Estandarizaciones o 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. Ello, sin perjuicio de lo dispuesto en las normas primarias de calidad del aire respectivas.” (Ministerio de Salud, 2008).

Dado que el arsénico se mide a partir de muestras de material particulado, es de interés que las estaciones monitoras de este último cumplan con los estándares de calidad exigidos. A continuación, en la Tabla 2-107, se presentan los equipos para toma de muestras de material particulado MP10 y MP2,5 en las estaciones monitoras de interés revisadas en la Sección 2.3. Cabe destacar que se presentan únicamente los equipos de monitoreo discretos, ya la cantidad de arsénico se mide a partir de las muestras recolectadas en estos. Además, las estaciones de monitoreo cercanas a la fundición Ventanas no presentan información sobre el tipo de equipos que utilizan.

Es posible observar que, para los equipos que presentan suficiente información de marca y modelo, cumplen con los estándares de calidad exigidos al encontrarse en la lista de Métodos Denominados de Referencia y Equivalentes publicada por la US-EPA.

Tabla 2-107 Equipos de monitoreo utilizados en todas las estaciones de interés para la medición discreta de MP

Fundición	Estación	Contaminante	Equipo	Marca	Modelo	Cumple estándar ¹
Altonorte	La Negra-Altonorte	MP10	Alto Volumen	Tisch	S/I	S/I
		MP2,5	Bajo Volumen	BGI	PQ200	Sí
	La Negra-Inacal Sur	MP10	Alto Volumen	Thermo	Tisch Environmental	S/I
		MP10	Alto Volumen	Thermo	Hi-vol	S/I
	Coviefi	MP10	Alto Volumen	Tisch	S/I	S/I
		MP2,5	Bajo Volumen	BGI	PQ200	Sí
Caletones	Cauquenes, Cipreses, Coya Población, Coya Club, Sewell	MP10	Alto Volumen	Andersen	G25A/G10557	S/I
Chagres	Catemu, Lo Campo	MP10	Alto Volumen	Tisch	Hi-vol	S/I
Chuquicamata ²	Aukahuasi, H. del Cobre, Nueva Chiu Chiu, Centro, C.P.V.K., 23 de Marzo	MP10	Alto Volumen	Thermo Scientific	S/I	S/I
		MP10	Bajo Volumen ³	Thermo Fisher Scientific	Partisol 2025i D	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	BGI	PQ200	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Thermo Fisher Scientific	Partisol 2025i D	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Thermo Scientific	Partisol 2000 i	Sí
Ventanas	Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes, Sur, Valle Alegre, Quintero, Ventanas	MP10	Alto Volumen	S/I	S/I	S/I
Hernán Videla Lira	Copiapó, San Fernando, Paipote, Tierra Amarilla	MP10	Alto Volumen	Thermo Scientific	TE-6070	Sí
Potrerillos ⁴	CAP, Intelec	MP10	Alto Volumen	Thermo Andersen	GBM23601	S/I
	Cine Inca	MP10	Alto Volumen	Thermo Andersen	GBM23601	S/I
		MP2,5	Bajo Volumen	BGI	PQ200	Sí
	Doña Inés	MP10	Alto Volumen	Graseby Andersen/general Metal Works	SAUV 10H	Sí
Sierra Gorda	Sierra Gorda	MP10	Alto Volumen	Tisch Environmental	TE-6070 ns 8011033	Sí
	Spence	MP10	Alto Volumen	Tisch Environmental	TE-6070 ns P6817x	Sí
Termoeléctrica Mejillones	Ferrocarril	MP10	Alto Volumen	Tisch	TE-6070V GES9V 2980	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Thermo	Partisol 20001201731203	S/I
Termoeléctrica Tocopilla	Super Site	MP10	Alto Volumen	Tisch	TE-6070	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Partisol	2000i	Sí
Termoeléctrica Andina	Subestación Eléctrica	MP10	Alto Volumen	Tisch	TE6070V P10058X	Sí
		MP10	Alto Volumen	Tisch	TE6070V P10058X	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Tisch	Partisol N/S 0509-175	Sí

1. Se clasifican como S/I los equipos de los que no se dispone de suficiente información como para saber si cumplen con el estándar de la US-EPA o si es que tienen una certificación.
2. En los informes de la fundición Chuquicamata se presentan al inicio todos los tipos de equipos de monitoreo utilizados en las estaciones asociadas, sin embargo, no es posible saber qué tipo de equipo está instalado en cuál estación.
3. Único equipo de monitoreo de MP10 que es de Bajo Volumen
4. En octubre de 2015, la estación Intelec cambia de un equipo muestreador de Bajo Volumen, Marca BGI, modelo PQ200 a un equipo muestreador de Alto Volumen, Marca Thermo Andersen, modelo GBM23601.

Fuente: Elaboración propia en base a informes de reporte de las fundiciones

Por otra parte, las normativas relacionadas al arsénico son el D.S. 165/1998 del Minsegres (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1998) sobre la Norma de Emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire, posteriormente modificado por el D.S. 28/2013 del MMA (2013a), que establece Norma de Emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico. En ninguna de las dos se mencionan aspectos asociados al monitoreo de las concentraciones atmosféricas, sino que se centran en detalles de las mediciones de arsénico en emisiones. Sólo en el D.S. 477/1994 del Minsal, donde se establece la Norma Primaria de Calidad del Aire para arsénico, derogada el mismo año, se establece como método de análisis la “Espectrofotometría de Absorción Atómica, o cualquier equivalente que la autoridad sanitaria apruebe”.

En la siguiente Tabla 2-108 se presentan las metodologías de análisis utilizadas para determinar la concentración de material particulado (MP10 y MP2,5) y el arsénico contenido en las muestras, en las diferentes estaciones de interés, de acuerdo con la información que fue posible recopilar de los informes de reportes de las fundiciones.

Se observa que las metodologías utilizadas para el análisis del MP10 y MP2,5, según los códigos indicados en los análisis hechos por los laboratorios, son:

- I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009 (SGS)
- Code of Federal Regulation. Part 50, App. J. Ed.07.01.99 (SGS)
- ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J (Algoritmos y Mediciones Ambientales)
- IGC-SGR-006 (SERPRAM S.A.)

Todas, menos la última, hacen referencia al Apéndice J de la parte 50 del Código de Regulación Federal de Estados Unidos, donde se define el método de referencia para la determinación de material particulado como MP10 en la atmósfera. La metodología IGC-SGR-006 se señala para el análisis de las muestras provenientes de la estación La Negra – Inacal, la cual debe corresponder a un código interno del laboratorio, de modo que no es posible saber si el método corresponde al mismo de las demás estaciones o no. Para las estaciones cercanas a Minera Spence, Potrerillos y Chagres, no se tiene conocimiento de la metodología de análisis utilizada para sus mediciones de MP10.

Por una parte, se observa que las metodologías utilizadas para el análisis de metales en MP10 son:

- EPA 3050 Std Methods Ed.20 1998 3111 c-d-3500 (SGS)
- Espectroscopía de Absorción Atómica (SGS)
- I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114B, 3111D, 3112B Ed.23, 2017 (SGS)
- I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012 (SGS)
- IE-E.54-CHA, versión 10, basado en TMECC 04.14, 2001 y TMECC 04.12-B, 2002. Método ICP/OES (Espectroscopia de Absorción Atómica) (DICTUC)

- ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B (Algoritmos y Mediciones Ambientales)

Por otra parte, las metodologías utilizadas para el análisis de metales en MP2,5 son:

- I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114B, 3111D Ed.23, 2017 (SGS)
- ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B (Algoritmos y Mediciones Ambientales)

Se observa que la mayoría de los métodos están basados en el método estándar 3050B de la US-EPA, donde específicamente el código 3114B hace referencia a la medición de arsénico y selenio utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica con generación de hidruro. Por otra parte, el método utilizado por DICTUC en las muestras provenientes de estaciones cercanas a Minera Spence y la fundición Chagres, se basa en los métodos de prueba para el examen de compost y compostaje (TMECC por sus siglas en inglés) del US Composting Council. Se indica que el método es el ICP/OES, correspondiente a Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo. En las estaciones cercanas a la fundición Potrerillos sólo se indica que utilizan Espectroscopía de Absorción Atómica. No se tiene conocimiento sobre la metodología utilizada en La Negra – Inacal para el análisis de arsénico en MP10.

En síntesis, se tiene certeza de que son comparables los métodos utilizados en todas las estaciones para el análisis de arsénico en MP10, exceptuando la estación La Negra – Inacal.

Tabla 2-108 Metodología de análisis, laboratorio y frecuencia de muestreo de MP10, MP2,5 y As

Fuente principal	Estación	Contaminante	Frecuencia muestreo	Período de muestreo	Detalle metodología análisis	Laboratorio	Límite de detección	
Altonorte	La Negra-Altonorte, Sur	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS	NA	
		As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		1 µg ⁶	
	La Negra-Inacal	MP10 Discreto	3 días	24 horas	IGC-SGR-006	SERPRAM S.A.	NA	
		As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	S/I		S/I	S/I (Valores bajo límite se informan como ND)
	Coviefi	Coviefi	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS	NA
			As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114B, 3111D, 3112B Ed.23, 2017		1 µg ⁶
Caletones	Coya Población	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS	NA	
		As	Se mide As en 1 filtro de MP10 por semana, en la misma fecha que las demás estaciones cercanas a la fundición ¹	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		S/I (Valores bajo límite se informan como ND)	
	Coya Club, Sewell	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS	NA	
		As	Se mide As en 1 filtro de MP10 por semana, en la misma fecha que las demás	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		S/I (Valores bajo límite se informan como ND)	

Fuente principal	Estación	Contaminante	Frecuencia muestreo	Período de muestreo	Detalle metodología análisis	Laboratorio	Límite de detección
			estaciones cercanas a la fundición ²				
Chagres	Catemu, Lo Campo	MP10 Discreto ⁵	3 días	24 horas	S/I	S/I	NA
		As	Se mide As en compósitos de un mes ³	NA	IE-E.54-CHA, versión 10, basado en TMECC 04.14, 2001 y TMECC2001 y TMECC04.12-B, 2002. Método por ICP/OES	DICTUC	0,0015 µg/m ³
Chuquicamata	Aukahuasi, H. del Cobre, Chiu-Chiu, Nueva Chiu Chiu, Centro, C.P.V.K., 23 de Marzo	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009.	SGS	NA
		As en MP10	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		0,00004 µg/m ³
		MP2,5 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009.		NA
		As en MP2,5	Se mide As en todos los filtros de MP2,5	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114B, 3111D Ed.23, 2017		0,002 µg/m ³
Ventanas	Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes, Sur, Valle Alegre, Quintero, Ventanas	MP10 Discreto	3 días	24 horas	Code of Federal Regulation. Part 50, App. J. Ed.07.01.99	SGS	NA
		As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	EPA 3050 Std Methods Ed.20 1998 3111 c-d-3500		0,001 µg/m ³
Hernán Videla Lira	Copiapó, San Fernando, Paipote, Tierra Amarilla	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS/Algoritmos y Mediciones Ambientales ⁴	NA
		As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		0,007 µg/m ³
Potrerosillos	CAP,	MP10	3 días	24 horas	S/I	SGS	NA

Fuente principal	Estación	Contaminante	Frecuencia muestreo	Período de muestreo	Detalle metodología análisis	Laboratorio	Límite de detección
	Intelec, Cine Inca, Doña Inés	Discreto					
		As	Se mide As en los 2 filtros con mayor concentración de MP10 al mes		Espectroscopia de Absorción Atómica		S/I
Minera Spence	Sierra Gorda, Spence	MP10 Discreto ⁵	3 días	24 horas	S/I	DICTUC	NA
		As	Se mide As en 2 filtros al mes	NA	IE-E.54-CHA, versión 10, basado en TMECC 04.14, 2001 y TMECC 04.12-B, 2002. Método ICP/OES (Espectroscopía de Absorción Atómica)		S/I
Termoeléctrica Mejillones	Ferrocarril	MP10 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J	Algoritmos y Mediciones Ambientales	NA
		As en MP10	Se mide As en los 5 filtros con mayor concentración de MP10 al mes	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,007 µg/m ³
		MP2,5 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J		NA
		As en MP2,5	Se mide As en los 5 filtros con mayor concentración de MP2,5 al mes	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,007 µg/m ³
Termoeléctrica Tocopilla	Super Site	MP10 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J	Algoritmos y Mediciones Ambientales	NA
		As	Se mide As en los 3 filtros con mayor concentración de MP10 al mes	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,007 µg/m ³
Termoeléctrica Andina	J.J. Latorre	MP10 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J	Algoritmos y Mediciones Ambientales	NA
		As en MP10	Se mide As en el filtro con mayor concentración de	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,099 µg/m ³

Fuente principal	Estación	Contaminante	Frecuencia muestreo	Período de muestreo	Detalle metodología análisis	Laboratorio	Límite de detección
			MP10 a la semana				
		MP2,5 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J		NA
		As en MP2,5	Se mide As en el filtro con mayor concentración de MP2,5 a la semana	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,099 µg/m ³
	Subestación Eléctrica	MP10 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J	Algoritmos y Mediciones Ambientales	NA
		As	Se mide As en el filtro con mayor concentración de MP10 a la semana	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,099 µg/m ³

1. Para las mediciones de As de Coya Población, hasta julio de 2016 se presentan valores mensuales, sin indicar metodología.

2. Para las mediciones de As de Coya Club y Sewell, hasta julio de 2016 se presentan valores mensuales, sin indicar metodología. Desde agosto de 2016 a marzo de 2019 se hace caracterización química a los 4 filtros con mayores concentraciones de MP10.

3. Para las mediciones de As en Catemu y Lo Campo, hasta junio de 2018 se realizaban mediciones en compósitos de 3 meses, luego la medición comenzó a ser mensual (método anterior: TMECC04.14 y 04.12B Of.2001)

4. Los análisis de filtros de MP10 y mediciones de As en las estaciones cercanas a HVL los comenzó a hacer Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA a partir de abril de 2019. Metodología para MP10: ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J Ed. 07.01.99; Metodología para As: Metodología ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B, SM 3112-B

5. Las mediciones de MP10 de Minera Spence y fundición Chagres son las únicas que dicen tener cadena de custodia

6. Valor se presenta en masa y no normalizado por volumen.

Fuente: Elaboración propia en base a informes de reporte de las fundiciones

2.4.2 Estado del arte a nivel internacional

Se han utilizado una variedad de técnicas analíticas y de muestreo para medir las concentraciones de metales traza en el aire, incluidos los impactadores, los precipitadores electrostáticos y los filtros (Lewis, Reid, Pollock, & Campleman, 2012). El estudio de Helsen (2005) hace una revisión de tecnologías de muestreo y dispositivos de control de la contaminación del aire para arsénico gaseoso y particulado, los que se muestran en la Tabla 2-109 en la cual se pueden observar también las eficiencias de cada técnica. El estudio de Helsen (2005) presenta conclusiones interesantes, por ejemplo, que la filtración a través de un filtro de fibra de cuarzo, fibra de vidrio o teflón recoge el arsénico solo parcialmente, mientras que para los filtros Nuclepore y Millipore, se reportaron altas eficiencias de filtrado. Además, los filtros de membrana de éster de celulosa y la combinación de filtros e impactadores también informaron buenas eficiencias de recolección. Mientras menor sea la concentración de arsénico en el aire a medir, menor será la eficiencia de filtrado (2005).

Tabla 2-109 Descripción general de las técnicas de muestreo utilizadas para medir las concentraciones de arsénico en el aire ambiental

Referencia	Compuesto de metal	Sistema de muestreo	Eficiencia
Roberts et al., 1977	As Concentración > $1 \mu\text{g m}^{-3}$	Filtro de fibra de vidrio	17-65%
		Filtro de fibra de vidrio	46,7-97%
		Nucleoporo	99,2-99,8%
		AA Milliporo	98,2-99,9%
	As Concentración < $1 \mu\text{g m}^{-3}$	-	Más bajo
Lao et al., 1974	As_2O_3	Filtro de fibra de vidrio	Baja (10-24%)
		Filtro + impactador de Greenburg-Smith	Más alto
Creelius y Sanders, 1980	As + As_2O_3 vapor + AsH_3	Impactador seco + filtro de teflón	Alto para parte As
		+2 impactadores ($NaOH$, H_2O , HNO_3 o NH_4OH)	>97% para As_2O_3 <1% para AsH_3
		+2 trampas de cuentas de cuarzo plateadas	Bajo para As_2O_3 (44+29) % AsH_3
		+ Trampa de carbón de 4 etapas	Backup para AsH_3 Efectivo para As_2O_3
Maggs, 2000	As + As inorg + vapor de AsO_3	Filtro de membrana de celulosa de éster+ almohadilla de respaldo impregnada de Na_2CO_3	No disponible
MDHS, 1995	As + As inorg + vapor de As_2O_3	Filtro de membrana de celulosa de éster+ almohadilla de respaldo impregnada de Na_2CO_3	No disponible
NIOSH, 1984	As + As_2O_3	Filtro de membrana impregnado de Na_2CO_3 + almohadilla de respaldo	93%
NIOSH, 1985	AsH_3	Tubo absorbente sólido con carbón activado de cáscara de coco	89%

Fuente: Elaboración propia (Helsen, 2005)

En la Tabla 2-110 se muestran algunos ejemplos de procedimientos de recolección y análisis de muestras para el arsénico en el aire ambiente, se describe el método de análisis, compuestos analizados y medio de muestreo, sin embargo, la mayoría de estos métodos publicados no especifican procedimientos para determinar simultáneamente múltiples especies individuales de arsénico en el aire (Lewis et al., 2012).

Generalmente las muestras se recolectan utilizando un aparato que tiene una entrada, un medio de recolección de muestras y bombas de muestreo de aire destinadas a recolectar aire durante un período de tiempo específico. El tamaño de las partículas que se recolectarán en el medio de muestreo se define generalmente según el tamaño de la entrada de muestreo y la velocidad de flujo. Durante la recolección de la muestra, el aire se extrae a través del dispositivo de muestreo

y se recolecta en medios filtrantes. Algunos de los filtros que se utilizan son fibra de vidrio, fibra de cuarzo, filtros de membrana y filtros de teflón. El medio de filtrado utilizado depende de los protocolos de muestreo y análisis que se realizarán (Lewis et al., 2012).

Tabla 2-110 Ejemplos de procedimientos de recolección y análisis de muestras para el arsénico en el aire ambiente

Referencia	Método de análisis	Título del método	Compuestos analizados	Medio de muestreo	Análisis
NIOSH, 1994a	Método 7900 de NIOSH	Arsénico y compuestos como As	Todos los compuestos de arsénico (como As) excepto AsH_3 y As_2O_3	Filtro de membrana de éster de celulosa de $0,8 \mu m$	Flame AA, generación de arsina
NIOSH, 1994b	Método NIOSH 5022	Arsénico, orgánico	MMA, DMA, ácido arsénico ¹⁵	Filtro de PTFE ¹⁶	Cromatografía iónica / hidruro AA
NIOSH, 1994c	Método NIOSH 6001	Arsina	AsH_3	Tubo absorbente	GFAA
EPA, 1988	EPA de EE. UU.	Determinación de arsénico en material particulado suspendido recolectado del aire ambiente	As total	Filtros de fibra de vidrio o cuarzo	GFAA
EPA, 1999	EPA de EE. UU.	Compendio de métodos para la determinación de compuestos inorgánicos en aire ambiente	As total	Múltiples métodos analíticos	GFAA, ICP, ICP / MS, NAA, etc. ¹⁷

Fuente: Elaboración propia (Lewis et al., 2012)

En la Tabla 2-111 se presentan diferentes métodos de recolección y análisis para un subconjunto de las especies de arsénico individuales (es decir, As (III), As (V), MMA, DMA y otras). Se utilizaron variadas técnicas para recolectar muestras de aire en los estudios revisados por Lewis et al (2012), pero en general fueron consistentes con los procedimientos estandarizados definidos por la EPA de los Estados Unidos y otros (Lewis et al., 2012).

Los estudios revisados por Lewis et al. (2012) presentan gran variabilidad en cuanto a diferencias en fechas y duración del muestreo, entorno ambiental, métodos de recolección y análisis. Solo 2 de los 12 estudios revisados se realizaron en los Estados Unidos (Rabano et al., 1989; Solomon et al., 1993). El resto se llevó a cabo en Japón (Mukai y Ambe, 1987a Mukai y Ambe, 1987b) Hungría,

¹⁵ MMA: ácido monometilarsónico y DMA: ácido dimetilarsínico

¹⁶ PTFE: politetrafluoreno

¹⁷ ICP: plasma acoplado inductivamente, ICP/MS: espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente

(Šlejkovec et al., 2000), Portugal (Farinha et al., 2004), España (Oliveira et al., 2005; Sanchez de la campa et al., 2008; Sanchez-Rodas et al., 2007) y Grecia (Tsopelas et al., 2008). Las fechas de muestreo abarcan tres décadas (1975-2008) y durante estas evolucionaron las técnicas de muestreo y análisis. La mayoría de los estudios se realizaron midiendo el aire en áreas urbanas y/o industriales y en general, indicaron que los métodos analíticos realizados estaban bajo control.

Las especies de arsénico detectadas en MP eran típicamente inorgánicas (es decir, más del 90%), solo en dos estudios, el arsénico inorgánico constituyó menos de la mitad del As total.

Varios de los estudios revisados evaluaron la precisión en términos de eficiencia de extracción, comparando las concentraciones sumadas de arsénico especiado (As (III) + As (V)) con los resultados de arsénico total y calculando el porcentaje de recuperación.

Casi la mitad de los estudios utilizaron una metodología de HPLC junto con la generación de hidruros y la espectrometría de fluorescencia atómica (HPLC-HG-AFS). Estos resultan ser también de los estudios más recientes. Esta técnica pudo diferenciar y separar cuatro especies de arsénico: As (III), As (V), MMA y DMA.

De acuerdo con lo observado en la literatura, habría cierta evidencia de que la metodología HG, junto con varios detectores, es el método de elección, particularmente porque ha demostrado ser muy sensible para la separación de As (III) y As (V).

Tabla 2-111 Estudios de arsénico en aire ambiente y comparación de metodologías de estudio

Referencia	Tamaño de partícula	Compuestos de arsénico analizados ⁽¹⁾	Método de recolección	Método analítico ⁽¹⁾	Límite de detección
Johnson y Braman, 1975	<3 μm , > 3 μm	As inorgánico; metilarsina, dimetilarsina, trimetilarsina	Filtro de bajo volumen / fibra de vidrio para partículas > 0,3 μm Tubo de pyrex de 14 mm / malla Perlas de pyrex plateadas	descarga de d.c: espectroscopia de emisión	0,1-0,2 ng/m ³
Mukai y Ambe, 1987b	TSP	MMA, DMA, TMA	Alto volumen; filtro de fibra de cuarzo	HG-GC-AAS	<3–10 ng/m ³ (para las 3 especies As)
Mukai y Ambe, 1987a	TSP	MMA, DMA	Alto volumen; filtro de fibra de cuarzo	HG-GC-AAS	~0,1 ng/m ³
Rabano y col., 1989	<2,5 μm , > 2,5 μm , TSP	As total, As (III), As (V)	TSP: microfibra de vidrio / de alto volumen <MP _{2,5} y > MP _{2,5} : DCVI/PTFE de alto volumen	As total: método no especificado As Especiado: HG-AAS	1 ng/m ³

Referencia	Tamaño de partícula	Compuestos de arsénico analizados ⁽¹⁾	Método de recolección	Método analítico ⁽¹⁾	Límite de detección
Solomon y col., 1993 ; Salomón, 1984	TSP	As (III), As (V)	TSP: filtro de fibra de cuarzo / alto volumen	<i>Assumed flame</i> -AAS	0,25 ng/m ³
Talebi, 1999	TSP	As total, As (III)	Filtro de fibra de cuarzo / alto volumen	<i>Flame</i> -AAS	No reportado
Šlejkovec y col., 2000	<2 μm, 2–10 μm	As total, As (III), As (V), MMA, DMA en partículas gruesas (2–10 μm) y finas (<2 μm)	Unidades de filtrado apiladas	As-INAAAs totales (III), As (V), MMA, DMA: HPLC-HG-AFS	<0,01 ng/m ³ (As (III), MMA) <0,05 ng/m ³ (DMA); <0,08 ng/m ³ (As (V))
Farinha y col., 2004	<2,5 μm, 2,5–10 μm	As (III) / As (V) en PM 2.5–10 y <PM 2.5	No especificado; descrito en Reis et al., 1999	As especificado: HPLC-UV-HG-AFS As total: INAA	Supuesto <0.05–1.1 ng/m ³
Oliveira et al., 2005	TSP	As total, As (III), As (V), DMA, MMA	Filtros de fibra de cuarzo / alto volumen	As especiada: HPLC-HG-AFS As total: HG-AFS	Supuesto <0,2 ng/m ³
Sánchez-Rodas et al., 2007	<10 μm	As (III), As (V) en MP ₁₀	Filtro de fibra de cuarzo / alto volumen	As especiada: HPLC-HG-AFS As total: HG-AFS	0,1 ng/m ³ para As (III) 0,4 ng/m ³ para As (V)
Sánchez de la Campa et al., 2008	<2,5 μm	As (III) y As (V) en MP _{2,5}	Filtros de fibra de cuarzo / alto volumen	As especiada: HPLC-HG-AFS As total: HG-AFS	0,1 ng/m ³ para As (III) 0,4 ng/m ³ para As (V)
Tsopelas et al., 2008	<2,5 μm, 2,5–10 μm	As (III), As (V), MMA, DMA en MP ₁₀ y MP _{2,5}	TSP de alto volumen/fibra de vidrio y Filtros PFTE de alto y bajo volumen / apilados: MP ₁₀ y MP _{2,5}	As total / As especiada: HG-ICP-OES Intercambio de iones (separación de As (V), MMA y DMA)	As (III): 0,1 ng/m ³ As(V): 0,7 ng/m ³ MMA: 0,3 ng/m ³ DMA: 0,4 ng/m ³

- (1) MMA: Metilarsina (monomethylarsonic acid); DMA: Dimetilarsina (dimethylarsinic acid);TMA: Trimetilarsina (trimethyl arsenate)
- (2) HG: Generación de hidruros (hydride generation); GC: Cromatografía de gases (gas chromatography); AAS: Espectrometría de absorción atómica (atomic absorption spectrometry); HPLC: Cromatografía líquida de alta resolución (high-performance liquid chromatography); UV: Reactor ultra violeta (ultraviolet reactor); AFS: Espectroscopia de fluorescencia atómica (atomic fluorescence spectroscopy); ICP-OES: Espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (inductively coupled plasma optical emission spectroscopy)

Fuente: (Lewis et al., 2012)

3. Emisión de arsénico

En el presente capítulo se presenta el proceso de recolección de información, sus resultados y análisis. Los datos estudiados corresponden a los reportes técnicos elaborados por las fundiciones de cobre, según el protocolo de la Superintendencia del Medio Ambiente para balances de masa de azufre y arsénico.

3.1 Compilación de información disponible de emisiones

La norma de emisiones para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico (DS 28/2013), en sus artículos 11 y 12 disponen las formas en que se fiscaliza y verifica el cumplimiento (MMA, 2013a). En estos artículos se establece que las funciones de control y fiscalización corresponden a la SMA. Adicionalmente establece que la SMA definirá los protocolos para la implementación de los balances de masas de arsénico y azufre, los cuales son utilizados para la determinación de las emisiones y verificar el cumplimiento de los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma. Sin perjuicio de lo anterior, explicita que el balance de masa de arsénico debe considerar lo indicado en los artículos 15 al 29 de DS 165/1998¹⁸.

Respecto a los plazos del reporte, artículo 16 establece la obligación de remitir informes mensuales que den cuenta sobre el cumplimiento de la norma, junto con un informe anual consolidado. Entretanto, los informes mensuales deben ser remitidos dentro de los veintidós días del mes siguiente del periodo que se informa. Por otra parte, los informes anuales deben reportarse en el mes de enero de cada año calendario.

Estos reportes corresponden a la información base para el presente capítulo. En ellos se informan detalladamente balances de masa, mediciones en chimeneas, emisiones de contaminantes, indicadores de desempeño ambiental, composición química del concentrado, consumo de combustible y registros de horas de operación y mantención de unidades y equipos de medición.

Una segunda fuente de información corresponde a los reportes realizados por los establecimientos en el marco del DS138/2005 del MINSAL, el cual es compilado, sistematizado y presentado por el RETC. Esta información permite la estimación de emisiones de las fuentes restantes.

3.1.1 Fundiciones de cobre: Metodología de balance de masa

Las fundiciones de cobre cuentan con procesos pirometalúrgicos variados con el fin de llevar el concentrado de cobre a un estado de alta pureza. De esta forma, se tratan de sistemas complejos

¹⁸Decreto 165 - Establece Norma de Emision Para La Regulación Del Contaminante Arsenico Emitido Al Aire (1998) MINSEGPRES.

donde cada fundición tiene sus particularidades que, por lo demás van evolucionando en el tiempo, por ejemplo, a raíz de cambios tecnológicos para adaptarse y cumplir con la normativa ambiental. De esta forma, la SMA, por medio de la RE 694/2015 - “Protocolo para validación de metodologías para balance de masa de arsénico y azufre en fuentes emisoras de acuerdo al DS 28/2013 MMA” (SMA, 2015) establece definiciones y metodologías con el fin de estandarizar y asegurar resultados confiables y comparables entre las distintas fuentes de emisión.

Cabe destacar, que los resultados de los balances de masa corresponden al cumplimiento de acuerdo con la letra a) del artículo 16 del D.S. 28/2013 MMA. Por consiguiente, la resolución exenta N° 694, establece los protocolos para formular los balances de masa de arsénico y azufre, con el objetivo de determinar la emisión de dichos parámetros de interés que se encuentran regulados en la norma de emisión. En el protocolo se definen conceptos relevantes, el sistema donde se aplica el balance, los flujos de entrada, flujos intermedios y flujos de salida mínimos que deben considerarse para los balances, las metodologías de muestreo y análisis químico, las ecuaciones matemáticas y la forma de presentar la metodología para aprobación.

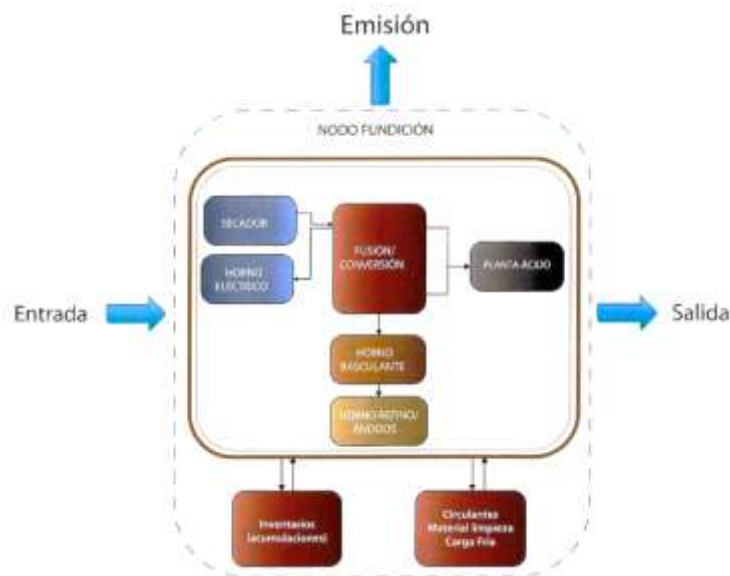


Figura 3-1 Sistema, Flujos y límites de balance de masa

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (SMA, 2015, fig. 1)

En la Figura 3-1 se aprecian los elementos necesarios para definir los componentes del balance de masa por fuente emisora. En primer lugar, los flujos de entrada se ubicarán justo antes de equipos de tostación, si existieran, o antes del o los equipos de secado o, si estos no existieran, del o los equipos de fusión. En caso de no ser posible este requerimiento, la fuente emisora deberá justificar técnicamente por qué no es posible cumplir el requerimiento. En este caso la fuente emisora deberá registrar diariamente la cantidad de arsénico que se maneja en las operaciones unitarias. En los flujos intermedios, se encuentran las unidades que llevan a cabo la fusión/conversión, y los hornos de basculante y de refino. Posteriormente, el tratamiento sigue

en la unidad de planta de tratamiento de ácido. Luego, los circulantes, de ser tratados como entradas y salidas, deben ser registrados semanalmente con información detallada de las cantidades másicas y contenido de As. Así, se generan los límites para contabilizar y evaluar las salidas y emisiones. Cabe destacar, que las fundiciones tienen configuraciones de equipos únicas, por lo que la definición del sistema permite comprender los procesos donde se aplicará el balance de masa.

Flujos y Nodos

Los balances se constituyen sobre un modelo de nodos y flujos. Los nodos representan subprocesos y pueden ser descritos matemáticamente según la Ecuación 1:

$$\text{Entradas} + \text{Existencia}_{\text{inicial}} = \text{Salidas} + \text{Existencia}_{\text{final}}$$

Ecuación 1 Balance de masa

Fuente: Elaboración propia en base a Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (SMA, 2015)

Los flujos corresponden a movimientos de materiales que entran o salen de un nodo, y se diferencian por el comportamiento de origen y destino que tienen en un nodo determinado. De acuerdo con el protocolo establecido, se requiere categorizar los flujos de la siguiente manera:

Tabla 3-1 Flujos Establecidos por el Protocolo de Balance de Masa

Flujos de Entrada	Flujos de Salida	Flujos Intermedios/Inventarios (clasificados en inicial y final)
Concentrado Propio de Cu o Au	Ácido sulfúrico	Escoria
Concentrado Externo	Ácido sulfúrico grado C	Metal Blanco
Calcinas	Polvos captados no recirculados producto de la operación de equipos de control	Polvos
Scrap (sobrantes y restos de ánodos)	Efluentes producto de la limpieza de gases	Carga Fría
Fundentes (cuarzo, ceniza de soda, carbonato de calcio u otros)	Escorias de descarte producto de la limpieza de escoria	Circulante
Cementos de Cobre	Ánodo, RAF u otro refinado	Ánodos
Polvos de Entrada	Circulante o carga fría (dependiendo de necesidades operacionales)	Cargas Líquidas
Blíster externo	Otros, deben ser justificados	Moldes
Ánodos externos rechazados o restos de estos	Escoria	Ladrillos
Circulante o carga fría (dependiendo de necesidades operacionales)		Otros
Otros, deben ser justificados.		Limpieza

Fuente: Elaboración propia en base a Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (SMA, 2015)

Balances de Masa

Respecto al cálculo de la emisión de los contaminantes, esta se obtiene a través de un desarrollo matemático, el cual considera los flujos másicos m en el nodo fundición. Esta ecuación tomará 12 incrementos temporales de 1 mes. De esta manera, la expresión para la masa de emisión en toneladas, considerado el mes a informar p y el anterior, será la siguiente:

$$m_{emisión}^p = m_{entra}^p - m_{sale}^p - (m^p - m^{p-1})$$

Ecuación 2 Estimación de emisiones mediante balance de masa

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 6 SMA, 2015)

Balance Mensual

En específico, para la emisión del contaminante de interés arsénico, la ecuación de cálculo utilizada es la siguiente:

$$Emisión\ As(mes) = \sum As(entrada) - \sum As(salida) - [As(final) - As(inicial)]$$

Ecuación 3 Estimación de emisiones mensuales de arsénico mediante balance de masa

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 9 SMA, 2015)

Balance Anual

Asimismo, se requiere informar la emisión del arsénico para periodos anuales. A diferencia de la anterior, esta considera el material de limpieza acumulado durante un año. La ecuación de cálculo utilizada es la siguiente:

$$Emisión\ As(año) = \sum As(entrada) - \sum As(salida) - [As(final) - As(inicial)] - \sum MLAs$$

Ecuación 4 Estimación de emisiones anuales de arsénico mediante balance de masa

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 12 SMA, 2015)

Validación del Balance

Para validar el balance del contaminante de interés, se utilizan los pesos secos de los flujos determinados a través del balance de Cu y/o Fe ajustado. Este ajuste se realiza a través de un método matemático como mínimos cuadrados, LaGrange, u otro, el cual es necesario para corregir los errores asociados inherentes al proceso.

Para este procedimiento, se cuenta con los pesos secos ajustados de cada flujo y el análisis químico, denominado ley base. Cabe destacar, que el balance de cobre es el parámetro con los datos más confiables dentro del sistema¹⁹. El peso de cobre o fino de cobre en todos los flujos se calcula de la siguiente manera (ley base):

$$Fino\ de\ Cu\ en\ flujo\ 1 = Peso\ seco\ flujo\ 1 * \% \text{ en peso Cu en flujo} * \frac{1}{100}$$

Ecuación 5 Estimación del contenido de cobre en un flujo

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 18 SMA, 2015)

Aplicación Flujos Ajustados al Balance de As

Es importante destacar que el balance de As no se ajusta directamente para la validación. Para el balance de As se cuenta con los pesos secos ajustados de entrada, salida y acumulados y la fracción de arsénico de cada flujo. Luego mediante la multiplicación del peso seco ajustado y la fracción de As, se determina los finos de As en todos los flujos, con dicha información se obtiene un balance de As validado.

¹⁹ El protocolo de la SMA lo califica de esta forma, en parte por la relevancia de este elemento para el proceso, además del hecho de no haber emisiones de cobre.

Tal como se indicó anteriormente, para el balance de arsénico se tienen los pesos secos ajustados de cada flujo y se multiplica el peso seco del flujo ajustado por la fracción en peso del arsénico:

$$\text{Fino As en flujo } i = \text{Peso seco flujo } i_{\text{ajustado}} * \frac{\% \text{ en peso As en flujo } i}{100}$$

Ecuación 6 Estimación de Arsénico en flujo "i"

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 23 SMA, 2015)

Con el resultado de la Ecuación 6 se puede entonces estimar la emisión de acuerdo con lo descrito en la Ecuación 3.

En el caso de tener que realizar algún ajuste en el balance de arsénico, se debe considerar lo siguiente, en orden jerárquico:

1. Ajustar los flujos máxicos de acuerdo con los balances de cobre y/o hierro.
2. Si no cuadra el balance de arsénico, se debe variar la concentración de arsénico de acuerdo con el rango de concentración de los mismos, del resultado del análisis químico, el cual entrega el promedio y desviación de la muestra.
3. Si no cuadra el balance, volver al punto inicial.

Metodologías de Muestreo, Incrementos y Análisis Químico

Para el muestreo, es necesario tomar incrementos para conformar una muestra²⁰ representativa de la unidad de muestreo y luego analizarlas. Estas muestras se obtienen en puntos definidos en el sistema, los cuales coinciden con la medición de flujo. El titular debe presentar los puntos de muestreo con el proceso asociado a cada muestra, así también señalar el o los tipos de muestreo, número de incrementos, frecuencia de muestreo y forma de determinación. Los puntos de muestreo y las características del muestreo se presentan en la Tabla 3-2.

²⁰ Definida como la parte de una unidad de muestreo generalmente obtenida por la unión de incrementos o fracciones de ésta y destinada a representar a la unidad en cuanto a la fracción de arsénico contenido en ésta. Según letra ñ, art 2, DS 75/2008 MINSEGPRES

Tabla 3-2 Requisitos de muestreo

Flujo	Punto de muestreo (a cada unidad de muestreo)	Número mínimo de incrementos (por unidad de muestreo)	Número mínimo de compósitos
Flujo de Entrada	Proceso discontinuo: 1 camión, 1 tolva, 1 carro de ferrocarril, 1 carga o camada preparada en cancha	10 por unidad de muestreo	Uno cada 500 toneladas de material o por proveedor (si es < 500 ton)
	Proceso continuo: correa transportadora o ducto	4 por hora	Uno cada 8 horas (3 compósitos diarios)
Flujo de Salida	Escoria de Descarte	3 incrementos por olla o taza. Punto de sangría 3 incrementos por hora. 20 incrementos o 3 sondajes por cancha	Uno diario
	Producto final: ánodo, blíster y otro semejante.	5 perforaciones por ánodo (número de ánodos: 0.25% del ciclo de moldeo). Punto de sangría o canal: 3 incrementos por ciclo, uno al inicio, otro al medio, y otro al final del ciclo de moldeo	Uno por ciclo de operación
Otros flujos de salida	Proceso Discontinuo: 1 camión y otro equivalente, 1 contenedor.	10 por unidad de muestreo	Uno por unidad de muestreo
	Proceso continuo: un ducto o línea de flujo.	1 muestra por hora	Uno diario
Material Circulante	Un camión u otro equivalente, una carga en zona de acopio	10 por unidad de muestreo	Uno por lote, máximo de 500 ton

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Tabla 1 SMA, 2015)

Análisis Químico

Las técnicas analíticas para determinar el contenido de arsénico disuelto y/o en los efluentes líquidos son las siguientes:

- Espectrofotometría de Absorción Atómica
- Emisión de Plasma de Acoplado Inductivamente (ICP-OES)
- Fluorescencia de Rayos X (FRX)
- Una técnica analítica de referencia o equivalente designada o aprobada por una institución nacional o internacional

Reportes de Muestreo

En torno a la entrega de información, esta debe ser entregada en un informe mensual, el cual contenga todos los puntos evaluados relacionados a la norma. Además, en los anexos deben estar incorporadas las planillas con el detalle necesario.

3.1.2 Resumen de información disponible para fundiciones de cobre

Para el levantamiento de la información y la sistematización de datos, se realizó una revisión completa de los documentos enviados por la contraparte y de los archivos disponibles en la página del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (en adelante SNIFA). En estas fuentes de información, se encontraron antecedentes de las fuentes emisoras de arsénico asociados a los procesos, balances de masa, emisiones y metodologías.

Tabla 3-3 Resumen de información sistematizada de emisiones de arsénico

Fundición	Periodo con información disponible	Años totales con información disponible
Chuquicamata	1993-2010, 2014-2020	28
Altonorte	2004-2020	17
Potrerrillos	2014-2020	7
HVL	2014-2020	7
Ventanas	2005, 2008-2020	14
Chagres	2004-2020	17
Caletones	2014-2020	7

Nota: se considera como año con información disponible si al menos un mes de dicho año cuenta con información

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-3 se aprecia la cantidad de años en donde se encuentran datos de emisiones proveniente de los balances de masa, por fundición. De esta manera, se nota la disponibilidad y sistematización del periodo 2014-2020 para todas las fundiciones, además, se observa que Caletones, HVL y Potrerillos son las que cuentan con los menores tiempos de registro de emisiones sistematizadas. Por otro lado, es importante señalar que esto corresponde a los años en los cuales se identificó información para por lo menos un mes, por lo que no necesariamente están los datos del año completo.

3.1.3 Fundiciones de cobre: Brechas de información identificadas y propuesta de estimación

Tras el procesamiento de la información (ver resultados en Sección 3.1.4), se identificaron brechas relacionadas a la estandarización, comparación, periodos disponibles y valores particulares.

En primer lugar, cabe destacar, que para años anteriores al año 2017, no hay una estandarización de los formatos ni indicadores disponible entre las distintas fundiciones. Esta falta de estandarización dificulta el procesamiento de información comparable entre fundiciones, impidiendo muchas veces contar con información en detalle que permita realizar el seguimiento de la información y, por lo tanto, aumentando la incertidumbre respecto a la comparabilidad de valores entre fundiciones. Por lo demás, si bien se contaba con los lineamientos del DS 165/1998 (MINSEGPRES, 1998), su implementación era ad-hoc a cada fundición existiendo incertidumbre respecto de si se pueden comparar los resultados. La aplicación de la norma de emisión, y los lineamientos entregados por el protocolo de balance de emisiones, vinieron a solucionar la

mayor parte de esta problemática. Si bien el protocolo ha sido una contribución relevante, y al observar los reportes del periodo 2017-2020 se observa que se ha avanzado en la uniformización de la forma de reportar la información, aún existe espacio para mejorar en estandarización, observándose variaciones, por ejemplo, en el detalle temporal reportado mensualmente²¹. Asimismo, se observan inconsistencias puntuales donde se referencian valores de meses que no corresponden. La estandarización, así como la sistematización y procesamiento de los datos podría ser más eficiente y robusta, en caso de implementarse una plataforma única para el reporte de estos datos. Lo anterior contribuye no sólo a un mejor y oportuno acceso a la información, sino que también contribuye a la transparencia y confiabilidad del problema.

Por otro lado, una brecha especialmente preocupante, consiste en los recurrentes resultados del balance de arsénico que arroja emisiones negativas mensuales en los reportes técnicos. En particular, esto sucede para dos fundiciones (ver Tabla 4-4): HVL y Potrerillos. Los valores negativos de emisiones no sólo carecen de sentido físico, sino que afectan la confiabilidad de los resultados positivos. También, es importante mencionar que estas irregularidades tienen consecuencias en otros indicadores, tales como la captación y fijación del contaminante²² y la intensidad de emisión²³, mientras el primero resulta en que las tasas de captura y fijación del arsénico supera el 100%, el segundo resulta en valores negativos.

Tabla 3-4 Número de meses y promedio de emisiones negativas

Fundición	Indicador	2017	2018	2019	2020	Total
HVL	N° meses	1	3	6	2	12
	Media Emisión As (ton/mes)	-0.90	-2.30	-1.66	-3.21	-2.01
Potrerillos	N° meses	-	1	3	2	6
	Media Emisión As (ton/mes)	-	-6.06	-17.64	-28.05	-19.18
Total N° meses		1	4	9	4	18
Media Emisión As (ton/mes)		-0.90	-3.24	-6.98	-15.63	-7.73

Fuente: Elaboración propia en base a información provista por SMA

Si bien en su artículo 22° el Decreto 165/1998 (MINSEGPRES, 1998), referenciado por la norma de emisiones, considera la alternativa de que las emisiones estimadas por balance pudieran resultar negativas en un periodo puntual, llama la atención lo frecuente que ha sucedido y que se hayan concentrado en solo dos fundiciones. El mismo artículo establece que si durante 3 meses seguidos una fuente emisora presentara resultados netos negativos, se requerirá una auditoría externa, los cuales debieran tener resultado en 2 meses desde la fecha de recepción por parte de la fuente emisora.

²¹ Por ejemplo, algunas fundiciones reportan en el balance mensual los resultados de todos los meses del año hasta la fecha, mientras que otras sólo reportan el mes que se está declarando.

²² Calculada como la unidad menos las emisiones de arsénico dividido las entradas totales de arsénico en un periodo determinado.

²³ Entendido como las emisiones de arsénico divididas como el total de cobre producido.

En el periodo observado, sólo HVL presentó esta situación obteniendo valores negativos en el periodo diciembre/2018 a febrero/2019 y nuevamente entre abril/2019 y julio/2019. Si bien, en la auditoría externa se identificaron los problemas de la aplicación de la metodología de balance de masa, de acuerdo con entrevista con la SMA²⁴, sólo a partir de septiembre 2020 se lograron implementar las mejoras necesarias. En el periodo entre los primeros tres meses consecutivos y la implementación de las soluciones, marzo/2019 a agosto/2020, hubo un total de 18 nuevos reportes de HVL, de los cuales 6 resultaron valores negativos.

Respecto a lo anterior, si bien el artículo 22° establece como requisito para la auditoría externa²⁵ los 3 meses consecutivos de balances negativos, también establece que ante balances negativos la autoridad competente puede solicitar mayores antecedentes a la fuente emisora, instancias que fueron utilizadas por la SMA, y que también contribuyeron para lograr una solución al año 2020. A modo de ejemplo, en el año 2019 hubo requerimientos de información por parte de la Superintendencia previos a la auditoría externa a la fundición HVL, solicitando justificaciones para las desviaciones de los resultados obtenidos, ajustes metodológicos y antecedentes relacionados.

En los resultados de la auditoría a HVL se concluye que el documento metodológico del balance de masa de arsénico y azufre de la fundición HVL, aprobado por la SMA²⁶,

“... debe adecuarse a las condiciones actuales de Fundición Hernán Videla Lira. Por ejemplo, actualizar el algoritmo de cálculos, unificar los nombres de las corrientes de entrada, salida y acumulaciones en los balances de masa de arsénico, azufre y cobre” (Servicios Mineros SpA, 2019).

El Informe de Auditoría Externa (Servicios Mineros SpA, 2019) presenta a continuación una serie de hallazgos respecto de la metodología y que resultan en balances de emisión no representativos de la operación de la Fundición Hernán Videla Lira. Entre estos, se encuentra que no se cumple con: la total trazabilidad en la asignación de corrientes en el balance másico, los algoritmos de cálculo, el criterio mínimo de incrementos, la naturaleza de las mediciones y procedimientos de muestreo, la metodología de análisis químico para concentrados con concentraciones de arsénico menores a 200ppm, consistencia de descripción de corrientes, desagregación de corrientes individuales, entre otras. En particular, una de las razones principales de la obtención de balances negativos, es la subestimación de las corrientes de

²⁴ Realizada en videoconferencia el día 07/09/2021 con participación de la contraparte de la subsecretaría del Medio Ambiente

²⁵ Vale destacar que, según la norma de emisión, en su artículo 13, anualmente se debe realizar una auditoría externa. A pesar de esto, los problemas con la metodología se arrastraron hasta agosto/2020.

²⁶ Mediante RE 280/2016 SMA.

entrada²⁷. También, se encuentra una situación particular, donde para diciembre del año 2017, la fundición se encontraba en huelga, pero realizó entregas de Ácido C desde el inventario, y también se generó efluente como consecuencia de vaciado y lavado de los equipos en plantas de ácido. En el mismo sentido, la fundición realizó una justificación técnica de los valores negativos del año 2019²⁸, donde explicó que los factores que influyen en que la captura de arsénico sea mayor a 100% son el aumento de inventario de circulantes, junto con una mayor generación de efluentes en plantas de ácido.

Luego, la fundición Potrerillos también ha acudido a auditorías, en las cuales se notan varias similitudes con los hallazgos encontrados en la fundición ENAMI. Entra ellos: la total trazabilidad entre los flujos declarados, la definición de corrientes en balance másico y la inconsistencia con los reportes de corrientes y muestreo. En particular, en el mes de mayo del 2019, se observa un sobre stock de los inventarios, lo cual está asociado al proceso de puesta en marcha en el mes mayo del 2019²⁹, que resulta en un balance de masa con resultado negativo. Dentro de los casos extraordinarios, se señala que para el 2018, se produjo una falla en la torre de absorción de la planta de ácido³⁰, que obligó a la detención de operaciones. Esto implicó un bajo nivel de fusión y una alta variación de inventarios circulante, por lo que el balance de emisión. Por otro lado, para el año 2019, se reporta un error en los inventarios (RE 1915/2020)³¹, debido a la omisión en la contabilidad de concentrado de flotación de escoria recirculada y venta de material efectuada. Respecto a lo reportado en el año 2020 a su vez se solicita aclaración técnica de las razones que explican las emisiones negativas de arsénico en los meses de enero y abril (RE 1974/2021 SMA). Al respecto la respuesta³² del titular fueron que, en el caso de enero, se debió a la detención de la fusión de concentrados durante la mayor parte del mes, que combinado con la variación de los inventarios producto de la continuidad operacional de la Planta de Flotación de Escoria, resulta en un balance negativo. Por su parte, el reporte de emisiones negativas de arsénico para abril 2020 responde a la venta de concentrados generados en la planta de flotación de escorias, lo cual resulta en un aumento de los flujos de salida.

Considerando que las emisiones correspondientes a la Fundición HVL previo a agosto 2020 no fueron obtenidas bajo la metodología de balances de masa aprobada mediante la Res. Ex. 1479/2021, dichas emisiones solo deben ser consideradas referenciales. En vista de esto, se propone una metodología para la reestimación de la emisión (ver anexo en Sección 10.2), con el objetivo de contar con una aproximación del nivel de emisiones de arsénico de la fundición HVL.

²⁷ Información reportada en Informe de Evaluación de la Conformidad, Servicios Mineros SpA. IEC-01-2018

²⁸ Justificación Técnica Captura As >100%, Balance Paipote, ENAMI, 2019.

²⁹ Informe mensual Fundición Potrerillos Mayo 2019 VF (RE 1915/2020)

³⁰ Informe Mensual DS 28/13, Fundición Potrerillos, enero/2018

³¹ RE 1915/2020 SMA señala la no conformidad y las acciones a tomar: incorporación de subinventario, rectificación inventario inicial y recálculo de balances año 2019.

³² Informe Respuesta RE 1974/2021 SMA- Fundición Potrerillos División Salvador Codelco (septiembre 2021)

3.1.4 Información proveniente del DS138/2005

El RETC compila y sistematiza la información declarada por ventanilla única en el marco del DS138/2005, presentando estimación de emisiones a nivel de fuente emisora. Estos resultados de estimación emisiones provienen de una estimación basada en factores de emisión y niveles de actividad, usualmente el consumo de combustible. Este método es aplicado de forma transversal a las decenas de miles de fuentes que registran año a año su operación en el RETC.

El método utilizado cuenta con varias fuentes de incertidumbre. Por un lado, el nivel de actividad es reportado por los mismos titulares de las fuentes, sin que exista un proceso de verificación. Lo anterior resulta en posibles errores u omisiones en el registro, tales como sobre o sub reporte del nivel real, asignación incorrecta del combustible o materia prima relacionada, entre otros. De la misma forma, el factor de emisión asociado se vincula por medio de un código de clasificación de fuentes, en este caso CCF8, el cual actualmente considera el tipo de proceso, la materia prima y combustible declarado. De esta forma, la asignación del factor de emisión por este método representa otra fuente de incertidumbre en la medida que es posible, especialmente para procesos poco frecuentes, que el CCF8 asignado no represente correctamente la operación de la fuente. Por lo demás, los factores de emisión, aun cuando son correctamente asignados, tienen una incertidumbre inherente que surge del hecho que se realiza una extrapolación de datos observados históricamente, cuyas condiciones de operación, características de combustible, o de las mismas fuentes pueden haber variado.

Para reducir la incertidumbre por de sub-reporte de fuentes, para el inventario se consideran todas las fuentes con estimación de emisiones de Arsénico para el año 2020, así como también las emisiones de Arsénico para el año 2019. Se realiza un análisis fuente a fuente, donde en el caso que se cuente con una emisión 2020 se considera este, y si no hay reporte 2020 se considera la emisión resultante del año 2019. La excepción corresponde a las fuentes cuyas emisiones son estimadas en el marco del DS28/2013, cuyas estimaciones se consideran menos inciertas que las emisiones del DS138/2005. Como resultado se obtiene un universo de 4.901 fuentes que, de acuerdo a la información del RETC, contarías con emisiones de Arsénico.

Una revisión de las emisiones del RETC resultó en tres tipos de hallazgos. Estos, junto con la forma en que se abordan, se presentan a continuación:

- Estimación de emisiones de arsénico no considera sistemas de abatimiento: Utilizando los factores de emisión asociados a los CCF8 imputados a cada fuente, se comprobó que la estimación reportada por el RETC no considera que sistemas de abatimiento de MP también tienen resultados en el abatimiento de las emisiones de arsénico. Dado los altos niveles de eficiencia de estos sistemas de abatimiento, no incluirlos resulta en una sobreestimación de las emisiones. Para ello se reestimaron las emisiones considerando la misma eficiencia de abatimiento de los sistemas de abatimiento de MP. Se destaca que las principales diferencias en término de masas ocurren en las centrales de generación eléctrica a carbón, las cuales, por la norma de termoeléctrica, cuentan con sistemas de abatimiento de alta eficiencia.

- Estimación de emisiones se escapan de los valores esperados para tipo de fuente: Al analizar los valores reportados se observa un subconjunto de fuentes clasificadas como calderas de agua caliente, las cuales tienen emisiones reportadas en RETC comparables a las emisiones de las termoeléctricas, en particular se identifican 4 fuentes detalladas en la Tabla 3-5. Un análisis de esto apunta a que se trata de un sobre reporte del nivel de actividad. Ante esto se consideran las emisiones de arsénico del año 2019 en lugar del 2020.

Tabla 3-5 Fuentes y establecimientos con emisiones reportadas de arsénico por sobre lo esperado

Establecimiento	Código de fuente
COMUNIDAD EDIFICIO SANTA FE	CA-OR-6798
COMUNIDAD CONJUNTO HABITACIONAL MARIA GABRIELA	CA-OR-17999
COMUNIDAD CONJUNTO HABITACIONAL MARIA GABRIELA	CA-OR-17995
COMUNIDAD CONJUNTO HABITACIONAL MARIA GABRIELA	CA-OR-18007

Fuente: Elaboración propia

- Errores puntuales en la estimación de emisión de arsénico: Un análisis en detalle de las emisiones de arsénico permite observar que para las fuentes que reportan combustión de gas natural el año 2020 presentan una sobre estimación de tres órdenes de magnitud respecto del valor estimado en el ejercicio 2019. Un análisis considerando el consumo de combustible reportado, permite identificar que el orden de magnitud correcto corresponde a las del 2019. En estos casos se considera la estimación 2019, por sobre la estimación 2020. Lo anterior aplica para los casos reportados en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6 Fuentes con sobre estimación de emisiones para el año 2020

Establecimiento	Código de fuente
METHANEX CHILE SA	IN-GEV-23969
METHANEX CHILE SA	IN-GEV-23977
METHANEX CHILE SA	IN-GEV-23992
METHANEX CHILE SA	IN-GEV-23987
ESSITY CHILE S.A.	IN-GEV-918
AGROINDUSTRIAL EL PAICO S.A.	IN-GEV-18261

Fuente: Elaboración propia

3.2 Inventario de emisiones

En base a la compilación de inventario de emisiones (ver Sección 3.1) se consolida el inventario para el año 2020, el cual se presenta en Tabla 3-7. Se observa que la estimación de emisiones de arsénico del año 2020 llega a 473 toneladas, concentrándose principalmente en las emisiones de las fundiciones de cobre, las cuales en términos porcentuales representan el 99,9% de las emisiones del país.

Es importante destacar que las mayores emisiones son estimadas siguiendo una metodología de balance de masa, la cual es explicada en detalle en la Sección 3.1.1. Esta metodología, de ser aplicada correctamente, permitiría contar con una estimación más precisa en la medida que considera características propias, no sólo de los procesos, sino también de la materia prima, combustibles, productos y co-productos. La metodología asume que la diferencia entre las entradas, salidas y cambios de las existencias corresponden a las emisiones. Este enfoque puede ser considerado como conservador en la medida que asigna la totalidad de la fracción desconocida del balance de masa a emisiones.

En contraste con los de una estimación siguiendo un enfoque de factor de emisión como el recomendado por la agencia europea del medio ambiente, el balance de emisiones resulta en una estimación 12 veces mayor que el valor más alto del rango del factor de emisión recomendado³³ (EMEP/EEA, 2019). Lo anterior valida que la estimación por medio de balance de masa en su formato actual resulta en estimados conservadores en comparación con otros métodos.

Tabla 3-7 Inventario de estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020

Tipo de fuente	Fuente	Emisiones As [ton/año]	Origen de estimación de emisiones
Fundiciones	Fundición Chuquicamata	180,8	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Altonorte	117,8	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Potrerillos	(1) 51,0	Balances de masa DS28/2013
	Fundición HVL	(2) 18,7	Reestimación basado en intensidad de emisiones
	Fundición Ventanas	28,4	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Chagres	8,6	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Caletones	67,0	Balances de masa DS28/2013
Planta Tostación	Ministro Hales	0,0	(4) Medición isocinética de planta de ácido.
Otras Fuentes	Termoeléctrica	(3) 0,24	Reestimación a partir de RETC DS138/2005
	Otras fuentes	(4) 0,38	Reestimación a partir de RETC DS138/2005
Total		473,0	

- (1) Emisiones reportadas las cuales consideran dos meses con emisiones reportadas negativas. De no considerar estas emisiones el estimado es 107,1 ton.
- (2) Reestimación basada en intensidad de emisiones considerando reportes del titular a ENAMI en el periodo oct2020 a sep2021. Las emisiones reportadas hasta agosto 2020, registran dos meses con valores negativos y fueron estimadas con una metodología que no se ajusta totalmente a la metodología que se encuentra aprobada bajo la Res. Ex. 1479/2021 SMA. El titular presentó una versión revisada a las SMA para el año 2020 con emisiones referenciales de 12,9 ton.
- (3) Originalmente RETC presenta estimaciones más altas, la diferencia se explica principalmente por la reestimación considerando eficiencia de abatimientos, y problemas puntuales solucionado tal como se detalla en la Sección 3.1.4.
- (4) La planta de tostación Ministro Hales no se encuentra afecta a límite máximo de emisión anual de As.

Fuente: Elaboración propia en base a origen de estimaciones reportadas

³³ Factor de emisión *Tier 1*, equivalente a 27 gr Arsénico por tonelada de cobre producida, lo cual considerando las 1320 kton de cobre fino producidas, resulta en cerca de 38 ton anuales de emisión de arsénico.

Otra consideración que también apunta a que la estimación por medio de balances de emisión es una estimación conservadora, es la concentración de arsénico en las emisiones de las plantas de ácido y de los hornos de limpieza de escoria, que de acuerdo a la Norma vigente (DS28/2013 del MMA), deben medir y reportar mensualmente, de acuerdo al método CH-29³⁴ aprobado por el MINSAL. Dentro de los datos operacionales registrados por este método, los cuales son reportados a la SMA, se puede contar con un estimado por hora de las emisiones de arsénico, y considerando las horas de operación se puede estimar las emisiones mensuales. La suma de estas emisiones para el año 2020 alcanza las 2,84 toneladas de arsénico para las 7 fundiciones (ver Tabla 3-8). Vale la pena destacar, que existirían posibles emisiones puntuales de arsénico para las cuales actualmente no se cuenta con estimación, notablemente los hornos de refinación, y los sistemas de captura secundarios de emisiones fugitivas.

La fundición con mayores emisiones puntuales dentro de las fuentes actualmente reguladas para arsénico corresponde a Caletones, lo que se debe a que es la fundición de mayor tamaño y presenta un mayor factor de planta para el año 2020. Sin embargo, si se realiza un control de la cantidad anual procesada, las emisiones puntuales de Chuquicamata y Potrerillos superan a las de Caletones. Estas dos fundiciones son las que siguen a Caletones en la cantidad de emisiones puntuales, lo que se explica por el contenido de arsénico en el concentrado procesado y las tecnologías utilizadas.

³⁴ “Determinación de emisión de metales desde fuentes fijas”

Tabla 3-8 Estimación de emisiones de arsénico [ton/año] por chimenea con regulación de As en la actual norma, año 2020

Fuente	Chimenea	Concentración [mg/Nm ³]	Caudal [Nm ³ /hr]	Tasa emisión [gr/hr]	Operación [horas]	Emisiones reportadas chimeneas [ton/año]
Fundición Chuquicamata	Planta de Ácido 3	0,49	121.991	57,70	6.003	0,32
	Planta de Ácido 4	0,45	118.790	54,01	5.213	0,28
Planta de Tostación Ministro Hales	Planta de Ácido Sulfúrico	0,03	94.092	3,22	7.083	0,02
Fundición Altonorte	Planta de Ácido 1	0,01	177.431	1,88	8.226	0,02
	Planta de Ácido 3	0,05	200.862	9,42	8.032	0,08
Fundición Potrerillos	Planta de ácido	0,41	196.336	80,06	6.807	0,55
Fundición HVL	Horno de Limpieza de Escoria	(1) 0,35	27.615	9,60	8.670	0,08
	Planta de Tratamiento de Gases de Cola	0,03	127.996	4,01	8.086	0,03
Fundición Ventanas	Horno de Tratamiento de Escoria	0,33	39.001	17,34	7.357	0,09
	Planta de ácido	0,29	99.033	28,82	7.771	0,22
Fundición Chagres	Horno de Limpieza de Escoria	0,68	61.027	41,40	8.784	0,36
	Planta de ácido	0,05	150.917	6,92	8.599	0,06
Fundición Caletones	PLG-1	0,27	173.707	7,05	8.537	0,40
	PLG-2	0,16	272.360	43,54	8.350	0,36
Total						2,88

(1) No considera concentraciones reportadas de marzo 2020 (13,45), pues muestre fue ejecutado bajo una condición operacional no normal del horno. Dicha medición se reemplaza por la media de los demás meses.

Fuente: Elaboración propia en base a mediciones isocinéticas reportadas por titulares a la SMA

Por las características en que se emite el arsénico, todas las emisiones cuantificadas corresponden a emisiones de fuentes fijas con el arsénico proveniente de la combustión de la materia prima y/o combustibles asociados. De esta forma, las emisiones son clasificadas como puntuales en su origen, aunque gran parte de ellas ocurren como fugitivas.

La distribución de las emisiones del balance se puede observar en la Figura 3-2, donde se observa que el 99,9% de las emisiones inventariadas provienen de las 7 fundiciones. De ellas dos fundiciones en conjunto superan el 63% de las emisiones a nivel nacional: la fundición Chuquicamata (38,2%) y fundición Altonorte (24,9%). La fracción restante se divide entre fundición Caletones (14,2%), Potrerillos (10,8%), Ventanas (6,0%), Hernán Videla Lira (3,9%) y Chagres (1,8%).

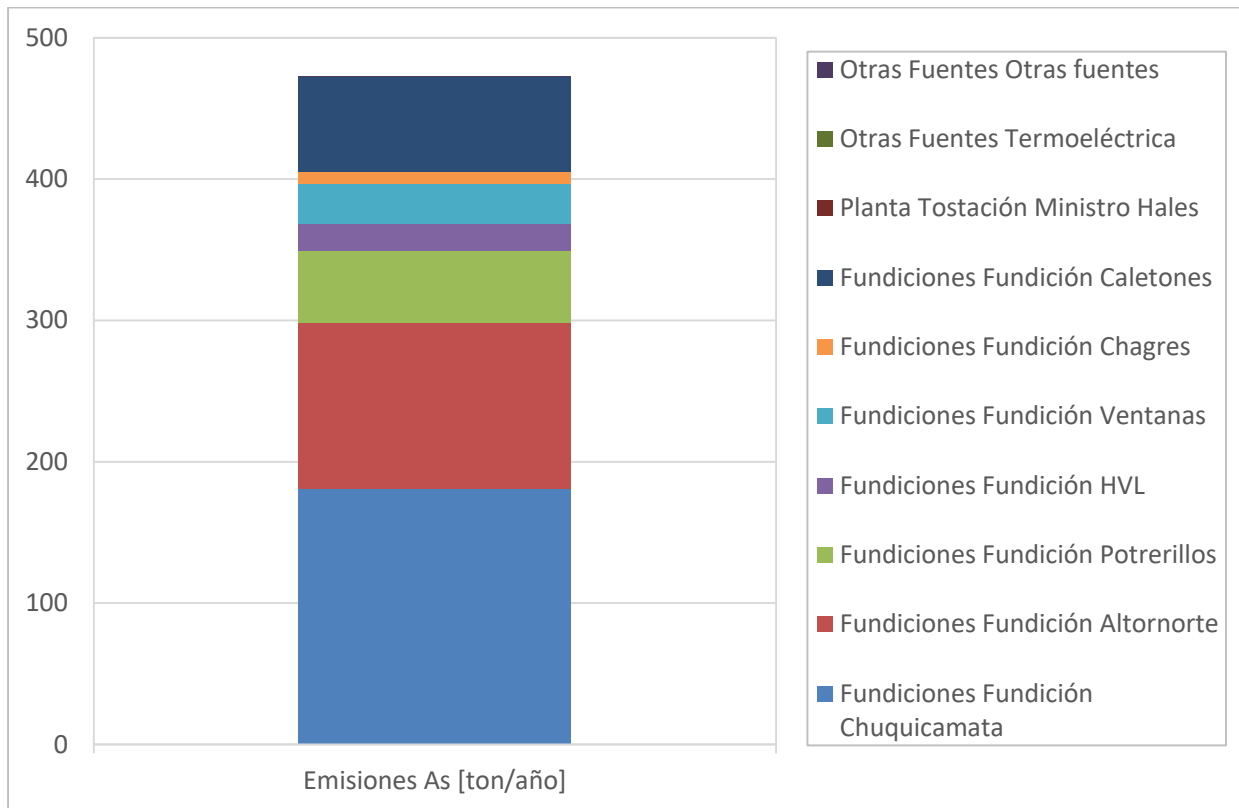
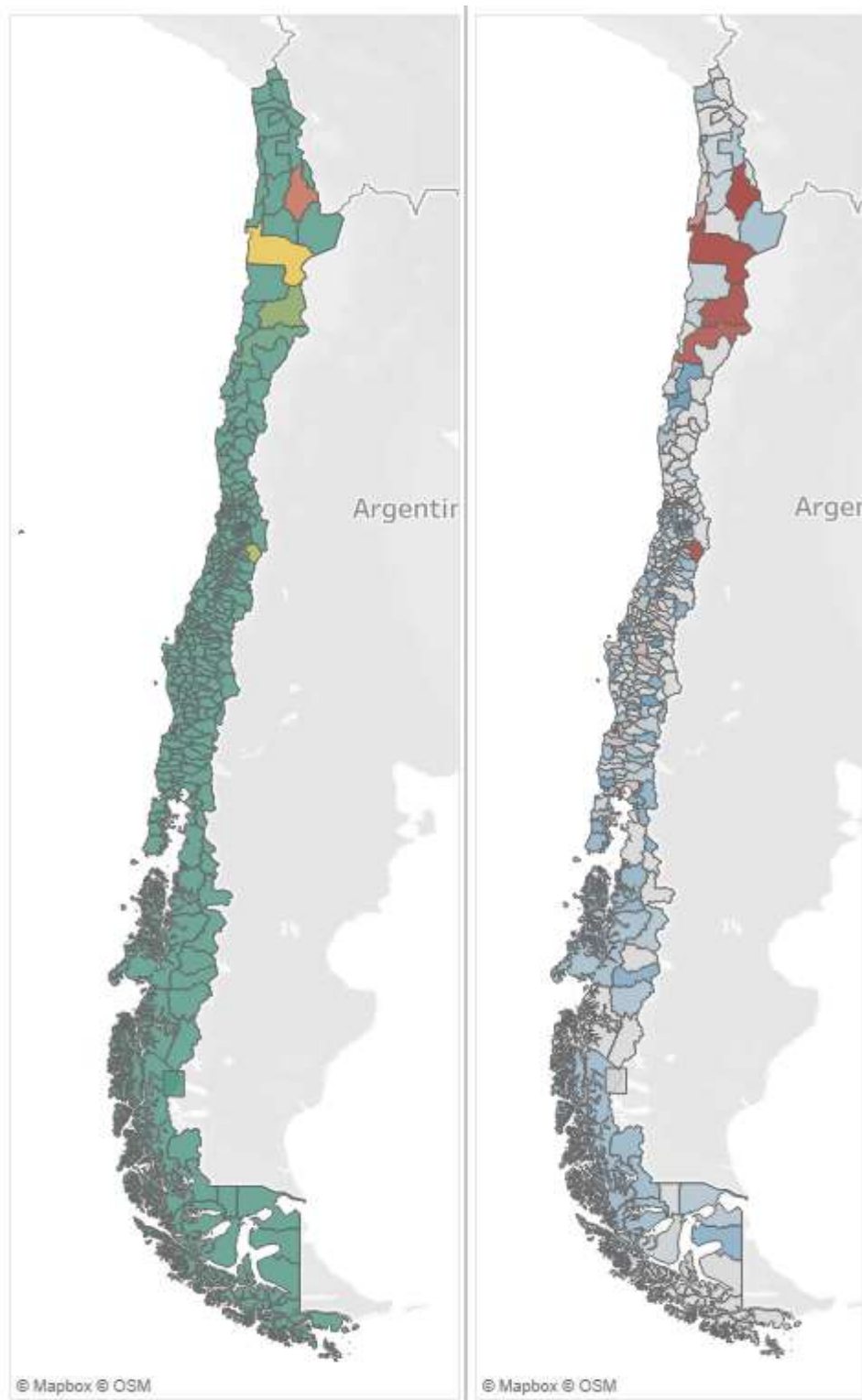


Figura 3-2 Estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020 según fuente

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-3 se presenta la distribución de las emisiones a nivel territorial. En el primero de los mapas se presentan la distribución lineal de las emisiones, que permite identificar que dado el amplio rango que hay entre las fundiciones y el resto de las fuentes, e incluso entre las fundiciones, permite identificar las comunas donde se ubican las fundiciones: Calama (Chuquicamata), Antofagasta (Altonorte), Machalí (Caletones), Diego de Almagro (Potrerillos), Puchuncaví (Ventanas), Copiapó (Hernán Videla Lira) y Catemu (Chagres). Adicionalmente se identifican emisiones en 234 otras comunas del país, pero que en su conjunto representan el

0,1% de las emisiones nacionales. En la segunda figura se presentan las mismas emisiones, pero en escala logarítmica, lo cual permite distinguir de mejor manera aquellas comunas con un menor nivel de emisiones, sin perder de vista su comparación con el nivel de emisiones de las fundiciones. Entre ellas destaca, por ejemplo, Mejillones a causa de las centrales termoeléctricas a carbón instaladas en la zona.



Nota: Mapa de la izquierda en escala lineal de verde (valor más pequeño) a rojo (valor más alto). Mapa de la derecha en escala logarítmica de azul (valor más pequeño) a rojo (valor más alto)

Figura 3-3 Emisiones de arsénicos en escala lineal y logarítmica por comuna

Fuente: Elaboración propia

3.3 Análisis de inventario: Fundiciones

Si bien en la Tabla 3-2 se presenta una primera descripción de las emisiones de Arsénico, en el presente apartado se describen las emisiones de las principales fuentes de emisión: las fundiciones de cobre. Para eso se presenta cada fundición individualmente, esto, a través del diagrama de procesos y flujos con el cual se genera el balance de masa, junto con una tabla de las unidades que tiene la fundición, obtenidos de la última auditoría disponible de propuestas de metodología de balances, por fundición. También, se incluye un diagrama de corrientes del último año disponible y las emisiones. Estos últimos, corresponden a diagramas de cascada y diferencian corrientes de entrada y de salida, plasmando la contribución a la emisión de arsénico por corriente de la fundición, en un periodo anual. Para efectos prácticos, se identifican, pero no se incluyen las corrientes que tienen un valor de finos de arsénico nulo o cercano a cero.

Respecto a los valores de las emisiones anuales, estas son obtenidas desde los informes presentados a la SMA. Es importante destacar que, dada la ausencia del nivel de detalle requerida antes de la aplicación de la norma de emisión para Fundiciones y fuentes emisoras de arsénico (DS. 28/2013 MMA) balances de masa, no hay información disponible para todos los años anteriores acerca del material de limpieza, el cual tiene una contribución para rebajar el valor de emisión anual reportada. En este sentido, solo se tiene certeza de la inclusión de este valor para el periodo 2017-2020. Todos los valores de emisiones anuales presentados, consideran la remoción de este material cuando es declarado por la fundición.

Además, se presentan los comportamientos por fundición de indicadores relevantes mensuales y anuales³⁵ en el periodo 2017-2020. Estos, tales como la intensidad de emisión, calculado a través de la proporción de los gramos de arsénico emitidos y los finos de cobre, y también la captura y fijación de arsénico, obtenido a través de la proporción porcentual del arsénico emitido y la corriente de entrada. Los valores mencionados reflejan la relación entre la capacidad productiva y control de emisiones en el balance de masa.

Para finalizar, en la Sección 3.3.8 se presenta un análisis comparativo de las fundiciones y sus emisiones de arsénico según diferentes indicadores considerados relevantes, y que buscan dar antecedentes para la mejor comprensión de la problemática de las emisiones.

3.3.1 Fundición Chuquicamata

La Figura 3-4 presenta un diagrama del proceso de operación de la fundición de Chuquicamata. Salvo para el concentrado de cobre y las calcinas, el diagrama simplifica las operaciones de la fundición, sin asignar las corrientes a los diferentes procesos. Es relevante destacar que en el marco de la norma de emisión la fundición Chuquicamata realizó modificaciones relevantes a su

³⁵ Los promedios anuales son calculados a través de los valores acumulados anuales necesarios.

operación, eliminando el Convertidor Teniente que hasta el 2018 operaba en paralelo al Horno Flash.

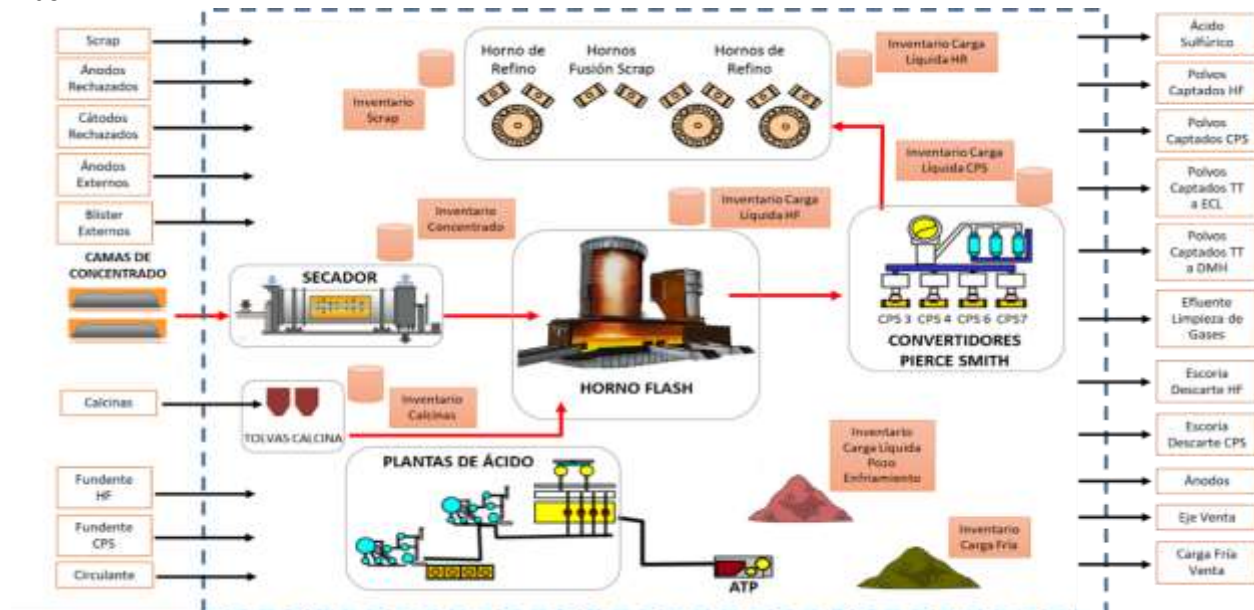


Figura 3-4 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Chuquicamata

Fuente: Elaboración propia en base a 2019 planillas técnicas, letra m)

La fundición Chuquicamata cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-9. Como se dijo anteriormente, se destaca el hecho de que, a diferencias de la situación previa al 2018, hoy en día Chuquicamata no cuenta con un convertidor teniente en paralelo al horno flash.

Tabla 3-9 Equipos e instalaciones principales de fundición Chuquicamata

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Secador N°5	1	160 [t/h]
Secador a Vapor N°6*	1	207 [t/h]
Horno Flash	1	3000 [t/día]
CPS N°3, 4 y 6	3	250 [t/día]
CPS N°7*	1	250 [t/día]
Horno de Refino	4	250 [t/día]
Horno de Refino	2	350 [t/día]
Horno de Fusión Scrap	2	250 [t/día]
Planta de Ácido Sulfúrico*	2	2085 [t ³ /día]
ATP*	1	88 [m ³ /h]

Fuente: Elaboración propia en base a metodología de 2019 aprobada por la SMA

Es importante destacar, que hay varias unidades instaladas en el periodo 2017-2019, entre las cuales se encuentra un Convertidor Pierce Smith, Planta de Ácido Sulfúrico, ATP y un Secador de Vapor. Este último, comenzó su funcionamiento en Julio de 2020.

A nivel operacional, la Figura 3-5 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”³⁶ de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la sección 3.1.1.

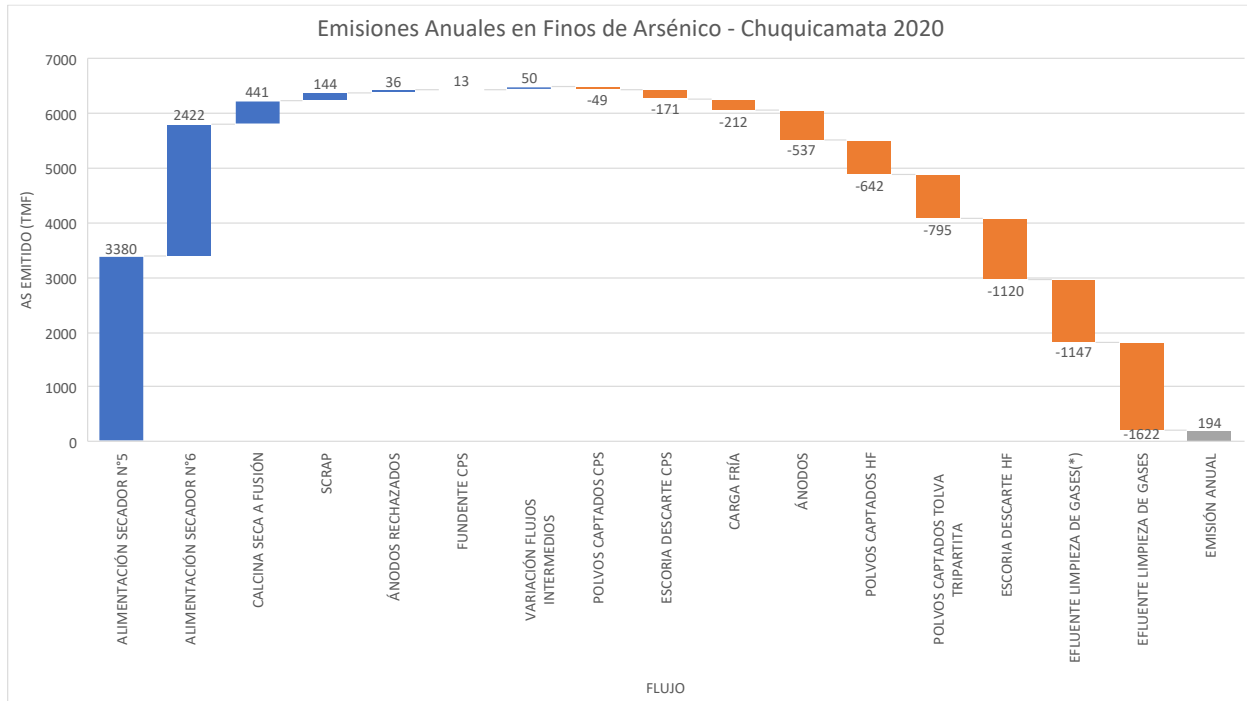


Figura 3-5 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Chuquicamata 2020

Fuente: Elaboración propia en base a datos de reportes mensuales

En la Figura 3-5 se puede ver que en la fundición Chuquicamata, el año 2020 las únicas entradas considerables provienen de los Alimentador de los Secador N°5 y N°6, así como las calcinas secas que entran directo al horno de fusión. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución en más corriente, donde se destaca el Efluente de la limpieza de gases, Escoria de descarte, Polvo captados en Tolva Tripartita, Polvos captados HF y Ánodos.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula como la diferencia entre la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. Además, se debe mencionar que se reportan otros flujos que no aparecen en esta gráfica, pero cuyos valores son cercanos a 0.

³⁶ Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

En la Figura 3-6 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

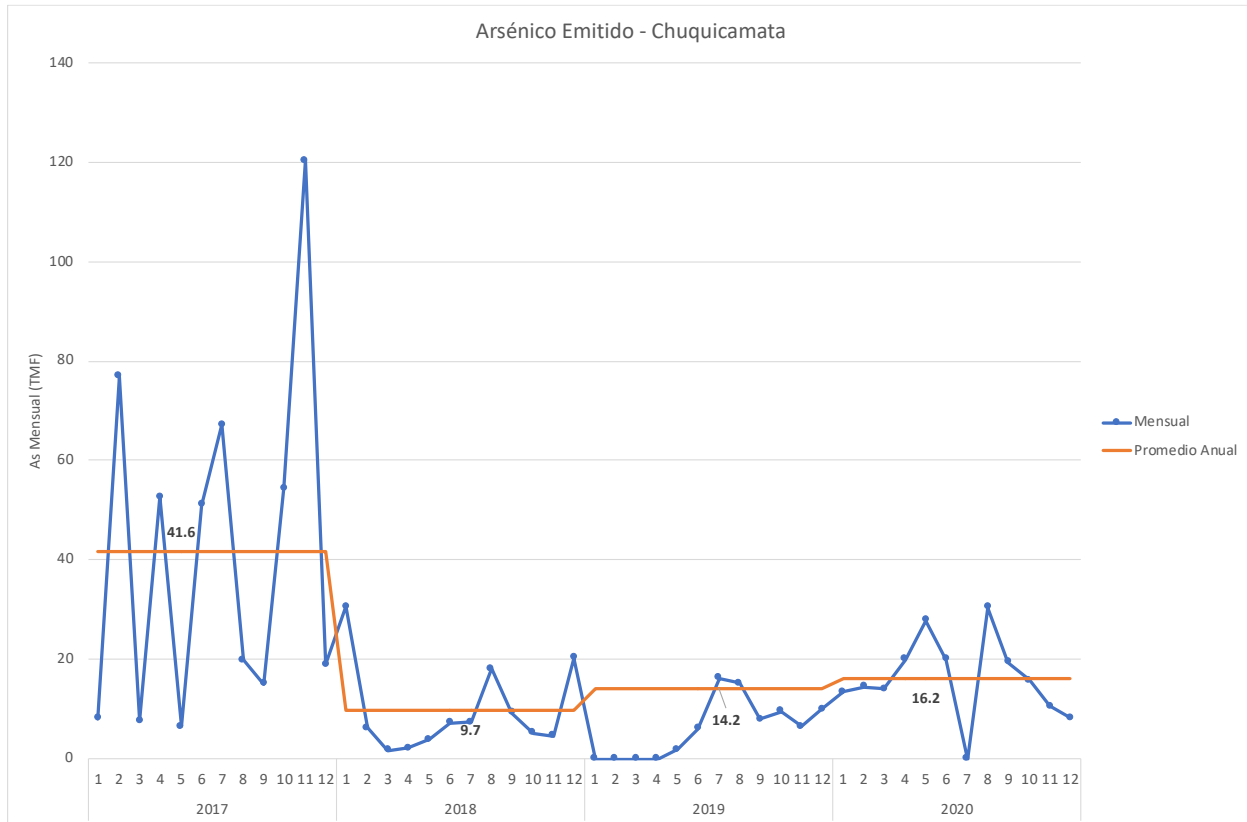


Figura 3-6 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual

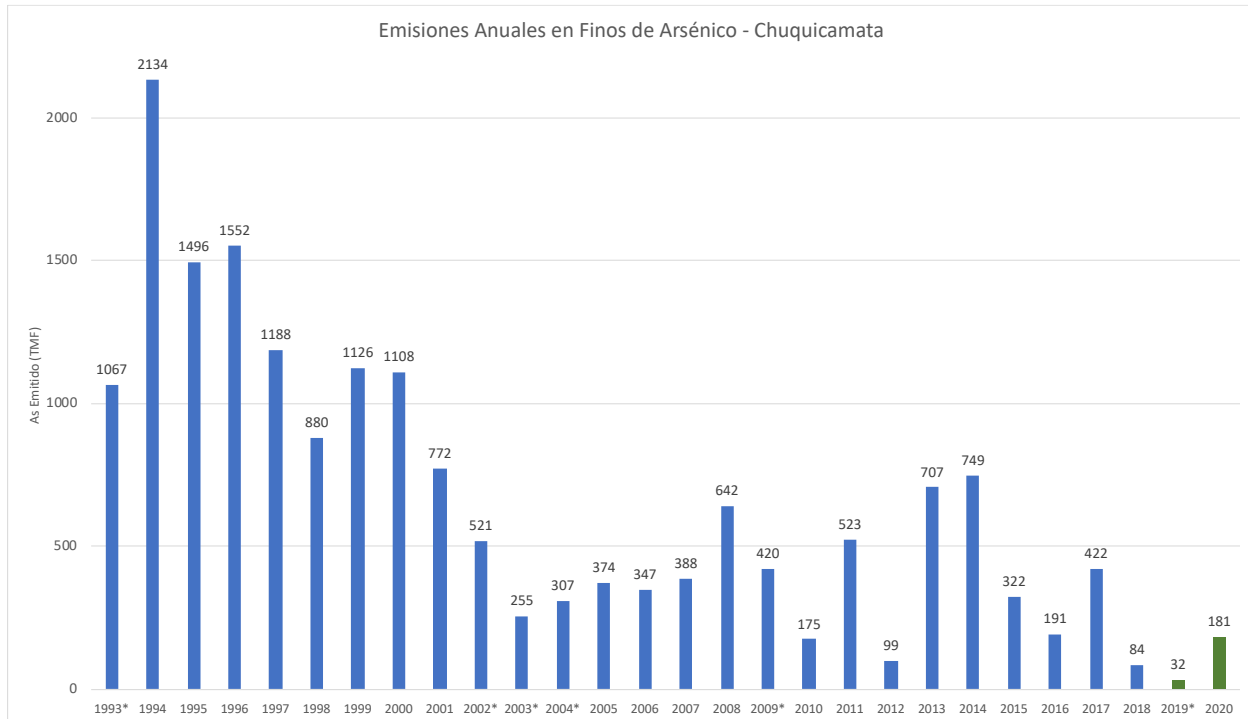
Fuente: Elaboración propia en base a datos de reportes mensuales

Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que van desde valores cercanos a 0 [TMF/mes] hasta aproximadamente 30 [TMF/mes]. En particular se destacan la paralización de la actividad de la fundición durante los primeros meses de 2019, que responden a los ajustes operacionales de la Fundición para dar cumplimiento a los límites de emisión establecidos en la norma de emisión y en julio/2020 que responde a una paralización en el marco de la pandemia de Covid-19. A nivel anual, se observa una operación bastante estable para el periodo 2018-2020, con una gran baja en comparación al año 2017. Los promedios anuales resultantes de los balances de masa van desde las 9.7 [TMF/mes] en el año 2018 a 41,6 [TMF/año] en el año 2017.

Lo anterior contrasta con las emisiones anuales que se observan en la Figura 3-7. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las

emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza (ver Ecuación 4 en la Sección 4.1.1).

Es destacable que los resultados de emisiones de arsénico, desde el año 2015 cumplen con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Chuquicamata se establece un límite de 476 ton/año de emisión.



* años en que al menos un mes la fundición no determinó valores de emisión mensual mediante balances de masa. Para el año 1993, se tienen datos entre agosto-diciembre. Luego, cabe destacar, que para el periodo 2002-2004, los valores negativos no fueron contabilizados como tales, sino que como emisión cero. Luego, para el año 2009, si se reporta emisiones con valores negativos.

Figura 3-7 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Chuquicamata, 1993-2020

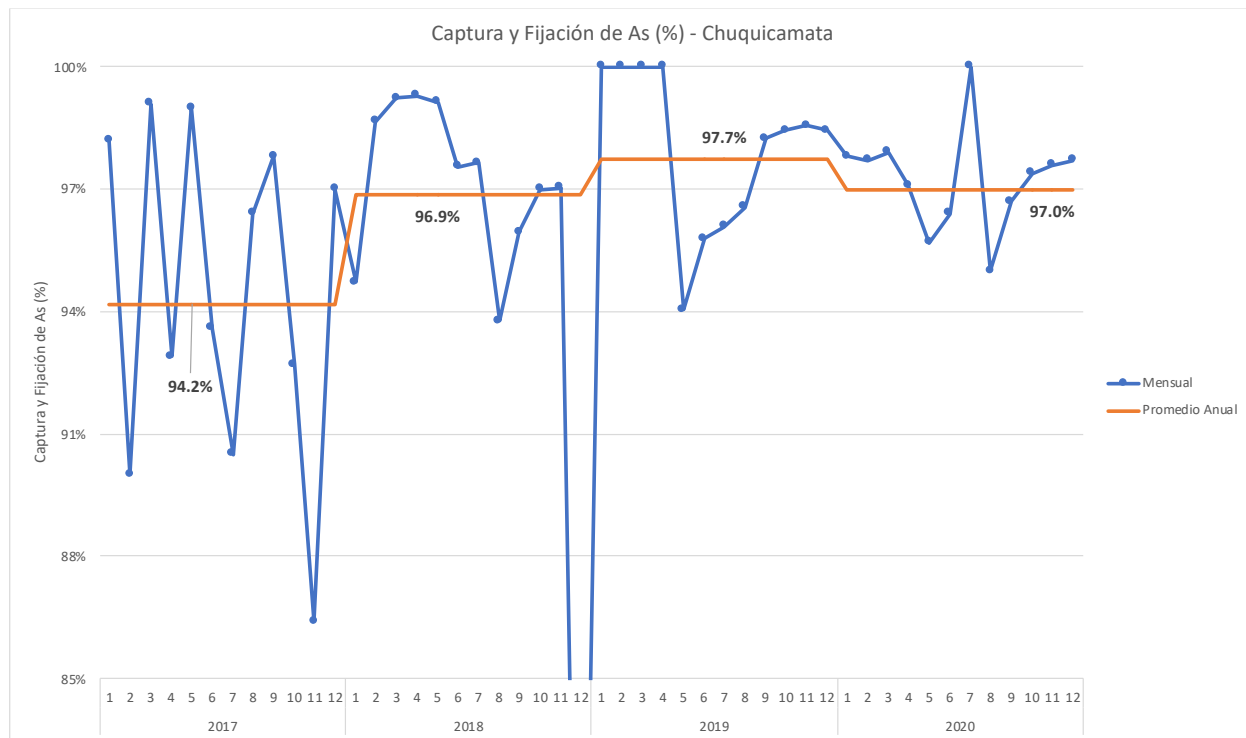
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y datos compilados por la SEREMI de Antofagasta.

Respecto a la información disponible para años previos a la aplicación del protocolo, se presentan las emisiones anuales reportadas por la fundición para los periodos 1993-2010³⁷, y luego para 2014-2020. Dada la amplia extensión del periodo, se encuentran algunas particularidades y diferencias en la forma de registro. En ese sentido, el periodo de 2002-2004, los valores que arrojaron una emisión negativa eran informados como nulos (0 [TMF/mes]), lo cual es una diferencia con la metodología aplicada por la norma, la cual los incluye en el balance de emisión anual. En relación a lo anterior, para los años 2009 y 2010 esto se corrigió, incluyendo los valores

³⁷ Los datos son obtenidos de una compilación realizada por la SEREMI de Antofagasta (Emisiones Arsénico_Codelco.xls), la cual solo contiene datos de emisiones de arsénico mensuales, sin informe de metodología asociado.

negativos como tal. Además, por otro lado, cabe destacar que los años 1993, 2010 y 2019 no cuentan con los datos de todos los meses del año. En específico, para el año 2019, la fundición Chuquicamata se encontró detenida durante los meses entre enero y abril, de ahí su baja tasa de emisión.

De forma complementaria, en la Figura 3-8 se presenta los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Chuquicamata. La estimación considera la proporción entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto, la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Se observa que desde 2018 habría superado dicha tasa de captura y fijación, manteniendo una tasa de captura anual superior a los 94,2% de 2017, oscilando entre 96,9% y 97,7%. Desde el punto de vista numérico, se puede observar una notoria variabilidad del índice mensual entre los años 2017 y 2018, y que tras los ajustes ocurridos durante los primeros meses del 2019 se presentan valores mensuales más estables.



Nota: Cabe mencionar, que el eje de las abscisas se fija entre 85% y 100% para la comparación entre las fundiciones. Se excluye de la visualización el valor 70.7%, correspondiente a diciembre/2018.

Figura 3-8 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Chuquicamata, 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-9 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los

anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Más allá de las variaciones mensuales se nota una disminución en intensidad desde el 2018, la cual se ha mantenido baja con leve tendencia al aumento desde entonces. Lo anterior permite, por ejemplo, concluir que la diferencia entre las emisiones anuales entre los años 2019 y 2020 que aumentaron en un 165% se debió principalmente al aumento del nivel de actividad, el cual se vio afectado por la paralización de la fundición durante los primeros cuatro meses del año 2019. Lo anterior toda vez que la tasa de emisión unitaria aumento sólo un 37%.

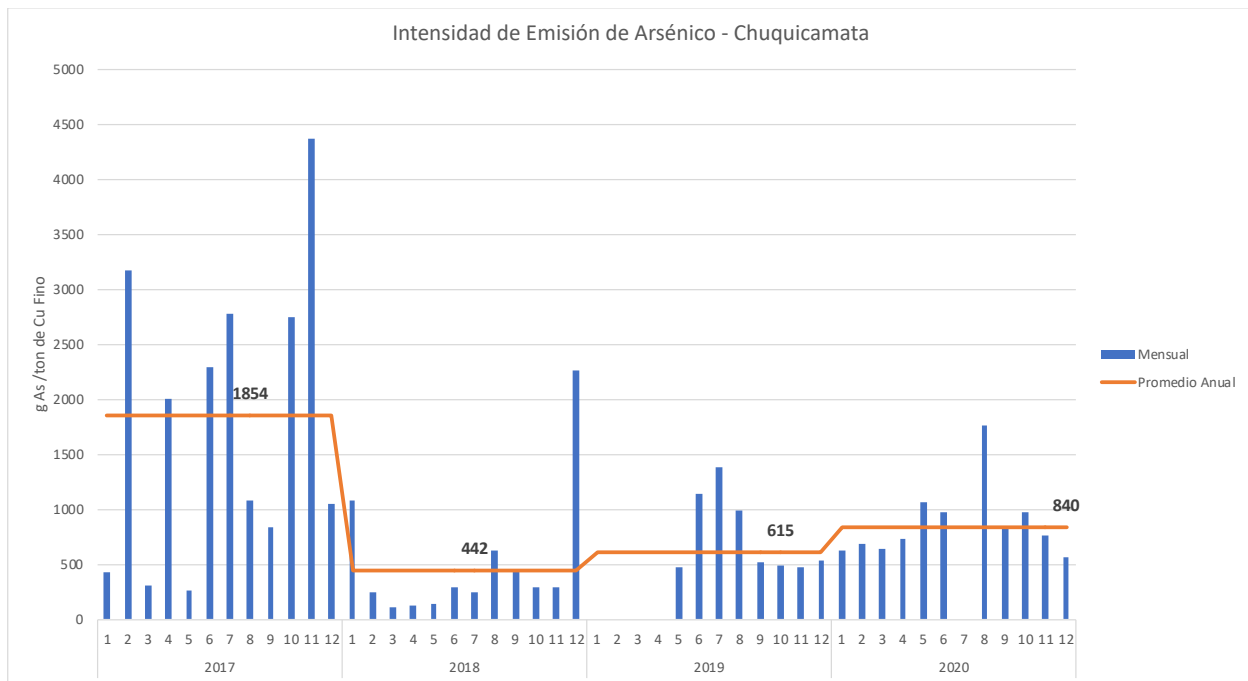
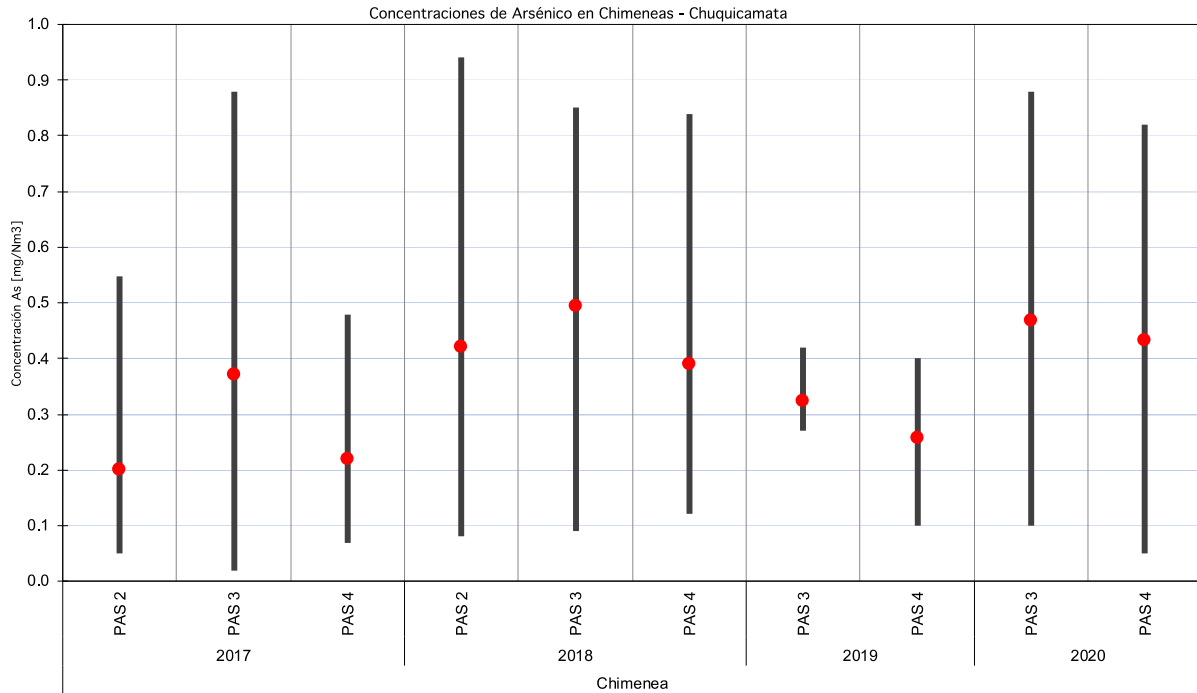


Figura 3-9 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Chuquicamata, periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

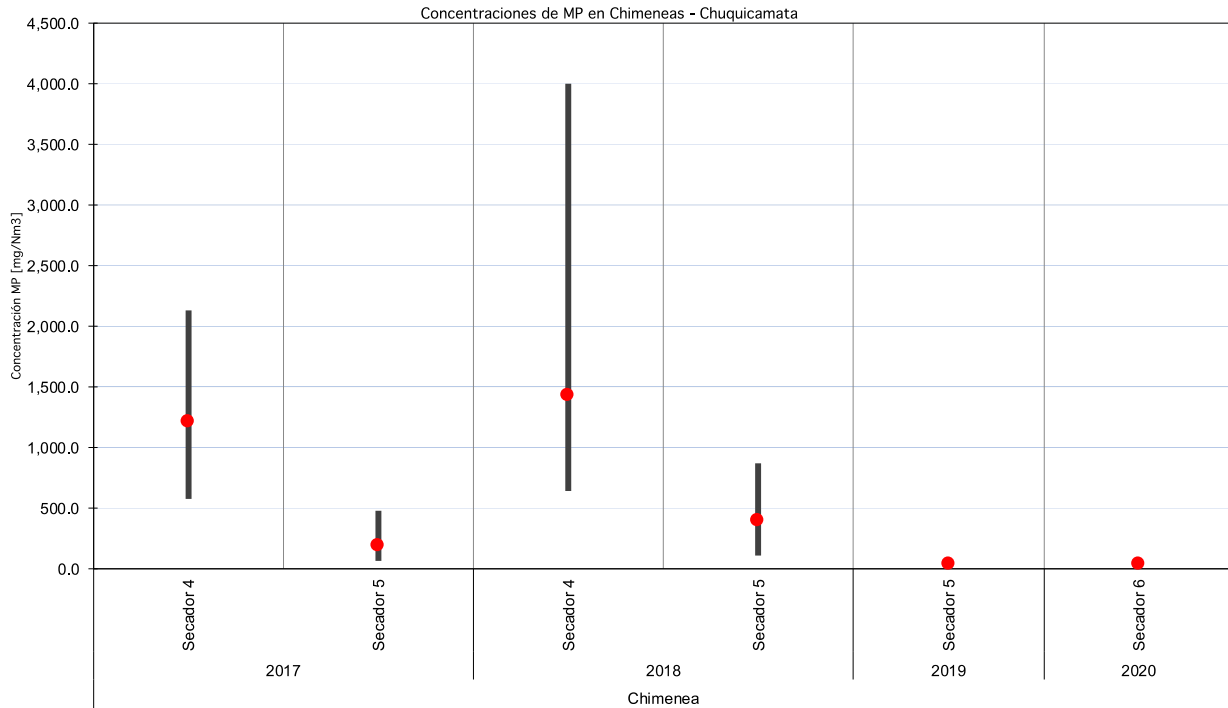


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-10 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chuquicamata 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-10 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Chuquicamata presenta datos para tres plantas de ácido sulfúrico en los años 2017 y 2018, y para dos plantas en los años 2019 y 2020. Se puede observar que no se ha superado el límite de emisión de 1 [mg/Nm³] de As en ni una de las mediciones efectuadas, donde se ha superado el umbral de los 0,9 [mg/Nm³] de As en una ocasión. Además, se han registrado mínimos de 0,012 [mg/Nm³] de As.



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-11 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chuquicamata 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-11 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Chuquicamata presenta datos para dos chimeneas de secadores en los años 2017 y 2018, y para el Secador 5 en los años 2019 y 2020. Se puede observar que hay alta variabilidad de datos, con un máximo de 4000 [mg/Nm³] de concentración de material particulado, correspondiente a mediciones en el Secador 4 en septiembre/2018. En los años 2019 y 2020, los valores cumplieron con las exigencias.

3.3.2 Fundiciones Altonorte

La fundición Altonorte, se compone de una serie de procesos unitarios interconectados de forma compleja según se presenta en la Figura 3-12. En dicha Figura, se observa que las diferentes entradas y salidas del sistema se relacionan con diferentes procesos y, por lo tanto, la relación entre ellos es compleja al ser mediada por los procesos unitarios propios de la fundición.

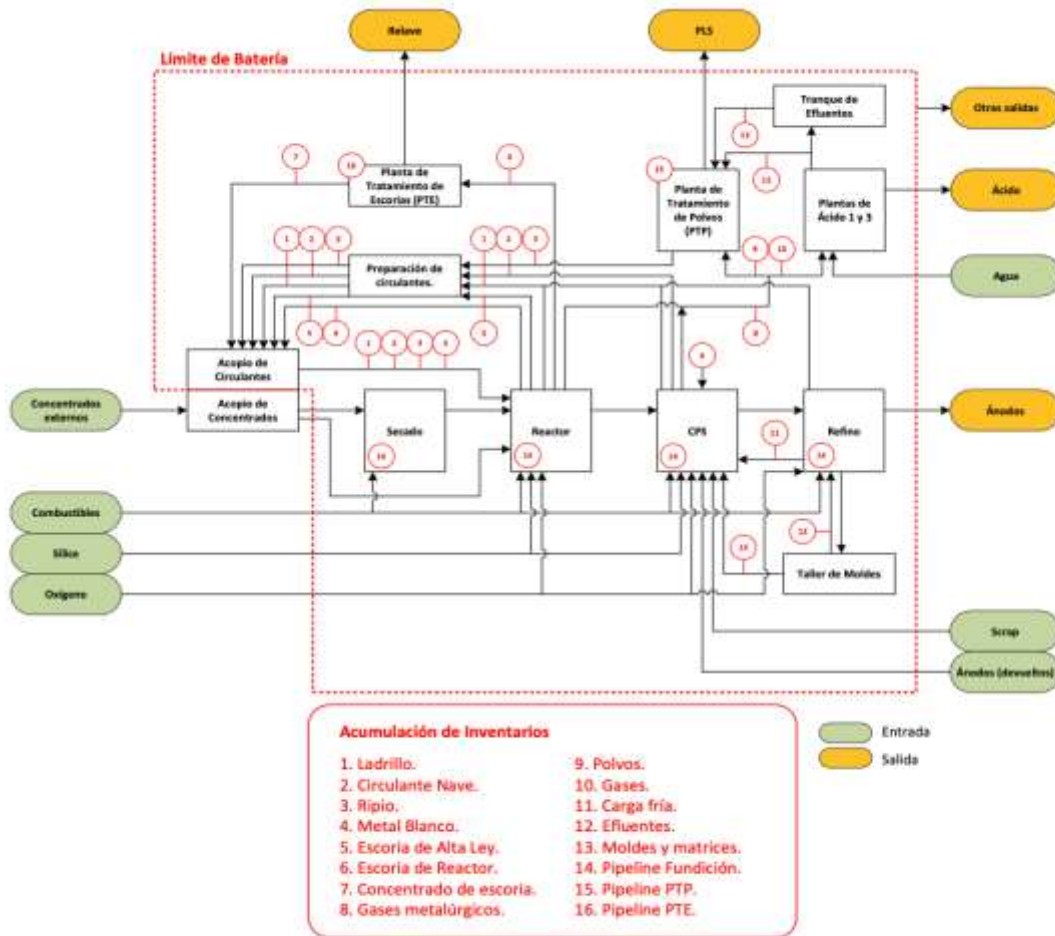


Figura 3-12 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Altonorte

Fuente: Auditoría a Metodología de Balance de Arsénico Enero/2021 (Res. Ex 92/2021 SMA)

La fundición Altonorte cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para elaborar el balance de masa. Los principales equipos e instalaciones se presentan en la Tabla 3-10. Se destaca que, como primer proceso de fundición, la fundición utiliza un reactor tipo Noranda, posteriormente cuenta con 4 Convertidores, 4 hornos de refino.

Tabla 3-10 Equipos e instalaciones principales de fundición Altonorte

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Secador	1	190 [t/h]
Reactor	1	1.160.000 [t/a]
CPS N°1	1	2000 [t/día]
CPS N°2 y 3	2	
CPS N°4	1	
Refino 1	3	1200 [t/día]
Refino 2		
Refino 3		
Ruedas Moldeo 1	2	55 [t/h] c/u
Ruedas Moldeo 2		
Planta Ácido 1	2	2.240 [t/día] ácido c/u
Planta Ácido 3		
Planta Tratamiento de Polvos (PTP)	1	100 [t/día] polvo
Planta Tratamiento de Escoria (PTE)	1	120 [t/h]

Fuente: Elaboración propia en base a metodología de Enero/2021 aprobada por la SMA
(Res. Ex 92/2021 SMA)

A nivel operacional, la Figura 3-13 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”³⁸ de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1. En el caso puntual representado en la Figura 3-13, las existencias interanuales aumentaron, lo que se refleja en que cerca de un 11,5% del arsénico de entrada se agrega al inventario de existencias.

³⁸ Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

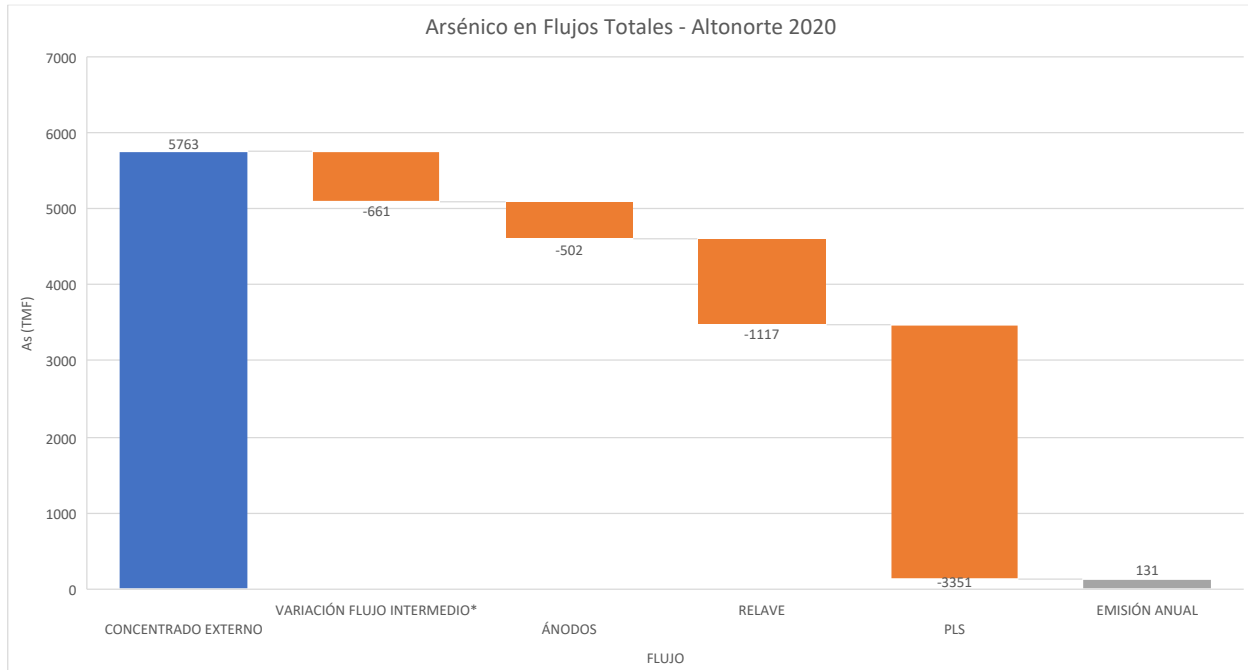


Figura 3-13 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Altonorte 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-13 se puede ver que en la fundición Altonorte, el año 2020 la única entrada relevante es la recepción de concentrado externo. La fundición Altonorte recibe cotidianamente alrededor de 10 concentrados diferentes, con niveles variables de elementos químicos. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución en más corrientes, la de ánodos, que corresponde al producto metálico, relave, proveniente de la planta de tratamiento de escorias y PLS, corriente líquida proveniente de la planta de tratamiento de polvos. Esta última es la que genera mayores flujos de salida en términos de contenido de finos de arsénico, representando un 67% de las salidas totales.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia entre la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. Además, se debe mencionar que los flujos que no aparecen en esta gráfica tienen valores cercanos al nulo, estos son para las entradas: Cátodos Rechazados, ENAP 6, Fundentes, Agua, Oxígeno, Carbón. Luego, para las salidas, solamente el flujo de Ácido Sulfúrico tendrá estas características.

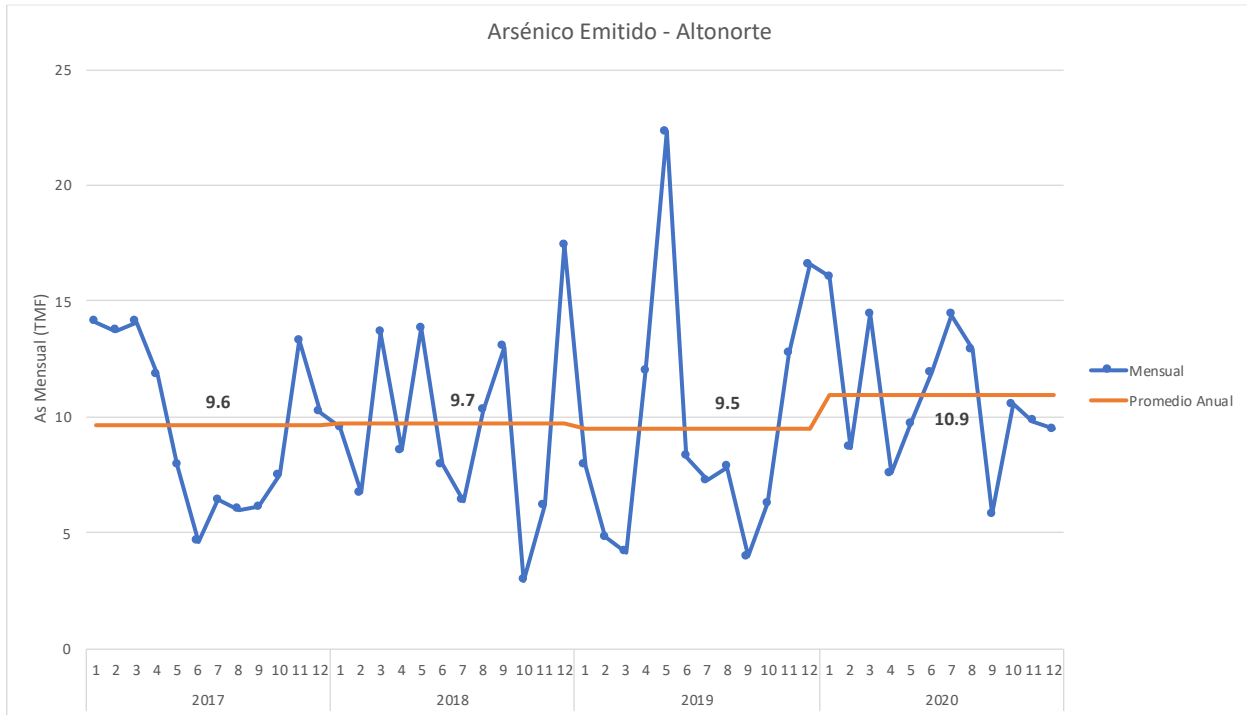


Figura 3-14 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual

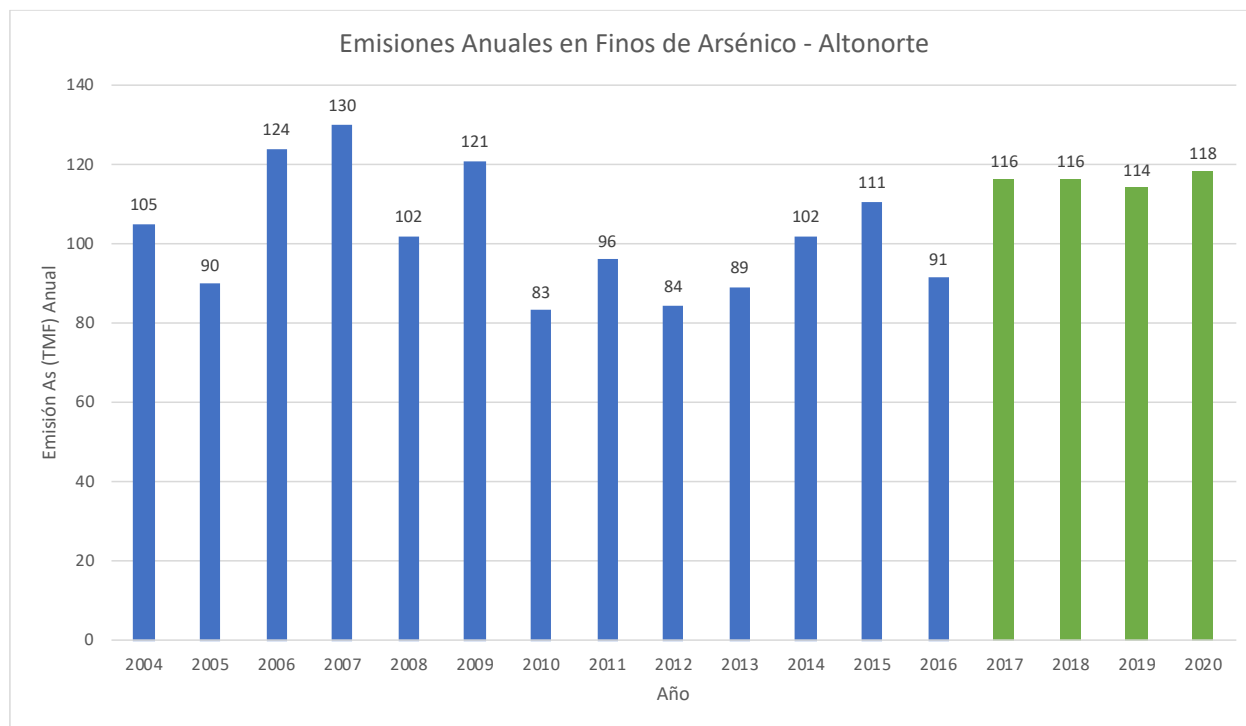
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-14 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que van desde aproximadamente 3 [TMF/mes] hasta 22 [TMF/mes], sin embargo, a nivel anual se observa una operación estable. Los promedios anuales resultantes de los balances de masa van desde las 9,5 [TMF/mes] en el año 2019 a 10,9 [TMF/año] del año 2020. Lo anterior, da cuenta de que, dentro de un mismo año, los meses con emisiones excepcionalmente altas se tienden a compensar con otros meses con emisiones especialmente bajas, resultando en emisiones promedios bastante estables.

Lo anterior resulta en la estabilidad de las emisiones anuales que se observa en la Figura 3-15. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza (ver Ecuación 4 en la Sección 4.1.1).

Es destacable que los resultados de emisiones de arsénico, desde el año 2017 cumplen con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Altonorte se establece un límite de 126 [ton/año] de emisión.

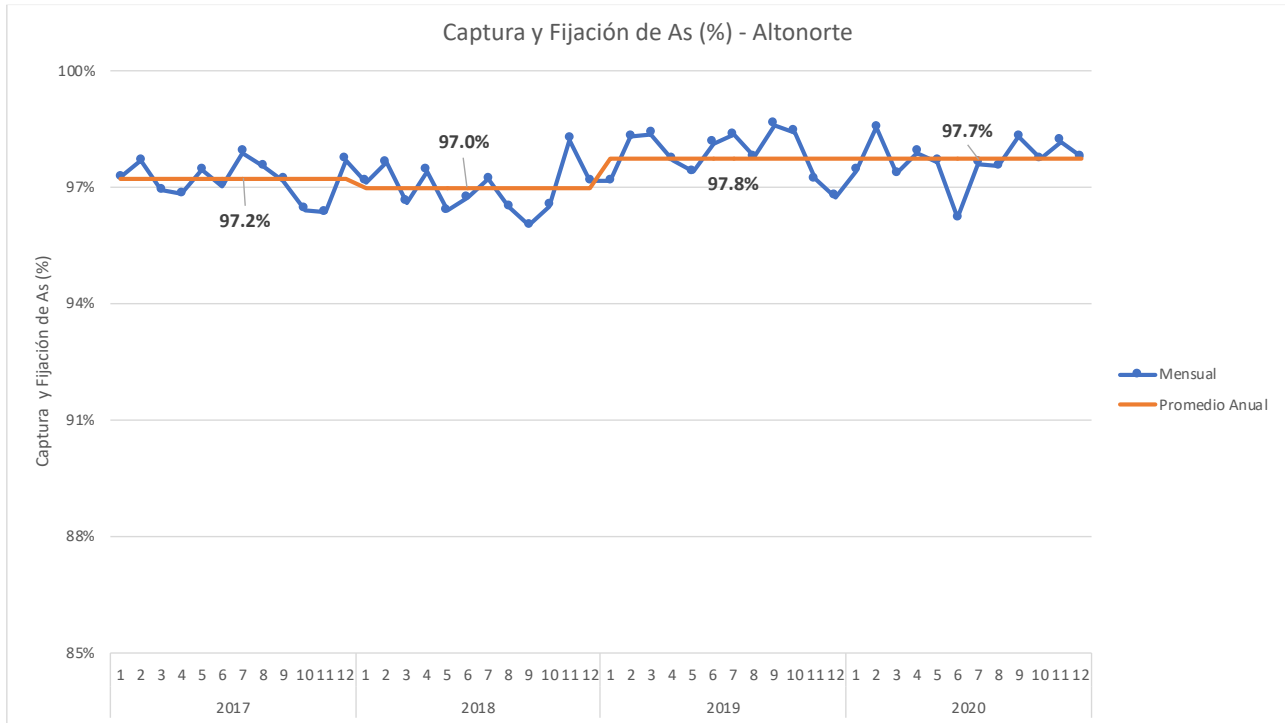


Nota: año 2013 no incluye en su estimación los meses de noviembre y diciembre.

Figura 3-15 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Altonorte, 2004-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y datos compilados por la SEREMI de Antofagasta.

De forma complementaria, en la Figura 3-16 se presenta los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Altonorte. La estimación considera el ratio entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Se observa que durante todo el horizonte 2017-2020 la fundición de Altonorte habría superado dicha tasa de captura y fijación, manteniendo una tasa de captura anual bastante estable entre 97,2-97,8%.



Nota: Cabe mencionar, que el eje de las abscisas se fija entre 85% y 100% para la comparación entre las fundiciones

Figura 3-16 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Altonorte, 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-17 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Se observa que si bien, mensualmente existen variaciones relevantes a nivel anual el indicador se ha mantenido bastante estable dando cuenta de que Altonorte ha mantenido su desempeño ambiental histórico, respondiendo a los límites de emisión que rigen desde el 12/12/2016.

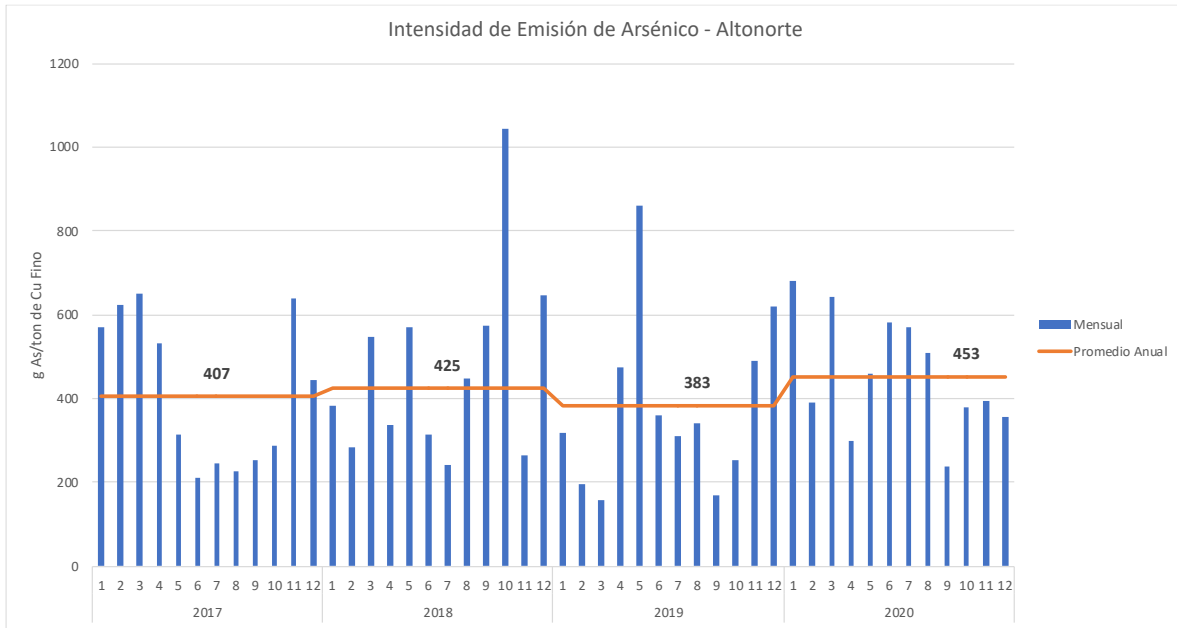
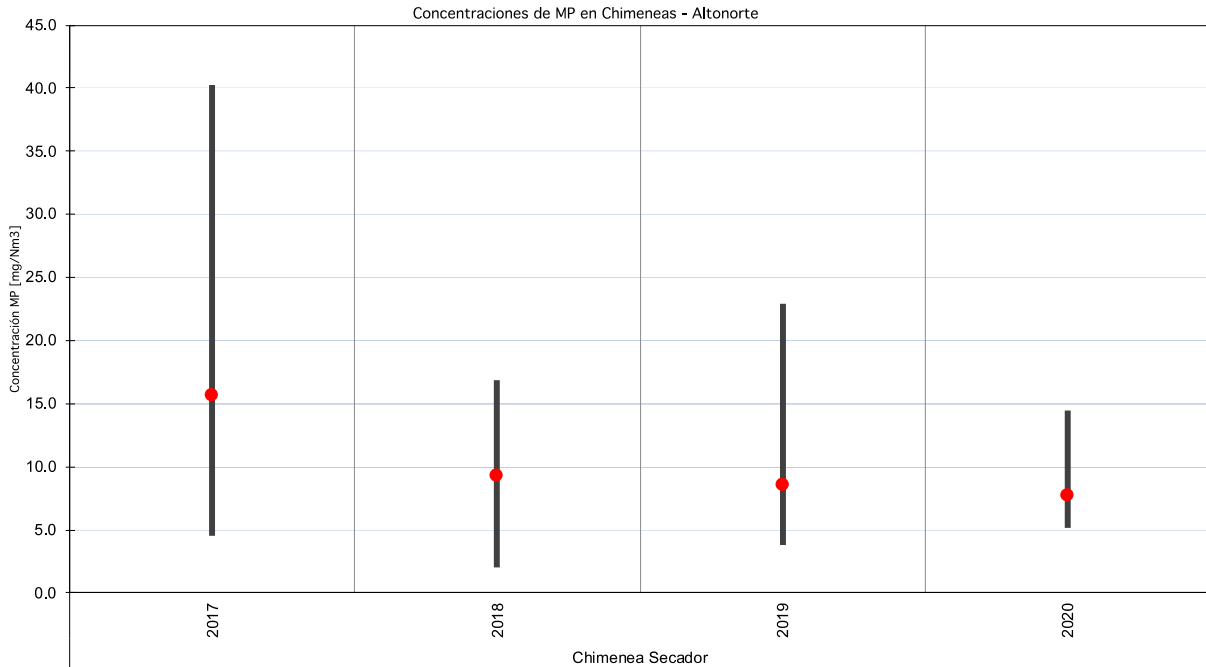


Figura 3-17 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Altonorte, periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

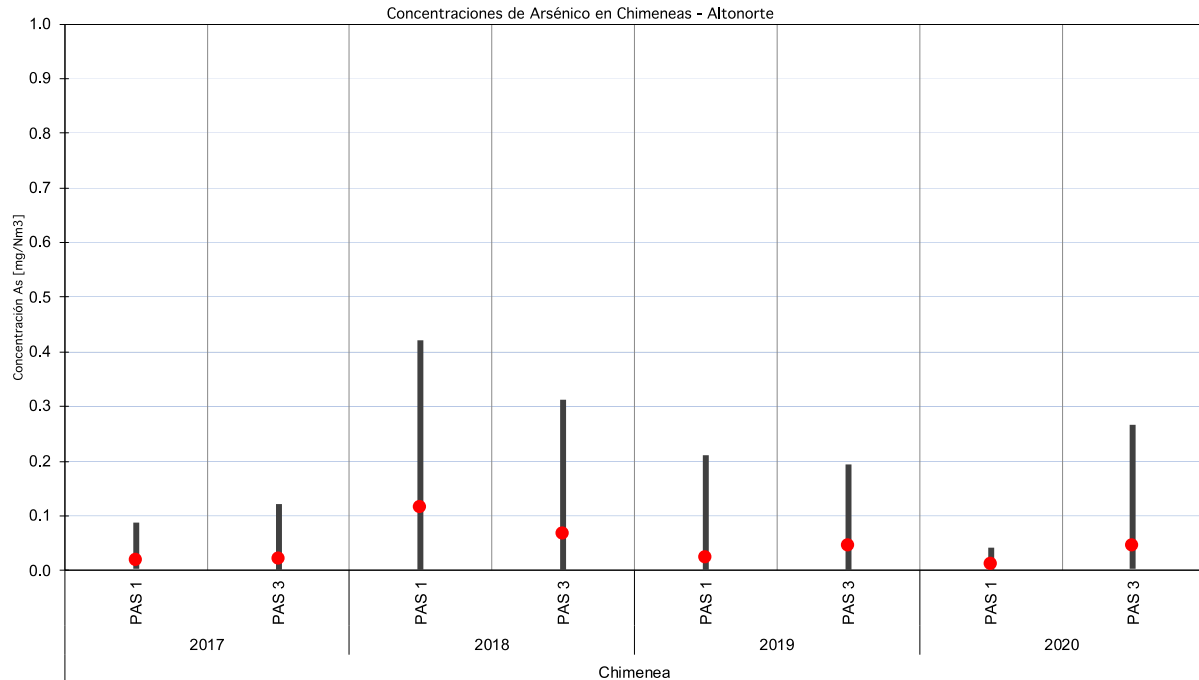


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-18 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Altonorte 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-18 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Altonorte presenta datos una única chimenea asociada al secador, para el periodo 2017-2020. Se puede observar que hay un cumplimiento en todos los años analizados, con un máximo de 40 [mg/Nm³] de concentración de material particulado, correspondiente a mediciones en junio/2017. En el periodo de 2018-2020, las medias calculadas se encuentran bajo los 10 [mg/Nm³].



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-19 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Altonorte 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-19 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Altonorte presenta datos para dos plantas de ácido sulfúrico en el periodo 2017-2020. Se puede observar que no se ha superado el límite de emisión de 1 [mg/Nm3] de As en ni una de las mediciones efectuadas, donde se ha superado el umbral de los 0,4 [mg/Nm3] de As en una ocasión. Además. Se han registrado mínimos de 0,0017 [mg/Nm3] de As.

3.3.3 Fundición Potrerillos

La Figura 3-20 presenta el diagrama de la fundición de Potrerillos, la cual incluye etapas propias de la faena minera, tales como la concentración del material. Justamente el mineral concentrado es la principal corriente de entrada de arsénico, la cual ingresa a la planta de secado. Desde este punto el material seco es llevado al convertidor teniente para su fundición donde se separa la escoria, metal blanco y gases de salida. Cada una de estas corrientes interna tiene un destino diferente.

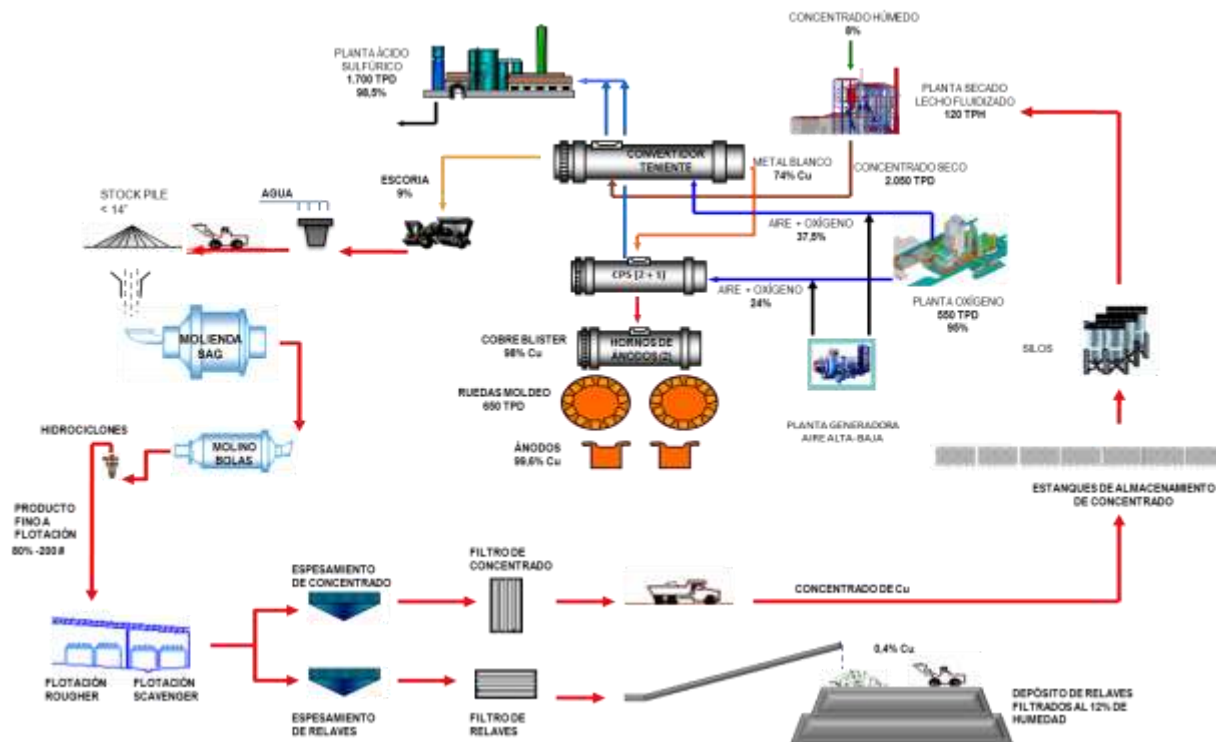


Figura 3-20 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Potrerillos

Fuente: Planillas Reporte técnicos año 2020, letra m)

La fundición Potrerillos cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11 Equipos e instalaciones principales de fundición Potrerillos

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Planta de Secado	1	Diseño: 120 [t/h] Nominal: 83,3 [t/h]
Convertidor Teniente	1	2.105 [t/día]
Convertidores Pierce Smith	3	700 [pie ³]
Hornos de Ánodos	2	220 [ton/ciclo]
Rueda de moldeo	2	Nominal: 66 [t/h] para ánodos de 224 kg
Planta de Ácido	1	200.000 [Nm ³ /h]
Planta de Flotación de Escoria	1	Diseño: 1700 [t/día]

Fuente: Elaboración propia en base a propuesta metodológica de balance 2019

A nivel operacional, la Figura 3-21 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”³⁹ de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.

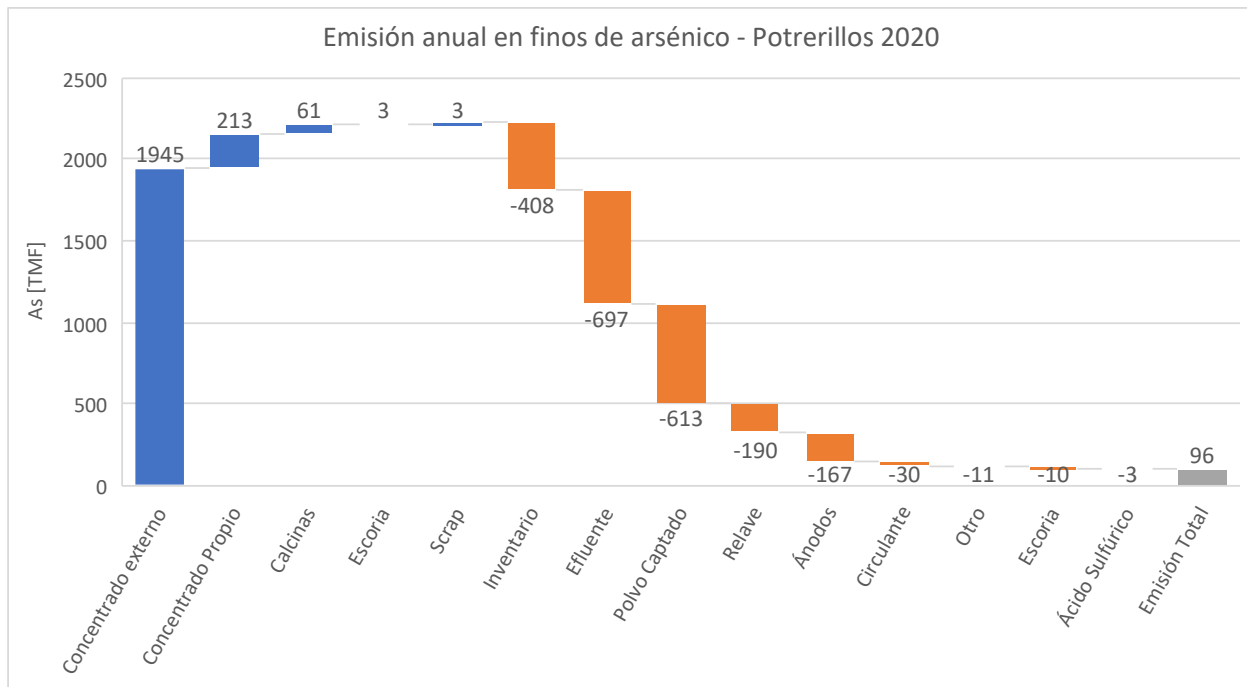


Figura 3-21 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Potrerillos 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos mensuales

En la Figura 3-21 se puede ver que en la fundición Potrerillos, el año 2020 posee dos entradas relevantes asociadas al concentrado externo y propio, donde domina el concentrado de terceros. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución en más corrientes donde resaltan el Efluente, Polvo captado, Relave y Ánodos. En esta fundición la Variación de Flujo Intermedio posee un rol por su gran magnitud negativa.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia de la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. En ese sentido, la mayor cantidad de variación la tiene el inventario de Circulante (ver Tabla 3-12).

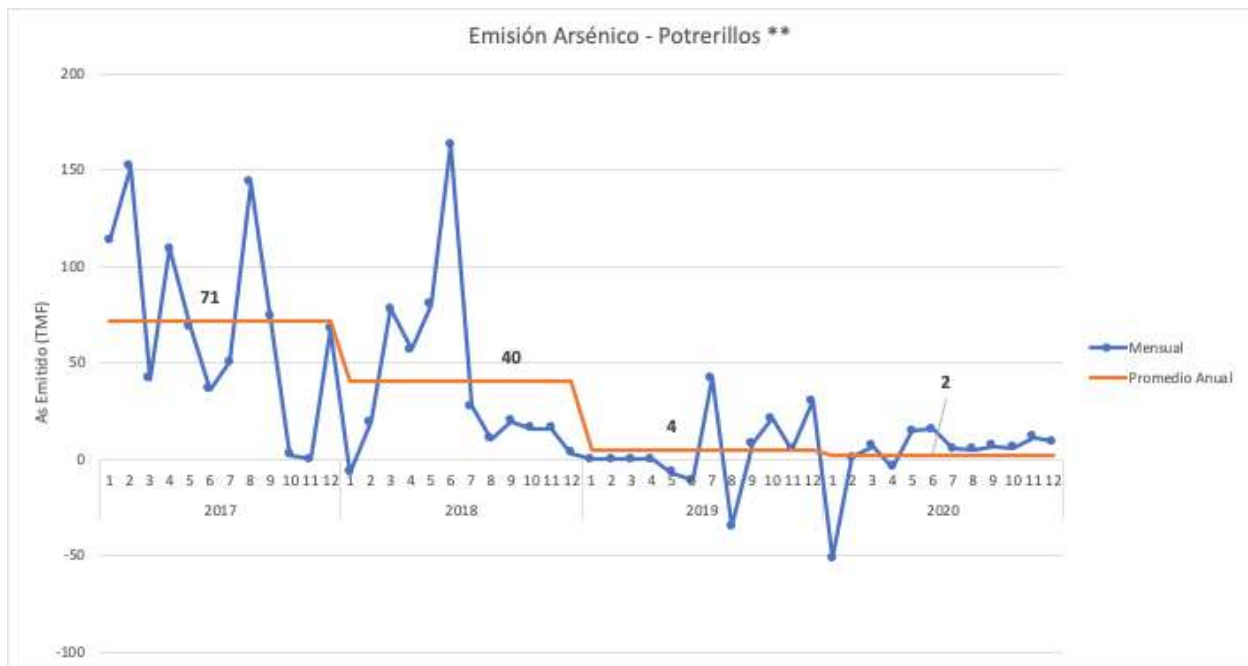
³⁹ Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

Tabla 3-12 Variación de flujos de inventario, Potrerillos 2020

Flujo de Inventario Anual - Potrerillos 2020	Inicial (TMF)	Final (TMF)	Variación As (TMF)
CIRCULANTE	8471,7	-8888,4	-416,8
CONCENTRADO PLANTA DE FLOTACIÓN DE ESCORIAS	356,1	-345,6	10,5
CARGA FRÍA	23,3	-27,0	-3,7
CARGA LÍQUIDA	138,5	-136,9	1,6
TOTAL			-408,4

Fuente: Elaboración propia en base a planillas de reportes técnicos

En la Figura 3-22 se presentan los valores de emisiones mensuales de arsénico para el periodo 2017-2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.


Figura 3-22 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

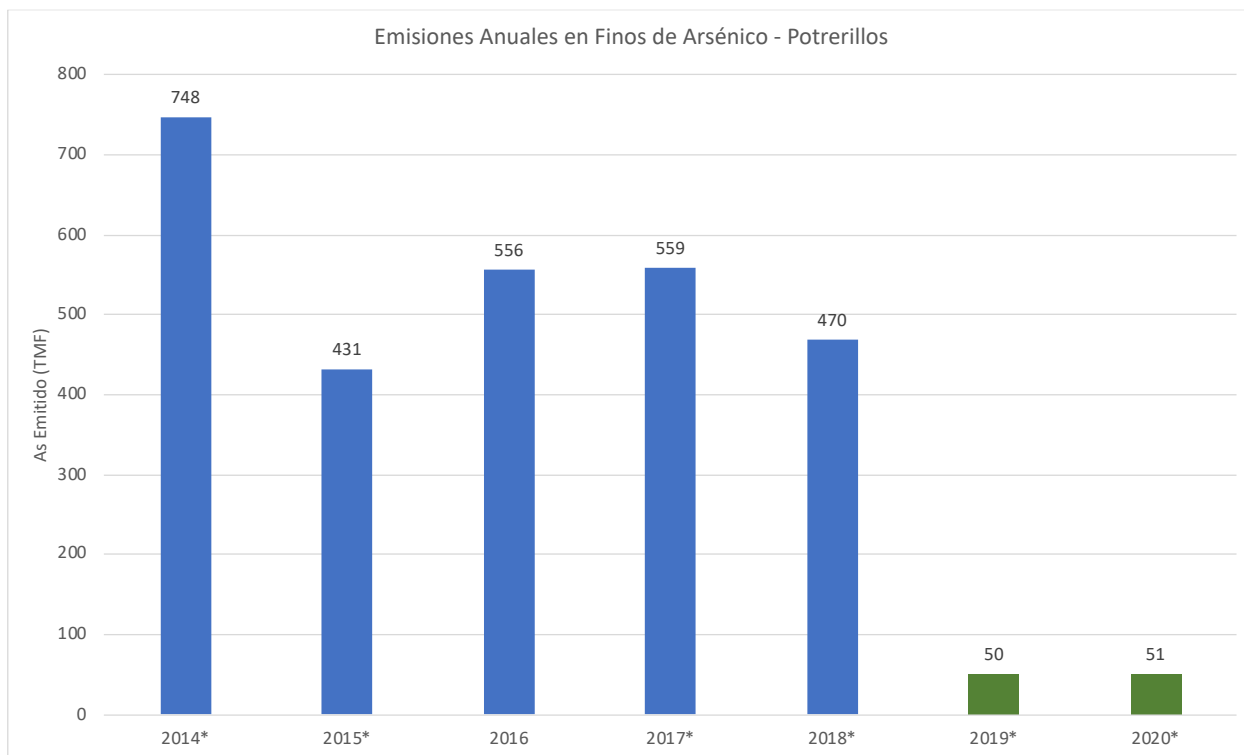
Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que van desde valores cercanos a -50 [TMF/mes] hasta 150 [TMF/mes]. A nivel anual se observa una operación relativamente estable, recién desde el año 2019, observándose que las emisiones promedio se han estabilizado entre 2 y 4 [TMF/mes]. Estos valores son significativamente menores a las emisiones observadas en el año 2017 (71 TMF) y 2018 (40 TMF).

En la Figura 3-23 se pueden observar las emisiones anuales de la fundición Potrerillos. Cabe señalar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones

mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza.

Vale la pena resaltar que, los años 2019 y 2020, según la información de los reportes publicados, se cumple con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (DS 28 MMA, 2013b), donde para la fundición Potrerillos se establece un límite de 157 [ton/año] de emisión. No obstante, es relevante destacar que esto considera la suma aritmética que incluye algunos meses con valores negativos, por ejemplo, para el año 2020 de no considerarse estos meses la estimación de emisiones alcanza las 107 ton/año, valor que tampoco excede el límite de emisión.

Aun así, es relevante mencionar la detención de la fundición que se efectuó desde el 11/Diciembre del año 2018, con el fin de iniciar una serie de mejoras asociadas al Proyecto de Mejoramiento Integral de la Captación y Procesamiento de Gases, además de mantenciones. Dentro de estas acciones, se sustituyó la planta de ácido con tecnología de doble contacto.



* años con al menos un valor mensual reportado negativo

Figura 3-23 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Potrerillos, 2014-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Ahora bien, respecto a la información disponible para años previos a la aplicación del protocolo, se presentan las emisiones anuales reportadas por la fundición para el periodo de 2014-2020. En los valores reportados, se encuentran algunas particularidades, tal como meses con emisiones

negativas y/o emisiones nulas. En efecto, el año 2014, y en el periodo 2018-2020, hay a lo menos un mes con valor de balance de emisión negativo. También, cabe destacar que los meses de julio y agosto del periodo 2015 informan valores nulos de finos de arsénico.

De forma complementaria, en la Figura 3-7 se presentan los valores reportados del porcentaje de captura y fijación de arsénico en la fundición Potrerillos. La estimación considera el ratio entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Se observa que de acuerdo a lo reportado se estaría cumpliendo con el requisito de la norma.

De modo complementario, se incluye la Figura 3-25, donde se pueden observar los promedios anuales acumulados en el periodo reportado, a través del ajuste del eje. En este, se visualiza la transición al cumplimiento de la norma, donde se nota una alza significativa en la captura y fijación de arsénico, registrándose porcentajes de captura y fijación de 69,4% en el año 2017 y de 78,7% en el año 2018, luego con la entrada en vigencia de la norma de emisión para la fundición potrerillos el 12 de diciembre de 2018, es posible observar un aumento en el indicador del porcentaje de captura y fijación de As registrándose para los años 2019 y 2020 valor de 96% y 97,7% respectivamente. Es importante señalar, que los puntos que escapan en las ordenadas, corresponden a valores nulos⁴⁰ debido a detención de la actividades de la fundición (de enero/2019 a mayo/2019), así como a valores superiores a 100% los cuales no tienen sentido físico y se explican por las emisiones negativas obtenidas mediante el balance de masa de As. Así, tal como se puede apreciar en la Figura 3-22 y la Figura 3-25, se escrutan porcentajes de captura de bajo nivel en febrero/2017 y agosto/2017 (51,8 y 51,5%) y junio/2018 (54,3%). Es importante señalar que para el año 2019 hubo un proceso de rectificación, por lo cual los valores reportados corresponden a aquellos, incluyendo lo considerado en la RE SMA 1915/2020.

⁴⁰ Los valores de captura en el periodo de enero-abril/2019 se reportan como 0%, tal como se indica en DFZ-2020-3220-III-NE.

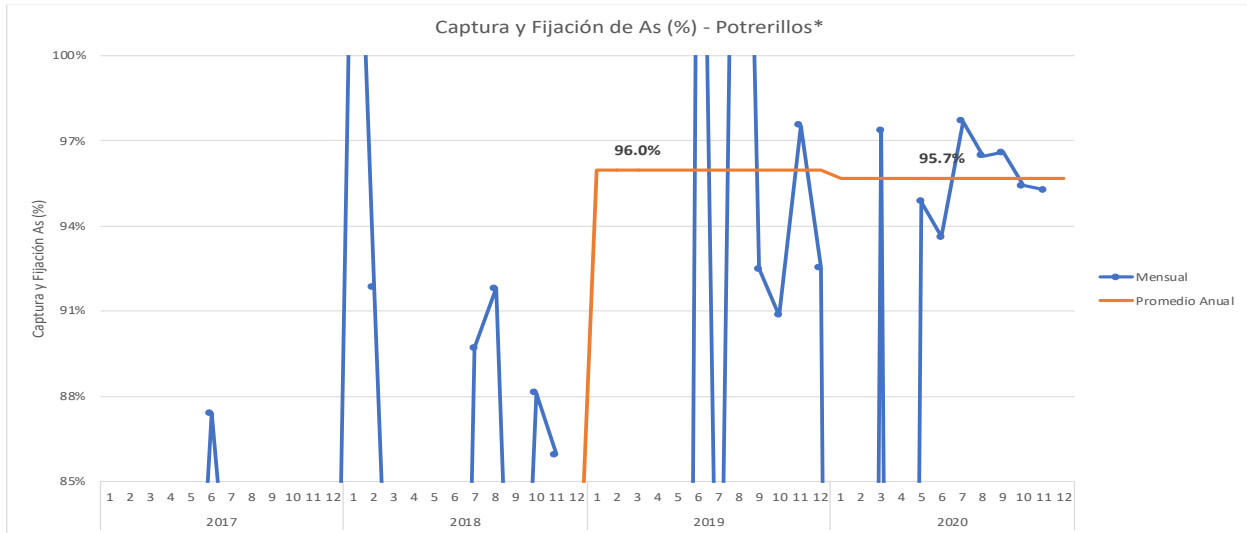


Figura 3-24 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Potrerillos, 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

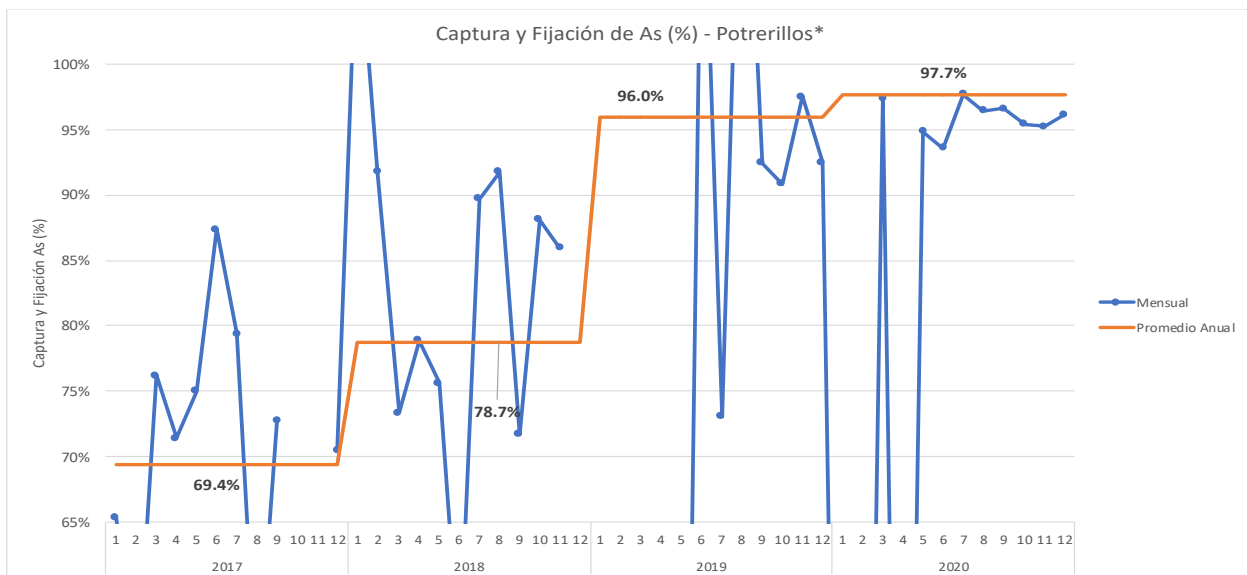


Figura 3-25 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Potrerillos, 2017-2020 (escala entre 65% y 100%)

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-26 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite

resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Además, el objetivo de este es analizar el comportamiento del desempeño de la fuente emisora, asociado a cambios tecnológicos implementados para el cumplimiento de la norma.

En el mismo sentido, se pueden observar altos valores de promedios anuales acumulados para los años 2017 y 2018, donde se superan los 10000 g de As/TMF de Cu fino en febrero, agosto y diciembre de 2017, así como también en junio/2018. Además, se notan valores negativos de este indicador para marzo/2018, junio/2019 y agosto/2019, los cuales tienen relación a emisiones negativas y, por tanto, capturas y fijación de arsénico sobre el 100%. Es destacable que en comparación con el periodo de entrada en vigencia de la norma DS 28 SMA/2013, específicamente para los años 2019 y 2020, el indicador de intensidad disminuye considerablemente, registrándose en dichos años valores mensuales menores a 5000 g de As/TMF y promedios anuales de 883 g de As/TMF y 760 g de As/TMS, por ejemplo, en el año 2019 la emisión de arsénico por TMF de cobre fino corresponde solo a un 11,4% respecto al indicador de intensidad del año 2017. Cabe mencionar que, aun así, se encuentran meses reportados sin validez, dadas las emisiones negativas de arsénico obtenidas a partir del balance de masa.

Cabe mencionar que mediante la auditoría externa correspondiente al año 2020 que se exige efectuar anualmente, se levantaron observaciones que permitieron detectar causas que originan errores en los resultados de los balances de masa y elaboró una serie de recomendaciones para solucionar los problemas en la estimación del balance de masa. En este sentido, no se realizan modificaciones a este indicador de desempeño ambiental con la rectificación mencionada anteriormente⁴¹, esto por las emisiones negativas correspondientes⁴². Eso sí, se incluye la metodología para la reconciliación del balance de Cobre para los flujos de entrada y salida, así como también inventarios y sub-inventarios, mediante la aplicación de factores de tolerancia, según confiabilidad de la fuente que los origina.

⁴¹ IEC-17-2021 (Servicios Mineros SpA). No se encuentran modificaciones de indicadores de desempeño ambiental.

⁴² Informe mensual enero/2020, DS28 SMA/2013, Potrerillos: "El indicador [g de As/ ton de Cu fino] no se calculó debido a la emisión negativa de As durante este periodo." (Pg [4])

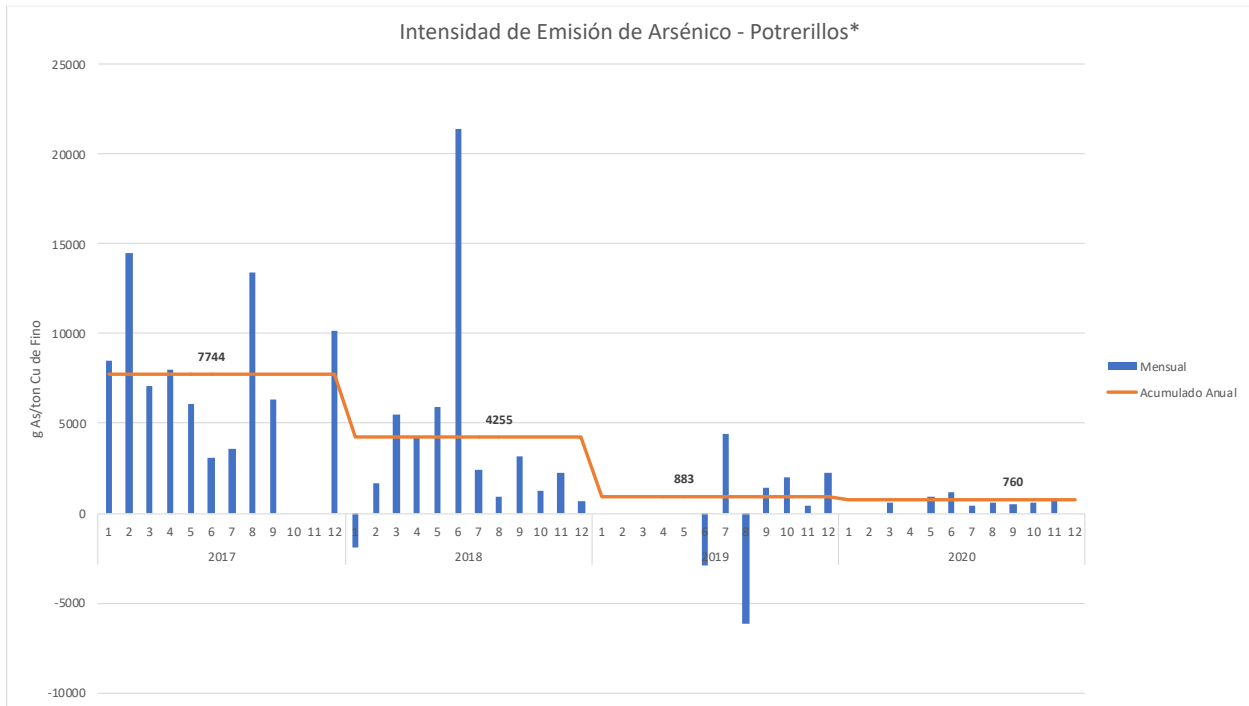
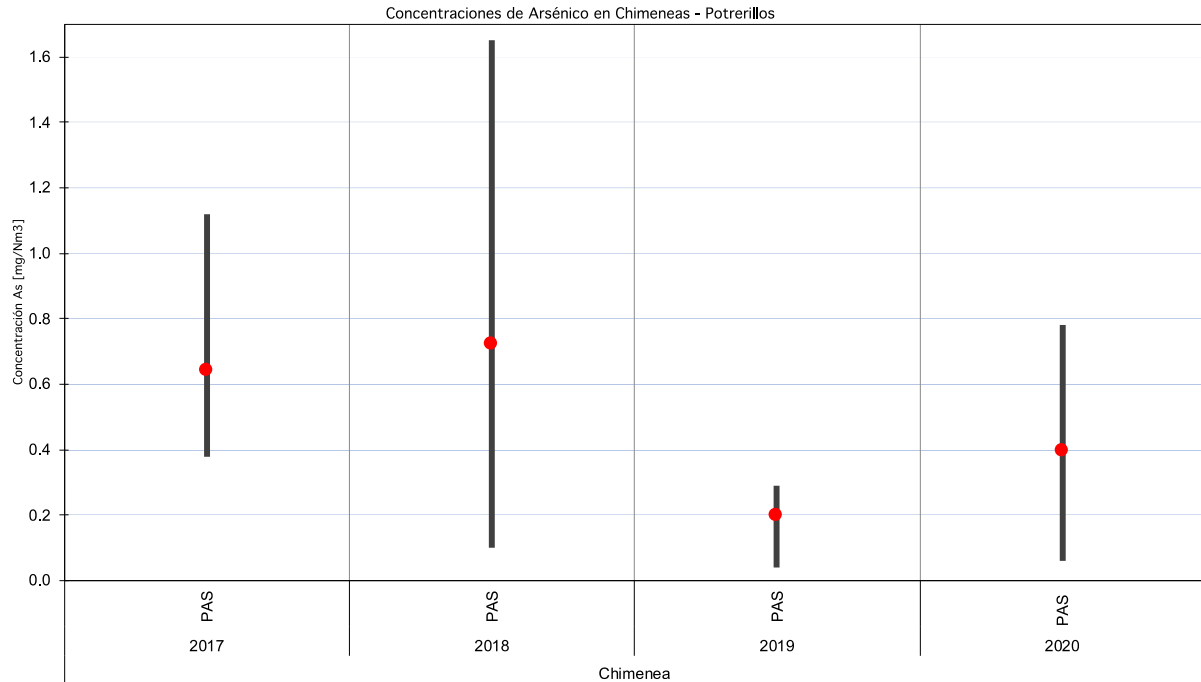


Figura 3-26 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Potrerillos, periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

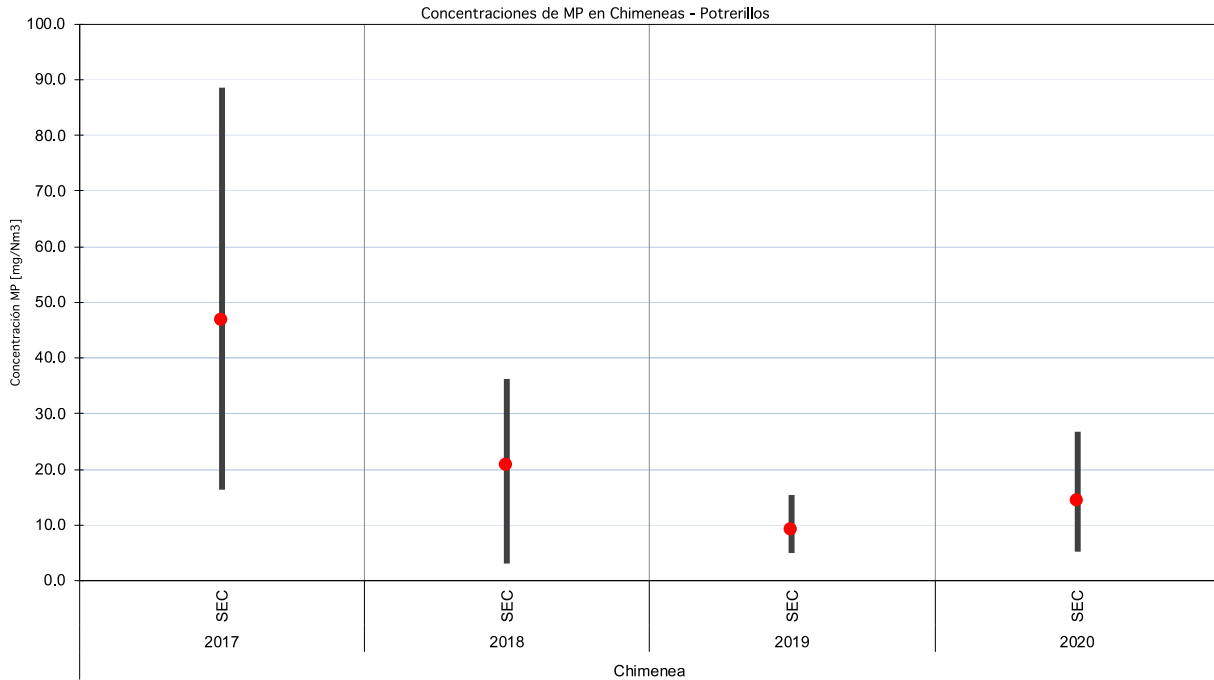


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-27 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Potrerillos 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-27 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Potrerillos presenta datos para la chimenea asociada a la planta de ácido sulfúrico en el periodo 2017-2020. Se puede observar que no se ha superado el límite de emisión de 1 [mg/Nm³] de As en ni una de las mediciones efectuadas en el periodo de entrada en vigencia. Además, se nota un comportamiento a la baja en el periodo 2019-2020, en comparación a años anteriores.



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-28 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Potrerillos 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-28 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Potrerillos presenta datos una única chimenea asociada al secador, para el periodo 2017-2020. Se puede observar que hay un cumplimiento en los años 2019 y 2020, con un máximo inferior a 30 [mg/Nm³] de concentración de material particulado. En el periodo de 2017-2018, las medias calculadas se encuentran bajo los 50 [mg/Nm³], aunque con máximos superiores a este umbral para el año 2017.

3.3.4 Fundición Hernán Videla Lira

En la presente Sección se presentan los resultados del balance de masa de arsénico, reportados por la fundición Hernán Videla Lira. Cabe destacar que tal como se desarrolló en la Sección 3.1.3, las emisiones correspondientes a la Fundición HVL previo a septiembre 2020 no fueron obtenidas bajo la metodología de balances de masa aprobada mediante la Res. Ex. 1479/2021 de la SMA, por ende, dichas emisiones solo deben ser consideradas referenciales. De esta forma el análisis

presentado a continuación debe ser considerado como referencial, y se destaca que no coincide con la estimación final presentada en la Sección 4.2, la cual se estima a partir de la intensidad de emisiones (g As/ton Cu fino) reportadas en el periodo octubre 2020 a septiembre 2021.

En la Figura 3-29 se presenta el diagrama de la fundición HVL. Se observa que se identifican tres puntos de entrada de corrientes, a la planta de secado (concentrado de Cu, y concentrado de Au y Ag), directo al convertidor teniente (minerales de fusión directa y sílice) y a los CPS (precipitados blíster). Respecto a las salidas, se observa que existen diferentes corrientes asociadas a los productos, y coproductos de la operación de la fundición HVL.

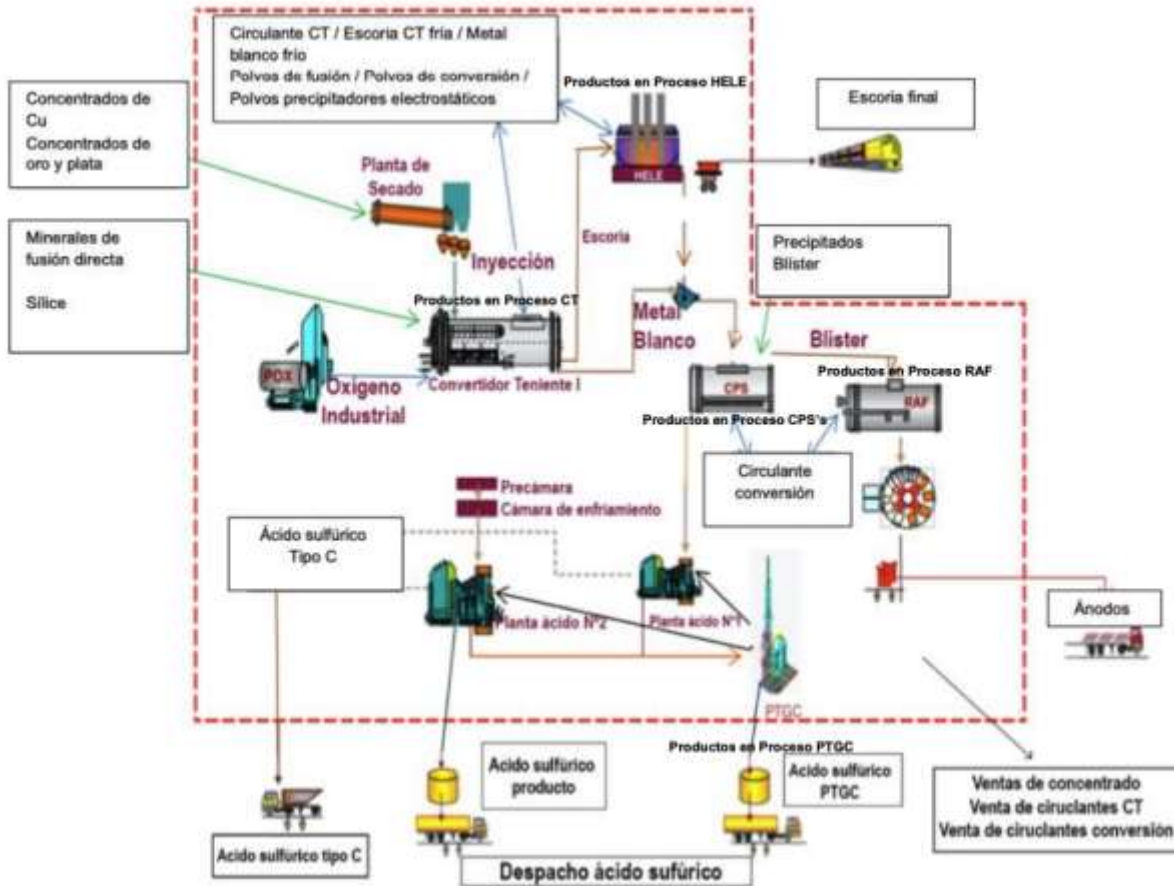


Figura 3-29 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Hernán Videla Lira

Fuente: Reportes técnicos del año 2020, letra m)

La fundición Hernán Videla Lira cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-13. Se observa que la fundición sólo cuenta con dos CPS a diferencia del resto de las fundiciones con mayor capacidad productiva.

Tabla 3-13 Equipos e instalaciones principales de fundición Hernán Videla Lira

Equipo/instalación	Cantidad	Capacidad
Horno de Secado de concentrado	1	60 [t/h]
Convertidor Teniente	1	1000 [t/día]
CPS N°2	2	10 [ciclos/día]
CPS N°3		
Horno de Refino fuego	1	200 [t/ciclo]
Ruedas Moldeo	1	40 [t/h]
Horno Eléctrico de Limpieza de Escoria	1	700 [t/día]
Planta Ácido N°1	2	50.000 [Nm3/h]
Planta Ácido N°2		80.000 [Nm3/h]
Planta de tratamiento gases de cola (PTGC)	1	130.000 [Nm3/h]

Fuente: Auditoría a Metodología de Balance de Arsénico 2021 (Res. Ex 1479/2021 SMA)

A nivel operacional, la Figura 3-30 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”⁴³ de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.

Es relevante en el siguiente análisis considerar que los números presentados se basan en los reportes de la fundición a la SMA. Estos números fueron cuestionados por su metodología de cálculo e implementación de la misma (ver Sección 4.1.3). De acuerdo a los antecedentes levantados es posible señalar que sólo a partir de septiembre 2020 el titular ENAMI señala que comienza a aplicar la metodología de balances de masa aprobada bajo la Resolución Exenta N°1479/2021 SMA, por ende, el valor de emisión anual declarado por el Titular para el año 2020 no se considera válido. A continuación, se presentan los valores reportados sólo a modo de referencia.

⁴³ Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

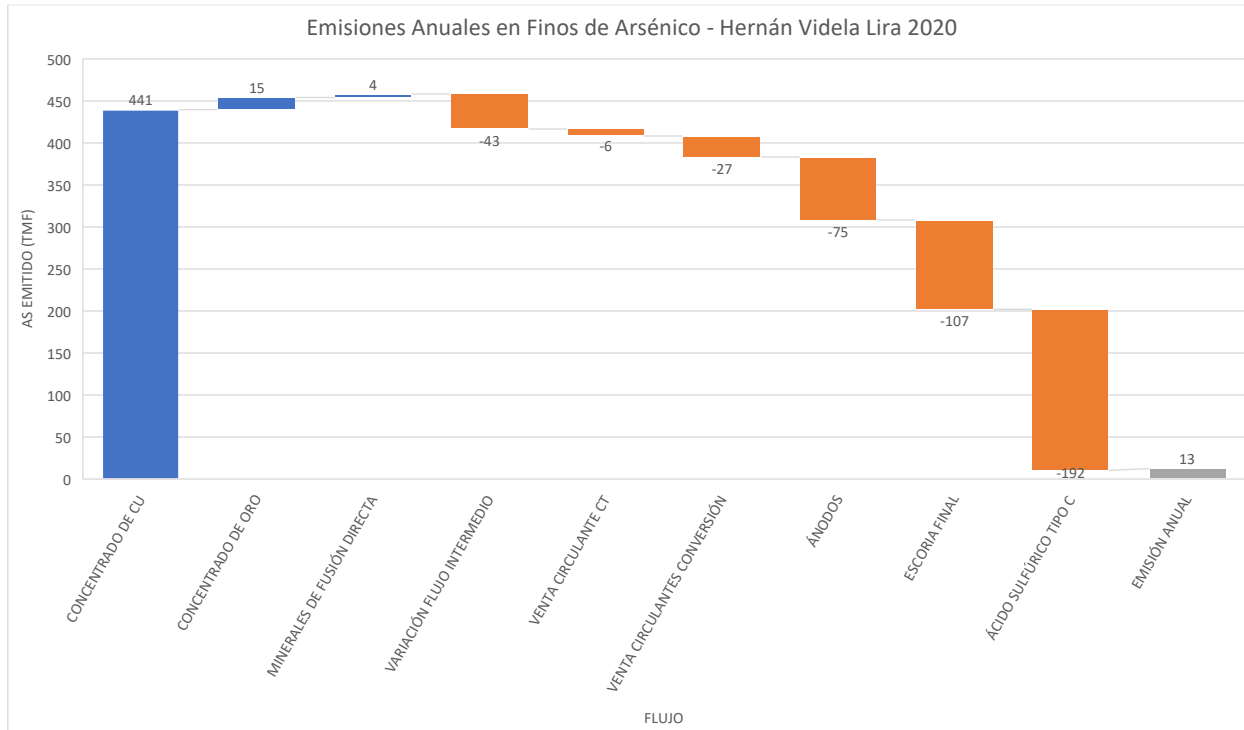


Figura 3-30 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Hernán Videla Lira 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes mensuales

En la Figura 3-30 se puede ver que las entradas más relevantes son el concentrado de cobre, estos corresponden a varios proveedores, tales como Codelco, Matta, Carola, Kozan, entre otros. La fundición HVL recibe cotidianamente los concentrados señalados, cada uno con distintos valores de cantidad y de contenido químico. La suma de los concentrados de cobre como flujo representa más del 95% de las entradas en el límite del sistema. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución entre varias corrientes. Principalmente, el Ácido Sulfúrico C, que representa el 58% de ellas. Luego, la Escoria Final y los Ánodos producidos, tienen proporciones de 26% y 18% de la corriente de salida, respectivamente. Finalmente, en este mismo sentido, las ventas de Circulante de Conversión y Circulante CT, comercializado en eventualidades a otras fundiciones y/o plantas de tratamiento, son contabilizados correspondientemente con 6,4 y 26 TMF de arsénico. Como resultado del balance, el año 2020 las emisiones estimadas fueron de 12,83 TMF, el cual no considera los meses con resultados negativos.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia entre la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. En ese sentido, la mayor cantidad de variación la tiene el inventario de Escoria CT Fría, el cual forma parte del 90% del total de la variación de inventario (ver Tabla 3-14). Este cálculo se realiza con las planillas que cuentan con el detalle de las corrientes de inventario, ya que la rectificación solo incluye los valores final e inicial de la existencia.

Tabla 3-14 Variación de flujos de inventario, HVL 2020

Flujo de Inventario Anual	Inicial (TMF)	Final (TMF)	Variación As (TMF)
ESCORIA CT FRÍA	514	554	39,3
CIRCULANTE CT	122	125	2,5
POLVOS DE FUSIÓN	91	94	2,4
POLVOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS	32	33	1,3
PRODUCTOS EN PROCESO	378	379	1,0
CIRCULANTE CONVERSIÓN	60	60	0,3
METAL BLANCO FRÍO	24	23	-1,1
POLVOS DE CONVERSIÓN	20	17	-2,5
TOTAL			43,27

Nota: Los valores presentados en esta tabla no son válidos para evaluar cumplimiento normativo. Para efectos de este estudio, han tomado un carácter referencial.

Fuente: Elaboración propia en base a balances de masa rectificadas reportados para el año 2020

En la Figura 3-31 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

Se observa gran variación mensual que no logra estabilizarse a nivel anual, incluyendo la obtención de valores negativos reportados. En particular, en el año 2019 la Fundición HVL reportó un valor de balance de emisión anual de As correspondiente a -6 ton/año, dicho resultado es producto de una inadecuada formulación y aplicación de la metodología de balances de masas en la fundición (ver figura 4-25), donde se detectaron múltiples problemas en el muestreo, análisis químico, falta de información respecto la masa de la escoria de descarte, variación entre el inventario final e inventario inicial e inconsistencias en la declaración de flujos de entrada, salida e intermedios, por ende, tuvo como consecuencia la invalidez de los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología de balances de masa, así como no permitir la evaluación de cumplimiento normativo de los límites máximo de emisión anual. Dado lo señalado anteriormente, la metodología de balances de masa de la fundición Hernán Videla Lira fue sometida a un proceso de revisión para su modificación y ajuste de las condiciones operacionales de la fundición (RE 1479 SMA/2021).

Sin perjuicio de lo anterior, se observa que desde septiembre/2020, se presentan valores de emisión de As similares a los observados durante el 2017 y primer semestre del 2018, siendo más altos que los valores del segundo semestre del 2018 y 2019, ya que dichos valores estuvieron sujetos a las falencias en la aplicación de la metodología de balances de masa.

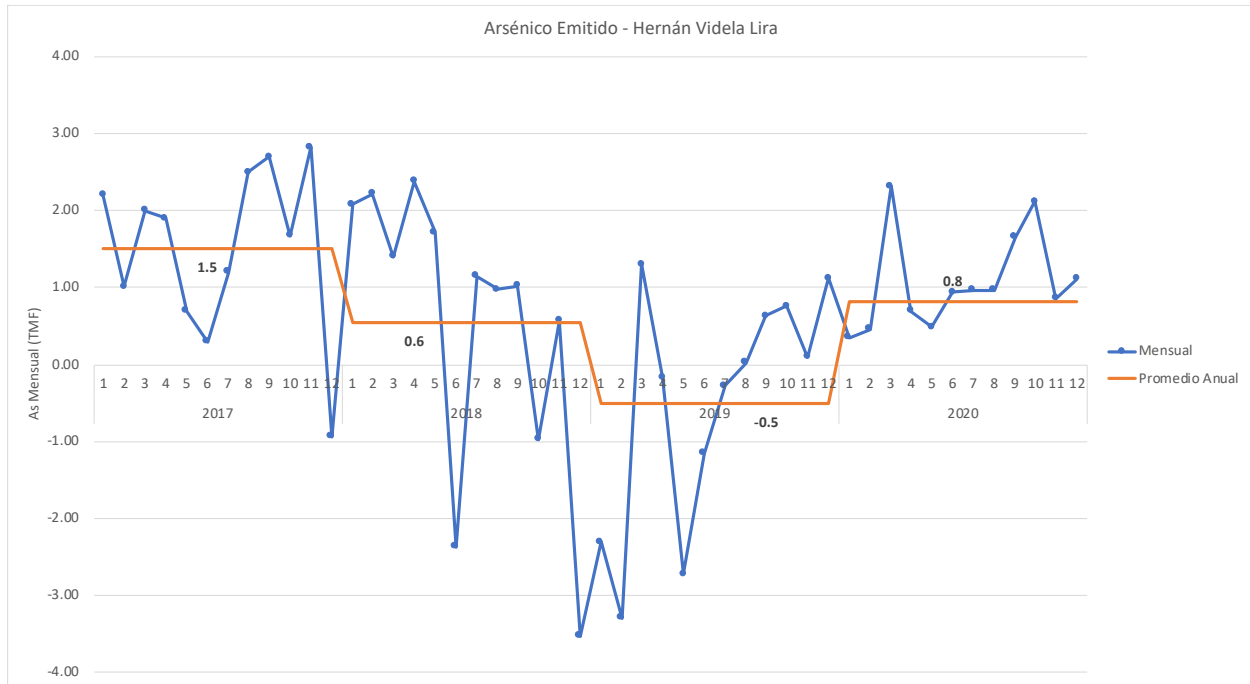
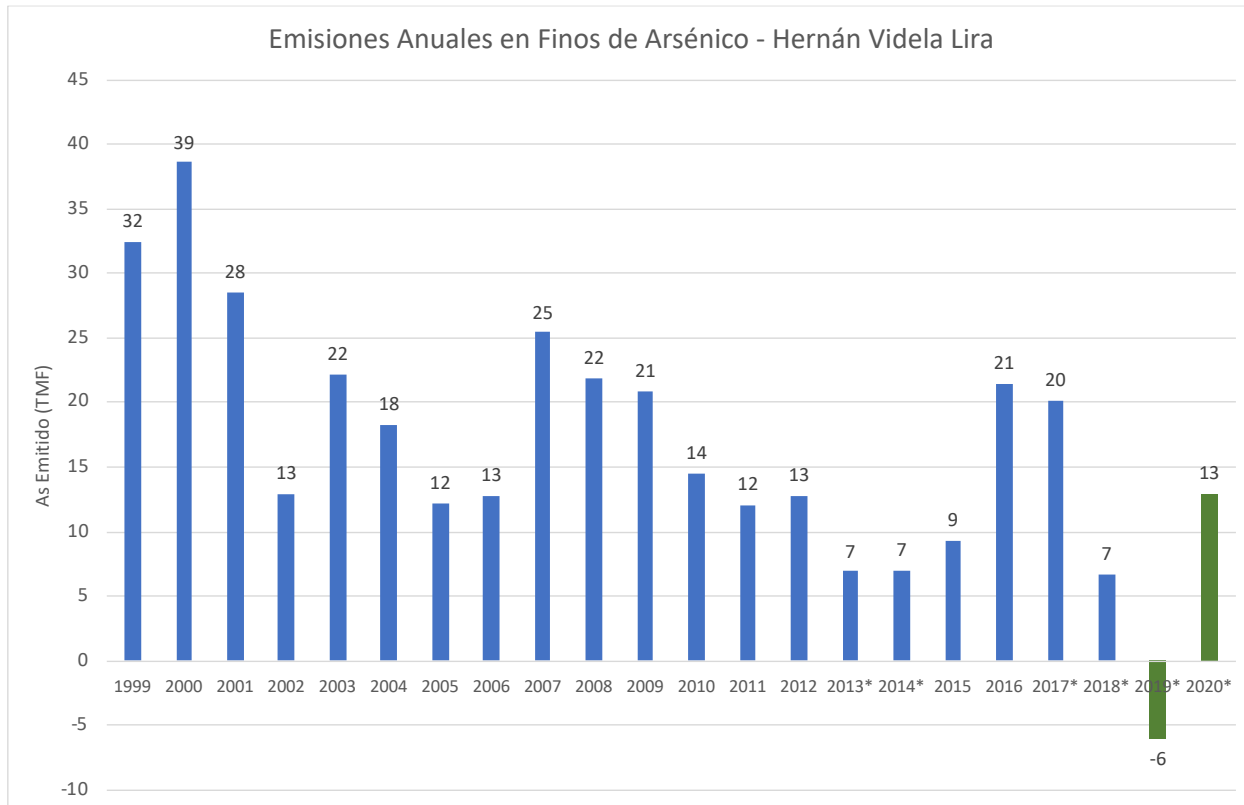


Figura 3-31 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Lo anterior se sigue presentando en las emisiones anuales que se observan en la Figura 3-32. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza. Esta diferencia, así como en el resto de las fundiciones, es atribuible al nivel de actividad mensual y las mantenciones programadas.

A partir de la Figura 3-32, es posible observar para el año 2020 que la emisión anual de As se encuentra bajo el límite de emisión establecido en el artículo 3° de la norma de emisión (D.S. 28 MMA, 2013b), donde para la fundición HVL de ENAMI se establece un límite de 17 ton/año de emisión. Sin embargo, la existencia de estimaciones anuales negativas (-6 ton/año) para el año 2019, genera dudas de la confiabilidad de las estimaciones, así como la obtención de resultados de balances con metodología aprobada sólo desde el mes de septiembre 2020, resulta en que estas estimaciones declaradas por el titular sólo tengan un carácter “referencial”.



* años con al menos un valor mensual reportado negativo

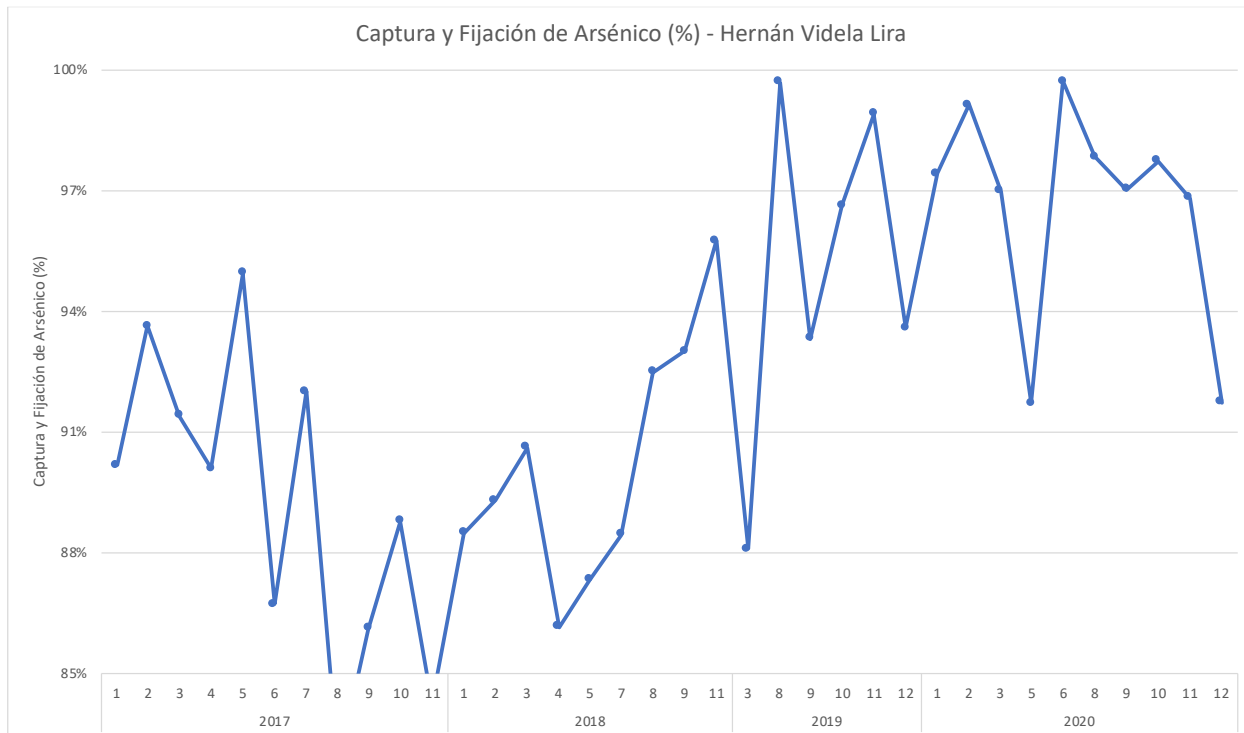
Figura 3-32 Emisiones anuales [TMF] de arsénico Hernán Videla Lira, 1999-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Ahora bien, respecto a la información disponible para años previos a la aplicación del protocolo, se presentan las emisiones anuales reportadas por la fundición para los periodos 1999-2013⁴⁴, y luego para 2014-2020. Dada la amplia extensión del periodo, se encuentran algunas particularidades y diferencias en la forma de registro. En ese sentido, el periodo anterior al 2014 no presenta metodología ni informes asociados, aunque, tiene datos completos para todos los meses por año. También, se presentan emisiones negativas en al menos un mes para los periodos de 2013 y 2014, además de los años expuestos anteriormente, correspondientes al periodo 2017-2020.

De forma complementaria, en la Figura 3-33 se presentan los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Hernán Videla Lira. La estimación considera el ratio entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Sin perjuicio de lo anterior, dada la falta de confianza en los datos no se calcula un valor promedio de la tasa de captura y fijación.

⁴⁴ Publicados en el SNIFA (Resumen al 2014)



Nota: por la inconsistencia metodológica se excluyen de la gráfica aquellos meses con emisiones negativas, que resultaban en niveles de captura y fijación superior a 100%.

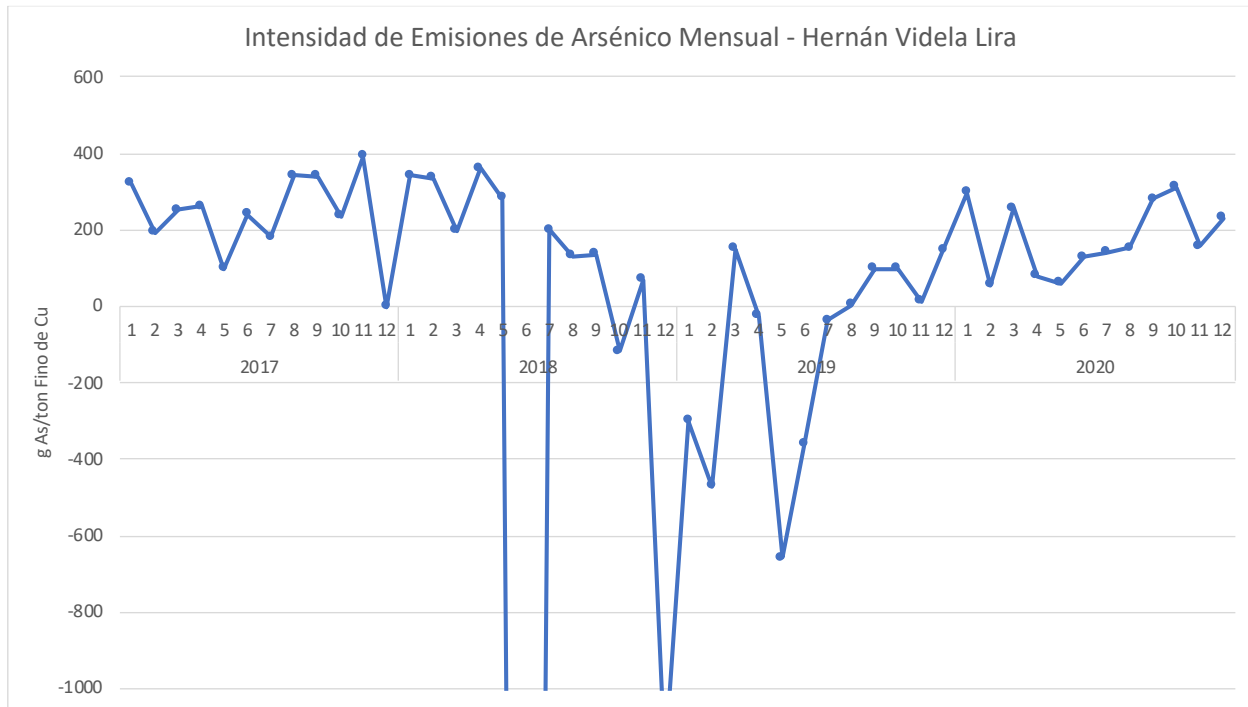
Figura 3-33 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición HVL, 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-34 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanta emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Además, dentro de los reportes técnicos publicados, se encuentra el indicador calculado, pero en vez de los finos de cobre, toneladas de CNU. Dado esto, es que los valores reportados no son comparables con otras fundiciones.

Es destacable que hasta mayo/2018 se observa cierta estabilidad en la intensidad de emisiones, a partir de entonces se observa una alta variabilidad del índice, con múltiples valores negativos que finalmente resultaron en la auditoría externa que realizó una serie de recomendaciones para solucionar los problemas en la estimación del balance de masa. Los promedios acumulados anuales son reportados en la comparación de fundiciones, donde el último año reportado presenta un promedio de 165 [g As/ton Cu fino] y tiene consistencia y sentido físico apropiado.

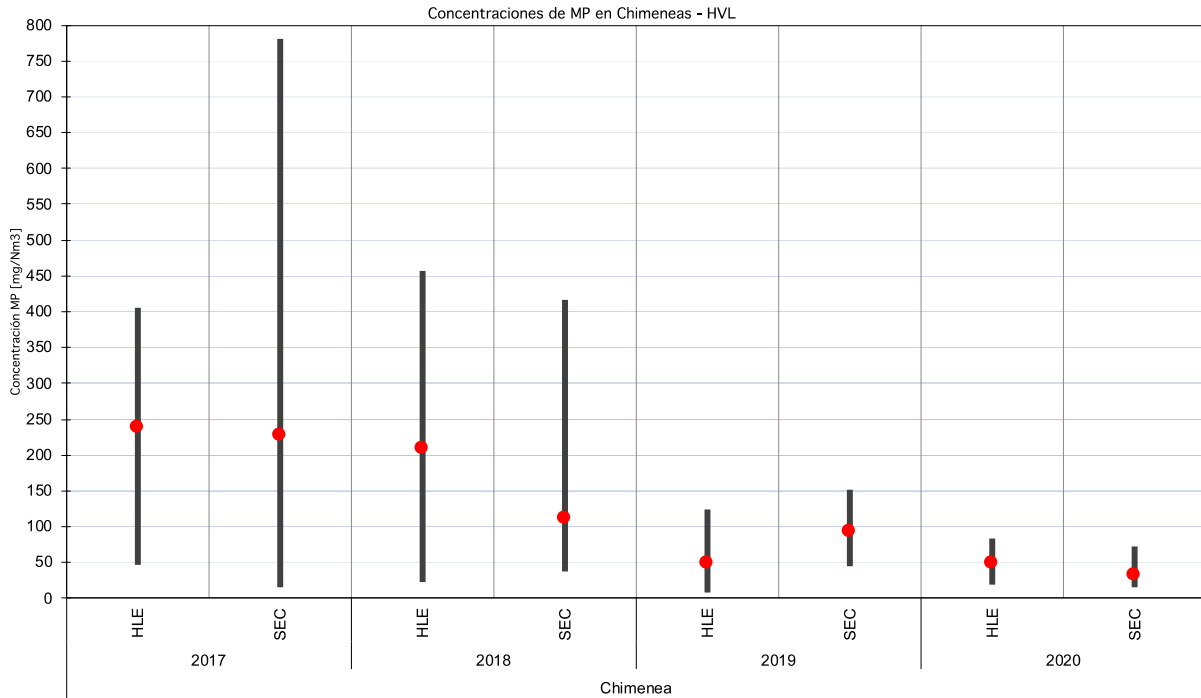
En particular, para los meses que reportan emisiones negativas, este indicador arroja valores de la misma naturaleza, los cuales son reportados y añadidos en la Figura 3-34.



Nota: Por cuestiones de visualización, se excluyen de la gráfica el valor -7,313 de junio/2018 y -1,186 correspondiente a diciembre/2018.

Figura 3-34 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición HVL, periodo 2017-2019

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

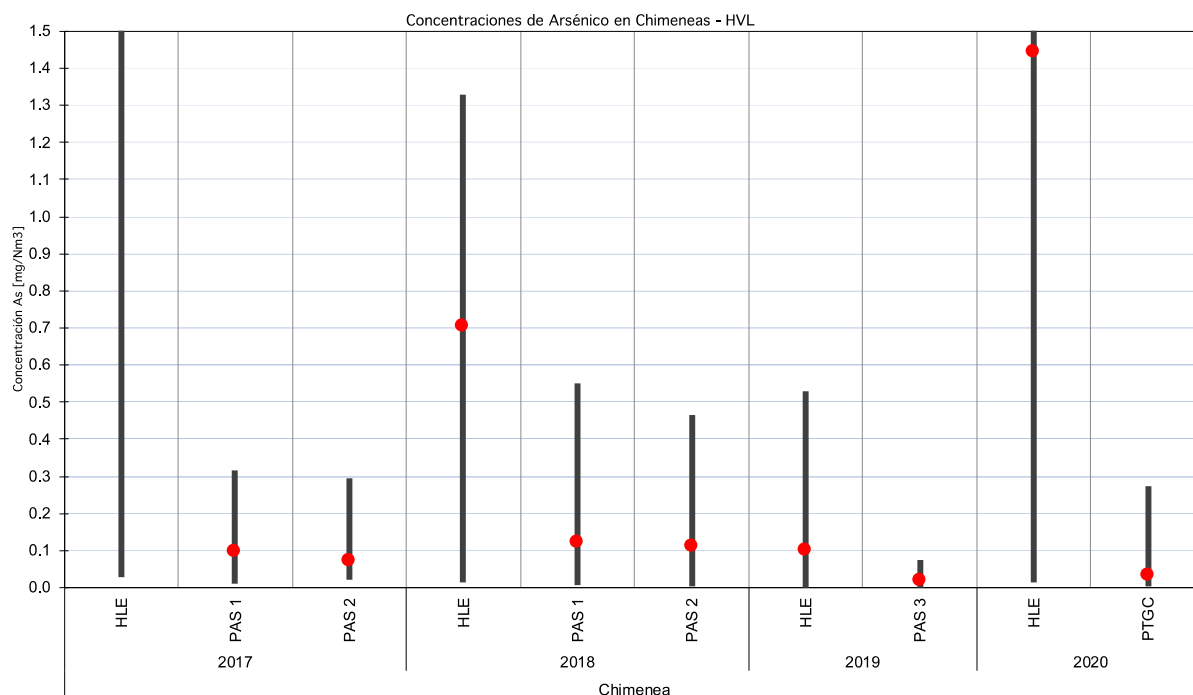


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-35 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Hernán Videla Lira 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-35 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, HVL presenta datos para las chimeneas del horno de limpieza de escoria y del proceso de secado en el periodo 2017-2020. En general, se puede observar un comportamiento de las medias a la baja en ambas chimeneas, pero con varios valores de medias y máximos superiores al umbral de 50 [mg/m³N]



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-36 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Hernán Videla Lira 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-36 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, HVL presenta datos para las chimeneas asociada al horno de limpieza de escoria y las plantas de ácido, además, desde el 2020 se presentan las mediciones de la PTGC. Para el año 2017, se halla un valor para el HLE altamente superior al resto, correspondiente a junio de aquel año, con 406.3 [mg/m³N], lo que resulta en una media de 41 [mg/m³N]. Luego, el año 2018 presenta valores máximos superiores al umbral de 1 [mg/m³N] en el HLE, al igual que en 2020, donde en este último se presentó un valor de 13,5 [mg/m³N] en el mes de marzo, el cual altera el promedio al alza, de no contabilizarse ese valor, la media tiene un valor de 0,35 [mg/m³N]. Las mediciones realizadas en las plantas de ácido se encuentran bajo la normativa y no superan el límite en concentraciones de As, al igual que las mediciones realizadas en las PTGC en el año 2020. Es relevante mencionar que las mediciones isocinéticas deben ser efectuadas en condiciones de operación normales, y que la metodología de muestreo cumpla con los requisitos establecidos.

3.3.5 Fundición Ventanas

En la Figura 3-37 se presenta el diagrama de la fundición de Ventanas. Se observa que la única entrada visible son los concentrados de material que alimentan al secador rotatorio.

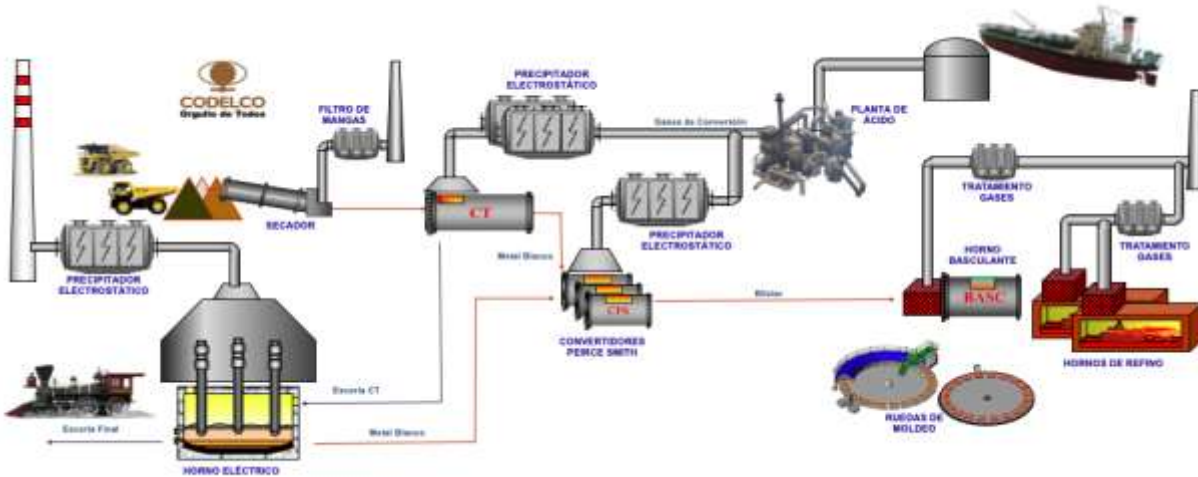


Figura 3-37 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Ventanas

Fuente: Planilla reportes técnicos 2019, letra m) diagrama proceso

La fundición Ventanas cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para elaborar el balance de masa. Los principales equipos e instalaciones se presentan en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15 Equipos e instalaciones principales de fundición Ventanas

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Secador Rotatorio	1	60 [t/h]
Convertidor Teniente	1	300 [t]
CPS	3	60 [t/carga]
Horno Eléctrico Limpieza de Escoria	1	6 [MW]
Horno de Retención	1	120 [t]
Horno Basculante	1	200 [t]
Hornos de refino	2	400 [t]
Ruedas moldeo ánodos	2	30 [t/h]
Planta de Ácido	1	140.000 [Nm ³ /h], 10,5% SO ₂
Planta Oxígeno	1	315 [t/día]

Fuente: Elaboración propia mediante metodología aprobada por Res. Ex. 1596/2018

SMA

A nivel operacional, la Figura 3-38 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”⁴⁵ de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.

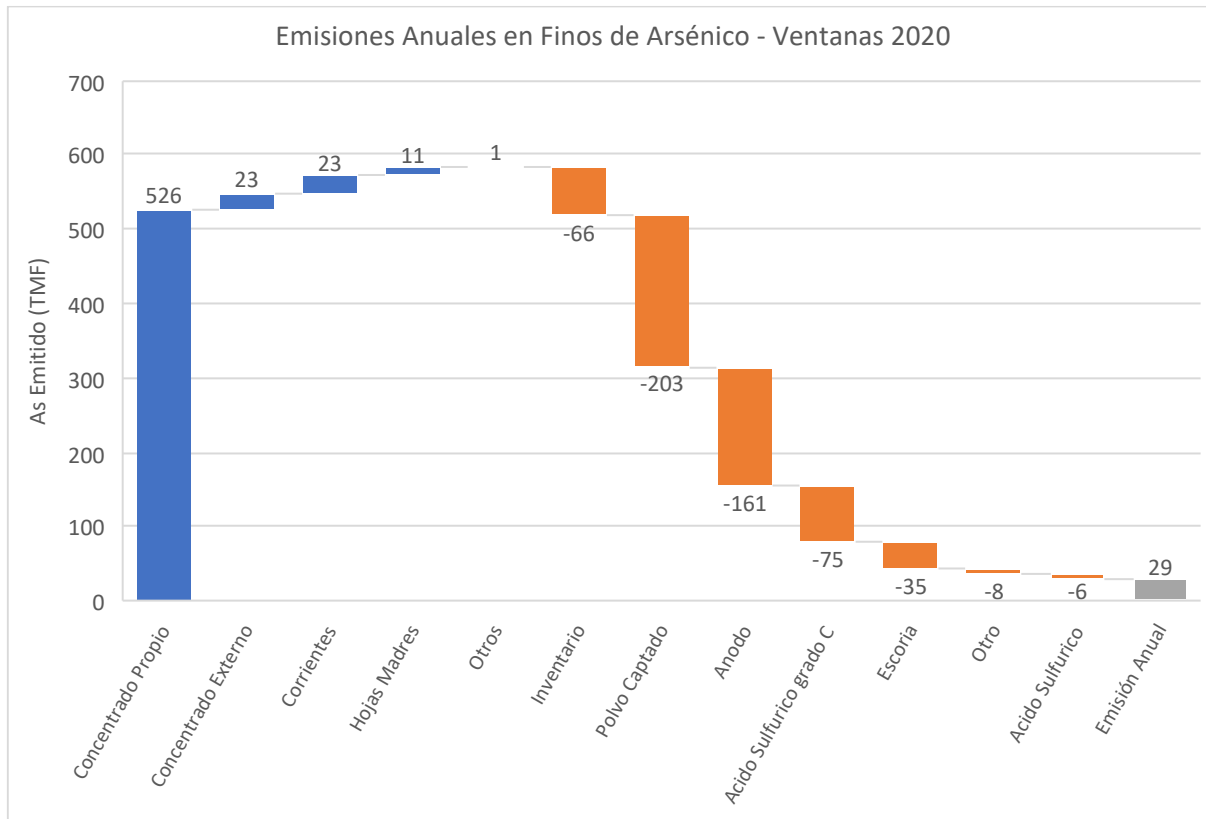


Figura 3-38 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Ventanas 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes mensuales

En los reportes de balance de masa se puede ver que la principal entrada corresponde al concentrado propio (90% de las entradas), que junto al concentrado externo representan el 94% de las entradas. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución entre varias corrientes. Principalmente, el polvo captado, los ánodos y el Ácido Sulfúrico C los cuales representan, respectivamente, un 35%, 28% y 13% de los contenidos de arsénico en los flujos de salida. Lo anterior resulta en una emisión estimada de arsénico de 26 TMF para el año correspondiente.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia de la existencia final y la existencia inicial, las cuales contienen los movimientos de los inventarios.

⁴⁵ Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

En la Figura 3-39 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

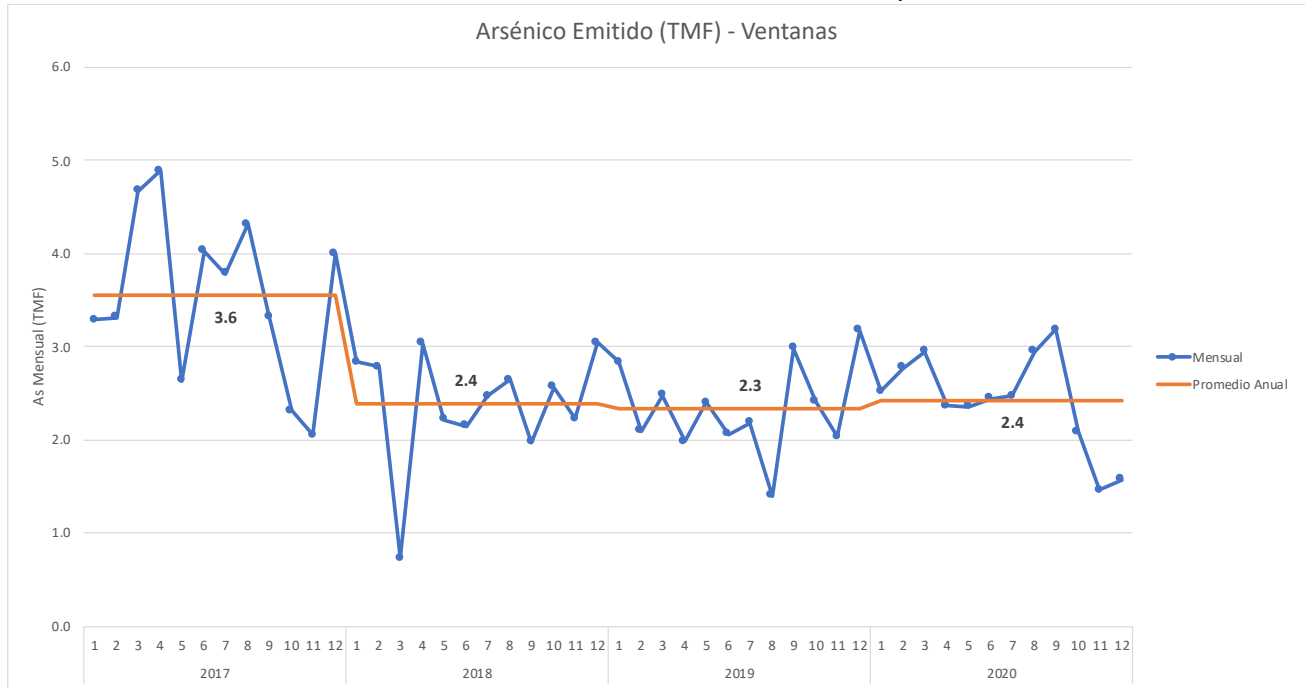
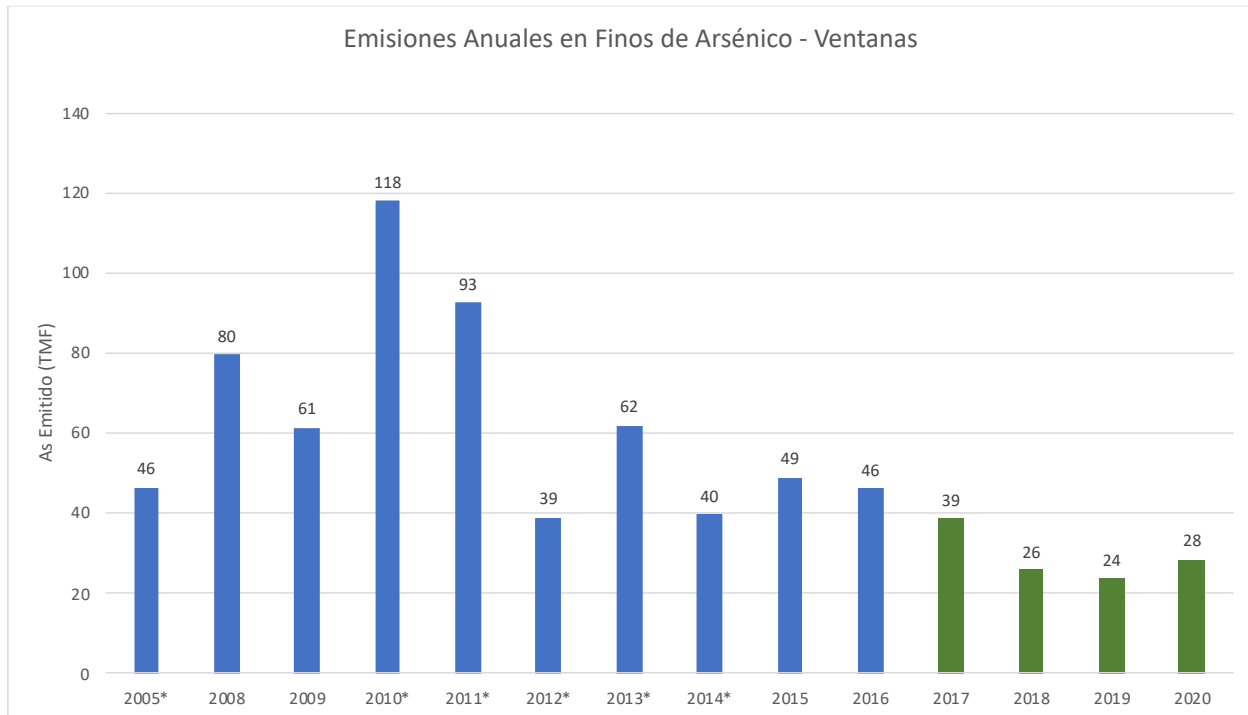


Figura 3-39 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-40 se pueden observar las emisiones anuales de la fundición Ventanas. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza.

Vale la pena resaltar que, desde el 2017 se cumple con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Ventanas se establece un límite de 48 [ton/año] de emisión.

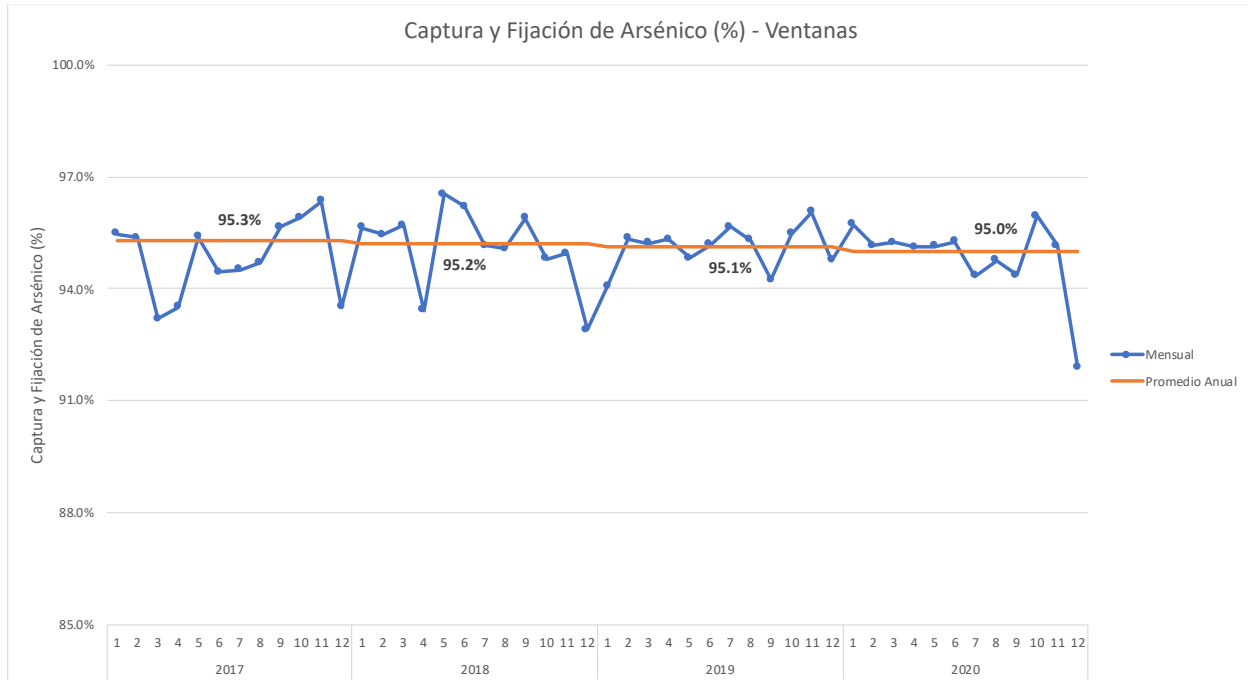


* Años con información incompleta. Al menos un mes sin reporte

Figura 3-40 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Ventanas, 2005-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y datos compilados por la SEREMI.

De forma complementaria, en la Figura 3-41 se presenta los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Ventanas. La estimación considera el ratio entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto, la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Se observa que durante todo el horizonte 2017-2020 la fundición de Ventanas habría superado dicha tasa de captura, manteniendo una tasa de captura anual bastante estable entre 95,1-95,3%. Es destacable que también se observa bastante estabilidad en los valores mensuales, los cuales si bien no tienen requisitos legales es una métrica de desempeño interesante de seguir.



Nota: Eje de las abscisas se fija entre 85% y 100% para la comparación entre las fundiciones.

Figura 3-41 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Ventanas, 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-42 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Se observa una disminución considerable en el año 2018, para mantener luego una estabilidad en el desempeño ambiental el 2019, y luego aumentarla al último año reportado.

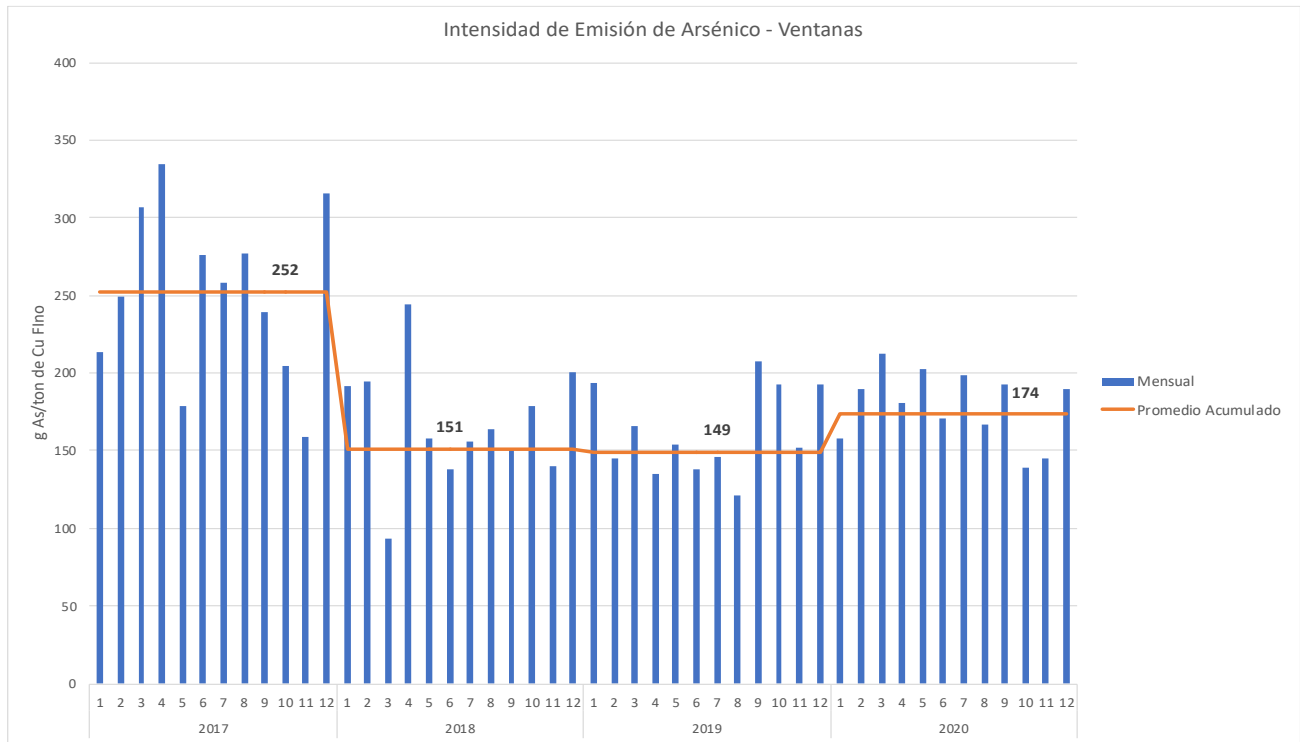
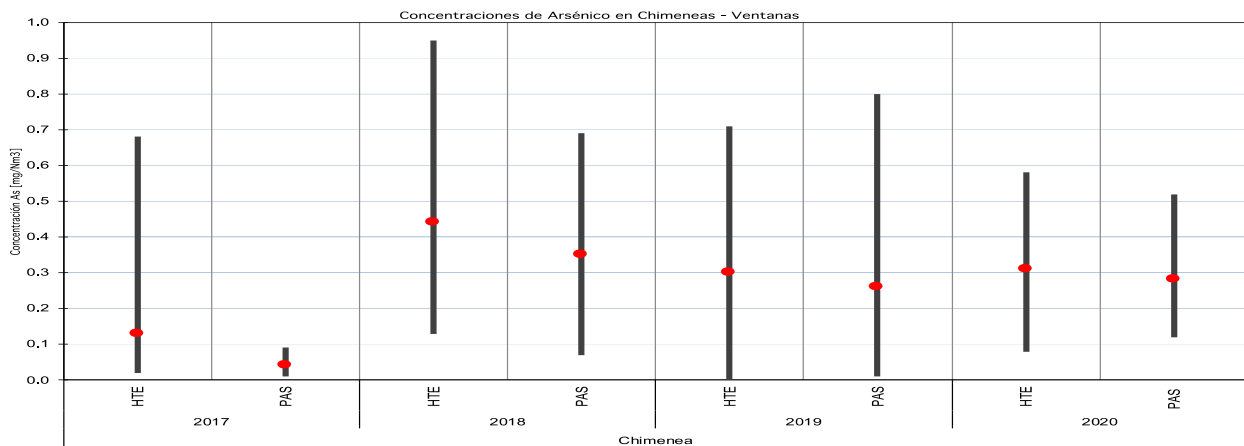


Figura 3-42 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Ventanas, periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

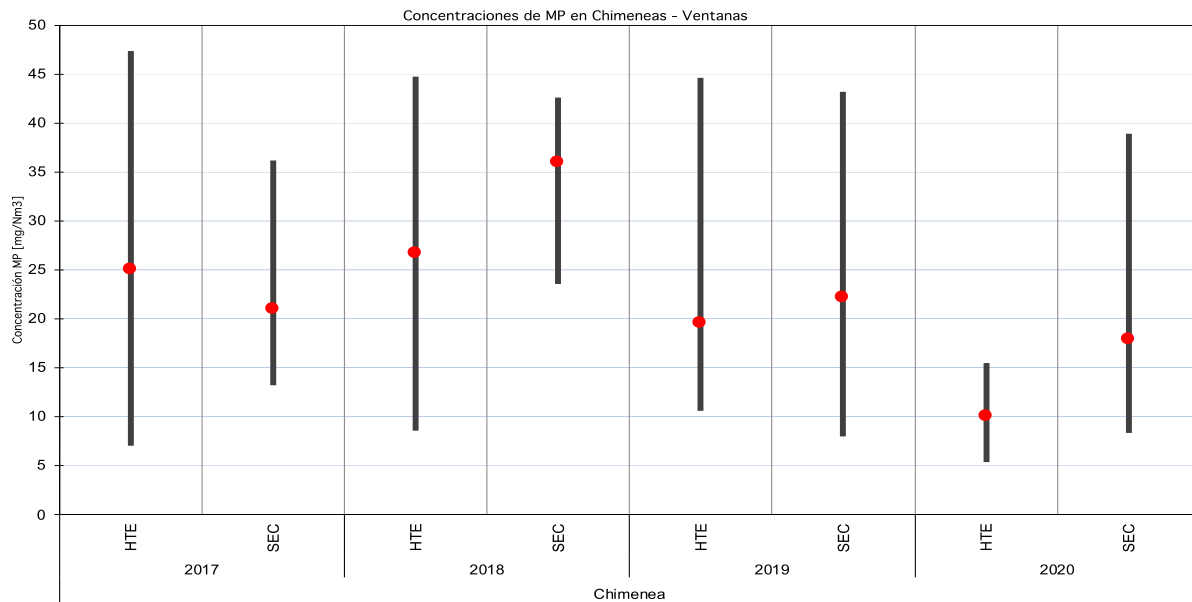


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-43 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Ventanas 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-43 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Ventanas presenta datos para las chimeneas asociada al horno de tratamiento de escoria y la planta de ácido. Se puede notar una disminución de las medias en el periodo 2018-2020, las cuales han estado cumpliendo la normativa. Las medias alcanzadas en el último año reportado son de 0,28 [mg/m³N] para las PAS, mientras que el HTE ronda los 0,3 [mg/m³N].



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-44 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Ventanas 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-44 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Ventanas presenta datos para las chimeneas asociada al horno de tratamiento de escoria y el proceso de secado. En general, se puede ver un alza en los valores reportados entre el año 2017 y 2018 para ambos procesos, para luego tener un comportamiento de disminución en las medias de concentraciones de material particulado. De esta manera, la chimenea asociada al proceso de secado reporta concentraciones medias de 10 [mg/m³N] y 17 [mg/m³N] para el HTE y SEC en el año 2020, respectivamente.

3.3.6 Fundición Chagres

La Figura 3-45 presenta el diagrama de operación de la fundición Chagres. En el diagrama se observa como desde diferentes faenas mineras se recibe concentrado de cobre el cual ingresa a la fundición en el secador, el cual a su vez alimenta el Horno Flash. En este horno se produce la fusión del concentrado, teniendo diferentes salidas: gases que se dirigen hacia la planta de ácido circulando por sistemas de limpieza de gases; escoria que se dirige a hornos de limpieza de escoria; y eje que se dirige a los CPS. La fundición es un proceso complejo, donde los diferentes procesos unitarios interactúan entre ellos no linealmente existiendo, por ejemplo, retroalimentaciones entre procesos.

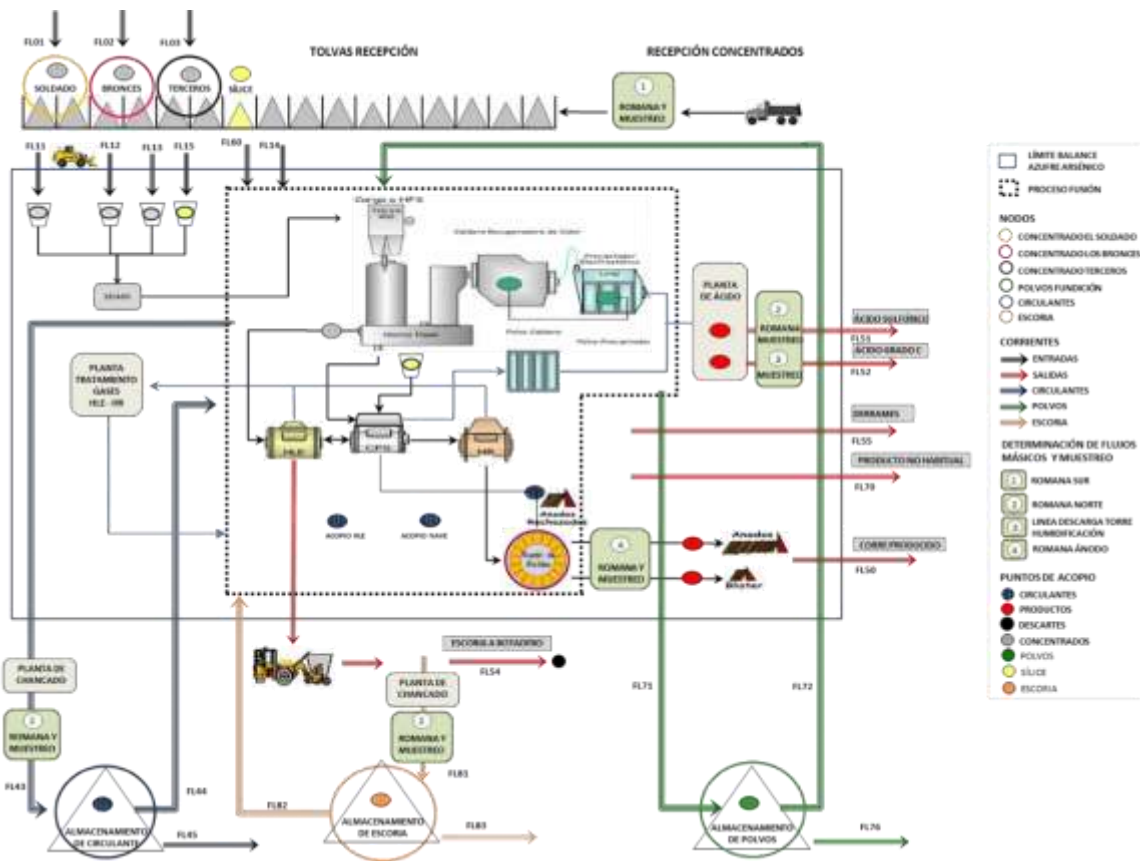


Figura 3-45 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Chagres

Fuente: Reportes técnicos 2019, letra m) diagrama proceso

La fundición Chagres cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-16. Se destaca que, a diferencia de otras fundiciones, Chagres cuenta con un horno flash utilizado para la fusión del concentrado.

Tabla 3-16 Equipos e instalaciones principales de fundición Chagres

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Secador	1	137,5 [t/h]
Horno Flash	1	1790 [t/día]
CPS	4	597 [t/día]
Hornos de Limpieza de Escoria	2	987 [t/día]
Hornos de Refino	2	544 [t/día]
Rueda de Moldeo	1	40 [t/h]
Planta Tratamiento de Gases HLE	1	-
Planta de Tratamiento de HR	1	-
Planta de Ácido	1	1800 [t/día]

Fuente: Elaboración propia en base a metodología de balances de masa 2018 aprobada por la SMA

A nivel operacional, la Figura 3-46 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”⁴⁶ de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.

⁴⁶ Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

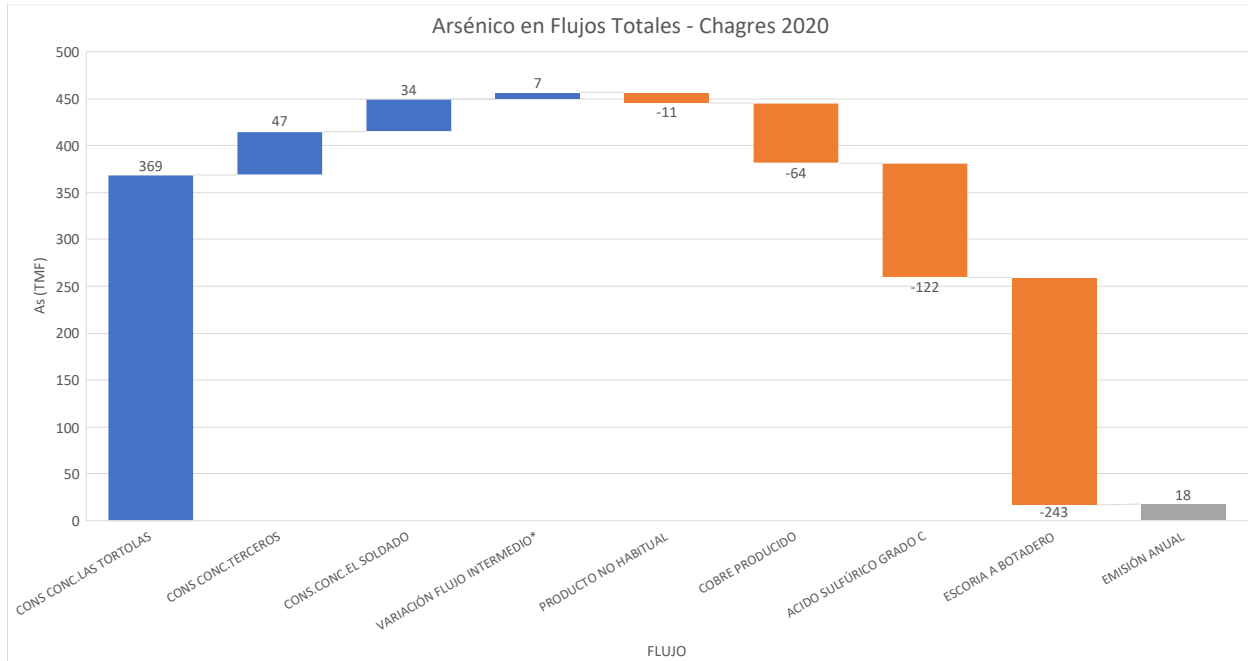


Figura 3-46 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Chagres 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos mensuales

En la Figura 3-46 se puede ver que las entradas relevantes son las recepciones de concentrado, estas corresponden a Las Tórtolas, de Terceros y de El Soldado. La fundición Chagres recibe cotidianamente los concentrados señalados, cada uno con distintos valores de contenido químico de arsénico. Se puede ver que las Tórtolas representa el 60% del arsénico en las entradas, mientras que el concentrado de terceros y de El Soldado, el 26% y 7,5%, respectivamente. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución entre varias corrientes. Principalmente, la Escoria a Botadero, que constituye las pérdidas de la operación, representa el 55%. Luego, el Ácido Sulfúrico C y el Cobre Producido, provenientes de la planta tratamiento del ácido y horno de refinación, respectivamente, contribuyen un 27% y 15% de los contenidos de arsénico en los flujos de salida. Finalmente, en este mismo sentido, el denominado producto no habitual, comercializado en eventualidades a otras fundiciones y/o plantas de tratamiento, es contabilizado con 11 TMEF al año de arsénico. Lo anterior resulta en una emisión estimada de arsénico de 18 TMEF.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia de la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. En ese sentido, los más relevantes son el circulante y escoria en el consumo (4,3 y 1,5 TMEF), además del circulante generado (4 TMEF). Además, se debe mencionar que los flujos que no aparecen en esta gráfica tienen valores cercanos al nulo, estos son para las entradas: Oxígeno, Sílice, Polvos, Insumos no Habituales. Luego, para las salidas, se encuentran estas características en el Ácido Sulfúrico.

Luego, en la Figura 3-47, se presentan los valores de emisiones mensuales de arsénico para el periodo 2017-2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

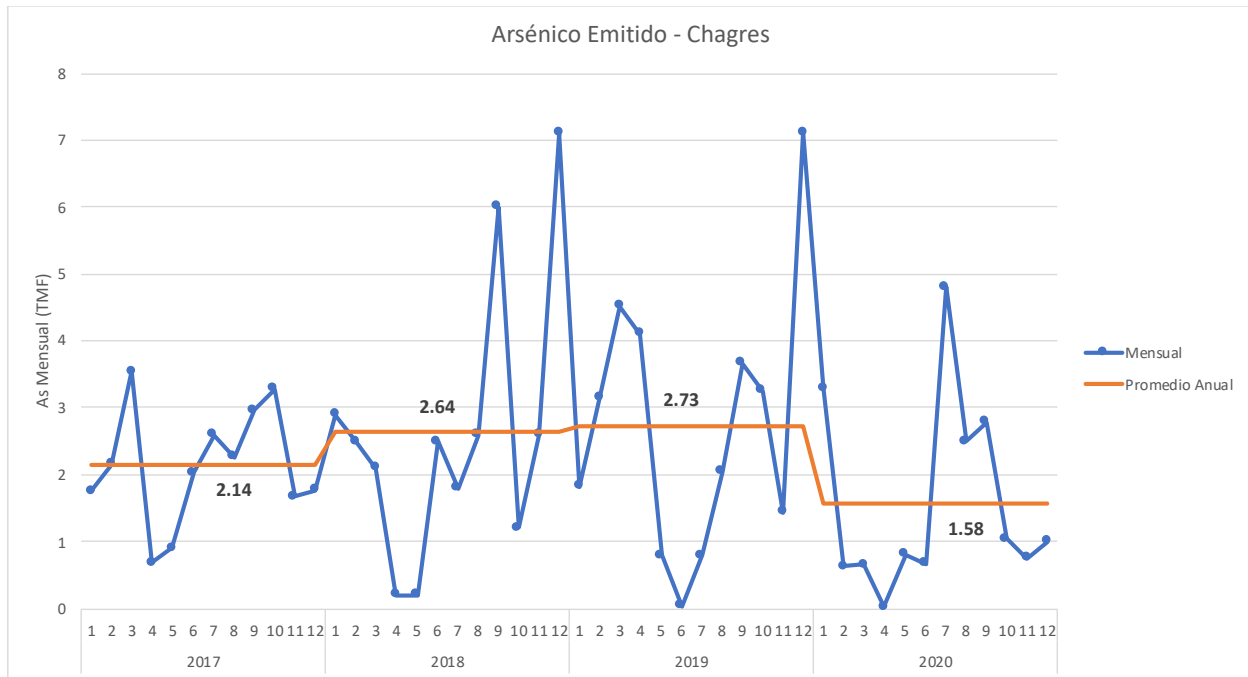


Figura 3-47 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que van desde valores cercanos a 0 [TMF/mes] hasta 7 [TMF/mes]. Sin embargo, a nivel anual se observa una operación relativamente estable. Los promedios anuales resultantes de los balances de masa van desde las 1,58 [TMF/mes] en el año 2020 a 2,73 [TMF/año] del año 2019. Lo anterior, da cuenta de que, dentro de un mismo año, los meses con emisiones excepcionalmente altas se tienden a compensar con otros meses con emisiones especialmente bajas, resultando en emisiones promedios relativamente estables.

Lo anterior es levemente distinto a lo que observa en la Figura 3-48, donde se ve una estabilidad histórica con cierta variabilidad en los últimos años. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza.

Es destacable que los resultados de emisiones de arsénico cumplen con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Chagres se establece un límite de 35 [ton/año] de emisión. Es importante destacar que, en el año 2019 el límite de emisión estuvo cerca de superarse llegando a emitir un 94% del límite de emisión máximo. En el mismo sentido, se debe señalar que la fundición no reportó material de limpieza para el periodo, por lo que la emisión anual será mayor a la de otros años. Esto se debe a que la fundición no realizó mantenciones de remoción de material en los equipos.

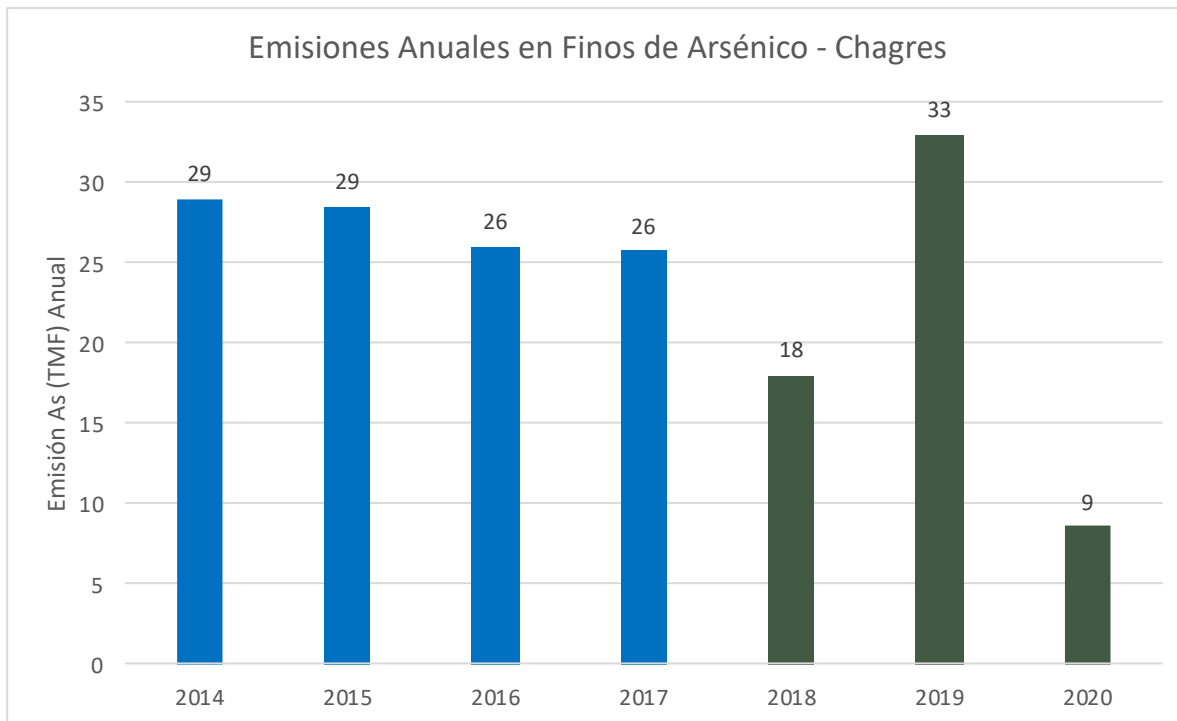


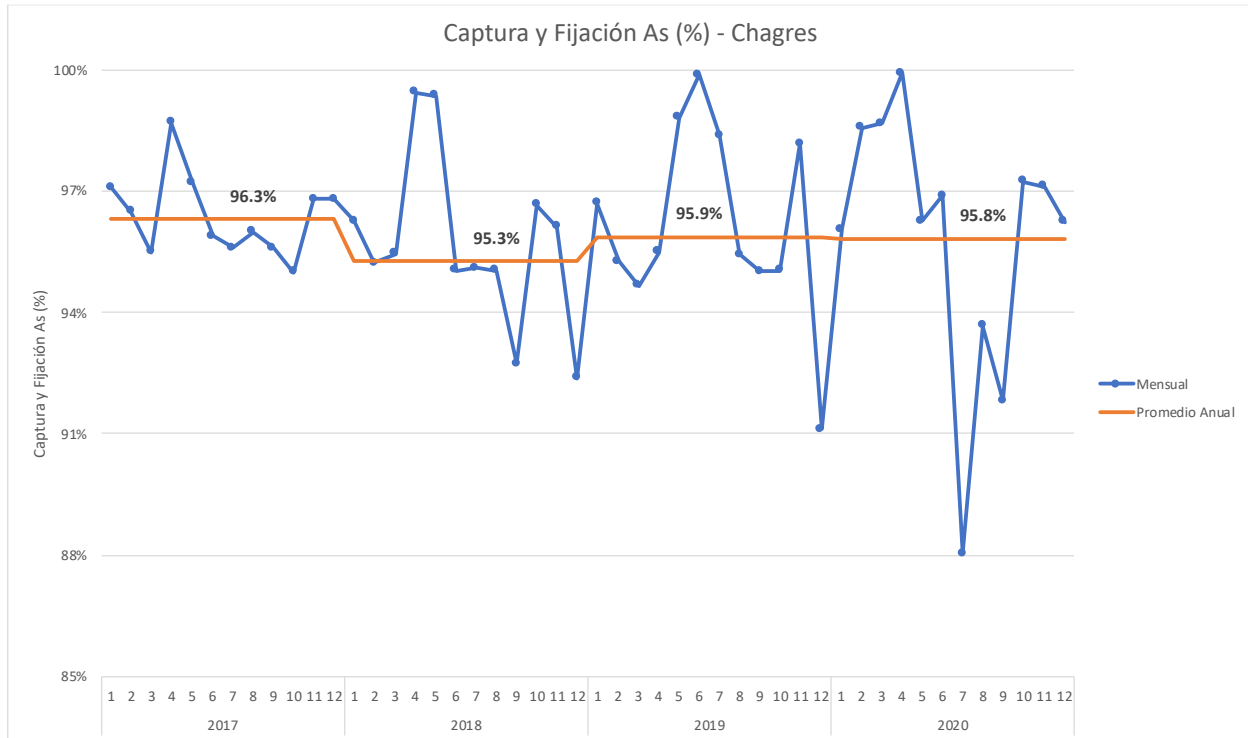
Figura 3-48 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Chagres, 2014-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y datos compilados por la SEREMI.

Ahora bien, respecto a la información disponible e incluyendo años previos a la aplicación del protocolo, se presentan las emisiones anuales reportadas por la fundición para el periodo 2014-2020. Cabe mencionar, que para el año 2015, el mes de marzo presenta un balance de emisión negativa (-2,1 TMF). Por otra parte, se señala que el valor indicado en la presente tabla corresponde a lo informado en el informe de la auditoría externa 2017, cuyo objetivo es evaluar la aplicación de la metodología de balances de masa en el año 2016.

De forma complementaria, en la Figura 3-49 se presentan los valores reportados de la captura y fijación de arsénico en la fundición Chagres. La estimación considera la proporción entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto, la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser igual o mayor a un 95%. Se observa que durante todo el horizonte 2017-2020 la fundición de

Chagres habría superado dicha tasa de captura y fijación, manteniendo una tasa de captura y fijación anual bastante estable entre 95,3-96,3%. Cabe destacar que a pesar de tener un máximo de emisión anual para el año 2019, no se superó el límite de captura y fijación de arsénico porcentual.



Nota: Cabe mencionar, que el eje de las abscisas se fija entre 85% y 100% para la comparación entre las fundiciones

Figura 3-49 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Chagres, 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-50 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad.

Se observa que si bien, mensualmente existen variaciones relevantes a nivel anual el indicador se ha mantenido variable en torno a 220-230 [g As/ton Cu fino]. Se observa que el año con indicador mayor (2019) represento un aumento de 20% respecto del año anterior. Considerado que las emisiones anuales aumentaron cerca de un 85% (ver Figura 3-50), se observa que dicho aumento es explicado sólo parcialmente por el aumento de las emisiones unitarias, mientras que el resto de la diferencia se explicaría por qué no hubo material de limpieza. Al año 2020, se logra una reducción de 24% de la intensidad de emisiones respecto del año 2018, mientras que sus

emisiones totales cayeron cerca de 50%, lo cual induce a pensar que la diferencia restante es atribuible a una reducción del nivel de actividad.

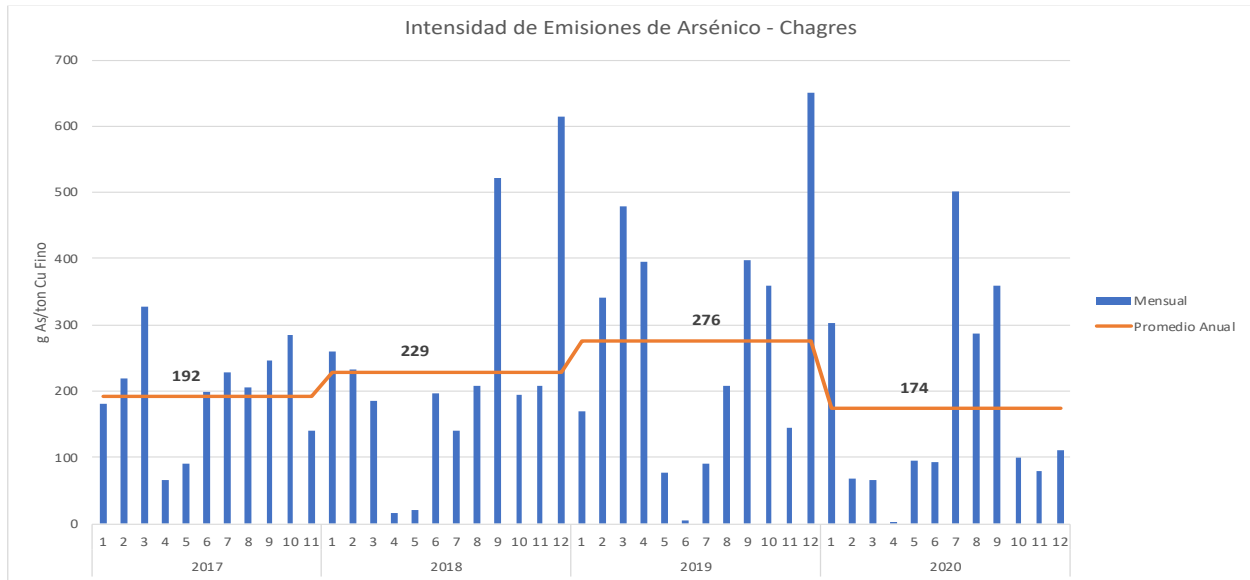
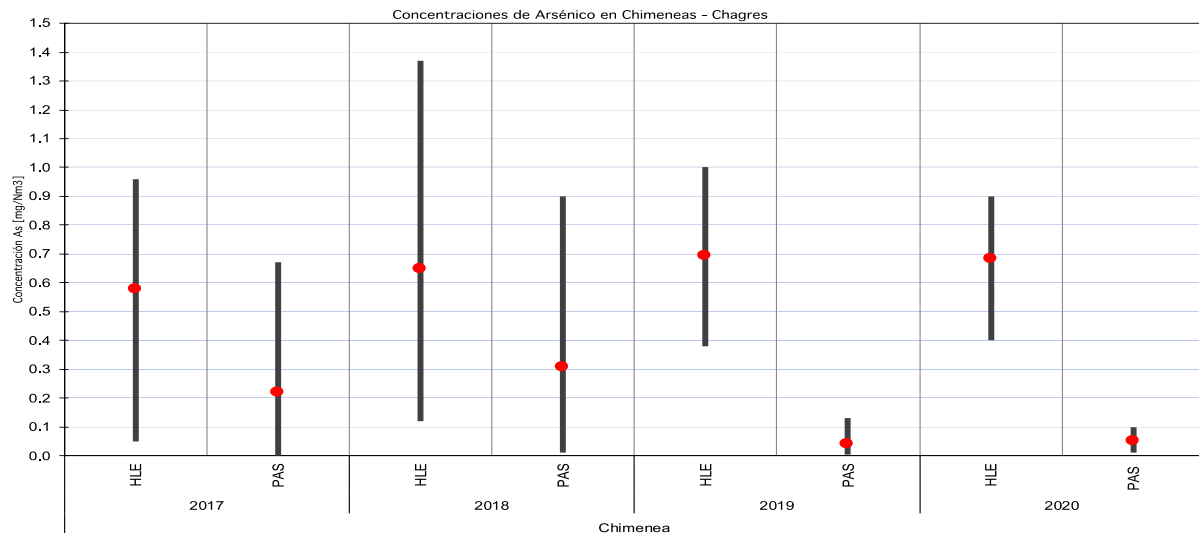


Figura 3-50 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Chagres, periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

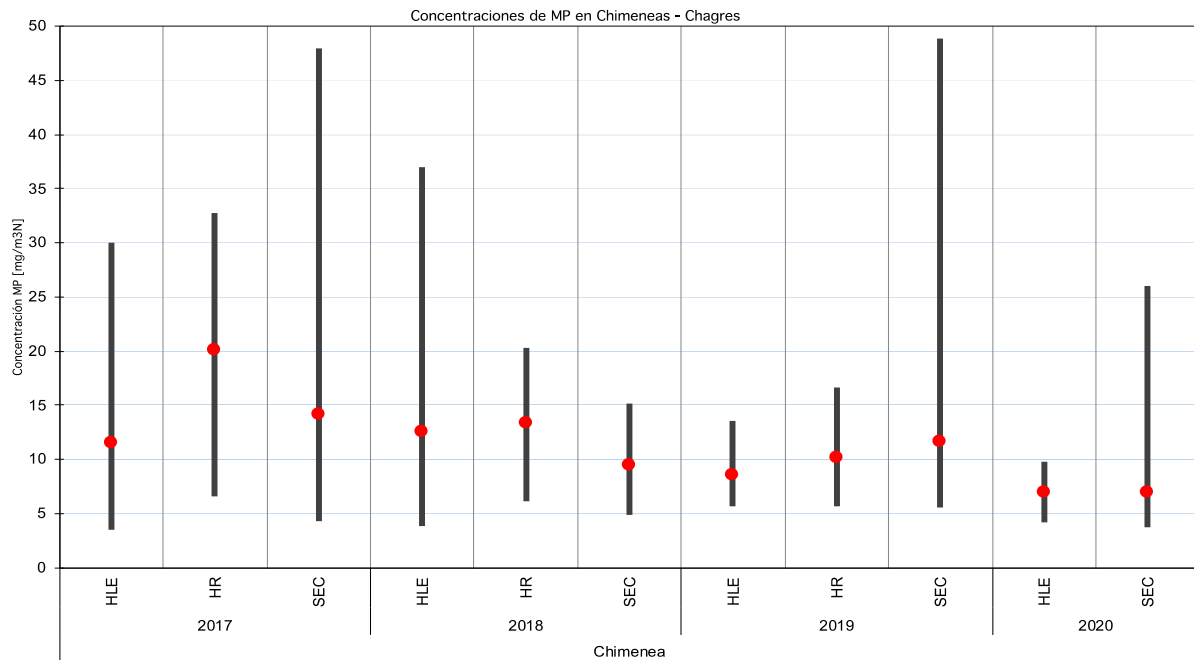


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-51 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chagres 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-51 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Chagres presenta datos para las chimeneas asociadas al horno de limpieza de escoria y planta de ácido. En general, se pueden ver máximos que superan o son iguales a el umbral del 1 [mg/m³N] de As, ocurridos en enero/2018 y agosto/2019, con 1,37 [mg/m³N] y 1 [mg/m³N] respectivamente. Respecto a los valores asociados a la PAS, se observa que hay un comportamiento estable en los últimos dos años, con valores de medias de 0,04 [mg/m³N] y 0,05 [mg/m³N] para el 2019 y 2020, respectivamente, inferiores a la media de concentración de As del periodo anterior.



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-52 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chagres 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-52 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Chagres presenta datos para las chimeneas asociadas al horno de limpieza de escoria, horno de refinado anódico y el proceso de secado. En general, se puede ver un cumplimiento absoluto en las mediciones de material particulado, ya que ni una verificación mensual supera el límite de 50 [mg/m³N] de concentración para ni uno de los procesos.

3.3.7 Fundición Caletones

En la Figura 3-53 se presenta un diagrama esquemático de la fundición Caletones, donde se observa que el proceso principal comienza con la alimentación mediante las correas 212 y 235 de la planta de secado de concentrado, el cual alimenta al reactor de fusión. Desde este punto se complejiza el flujo, teniendo flujos separados para los gases, metal blanco y escoria, cada uno teniendo procesos diferentes, los cuales incluso cuentan con retroalimentaciones.

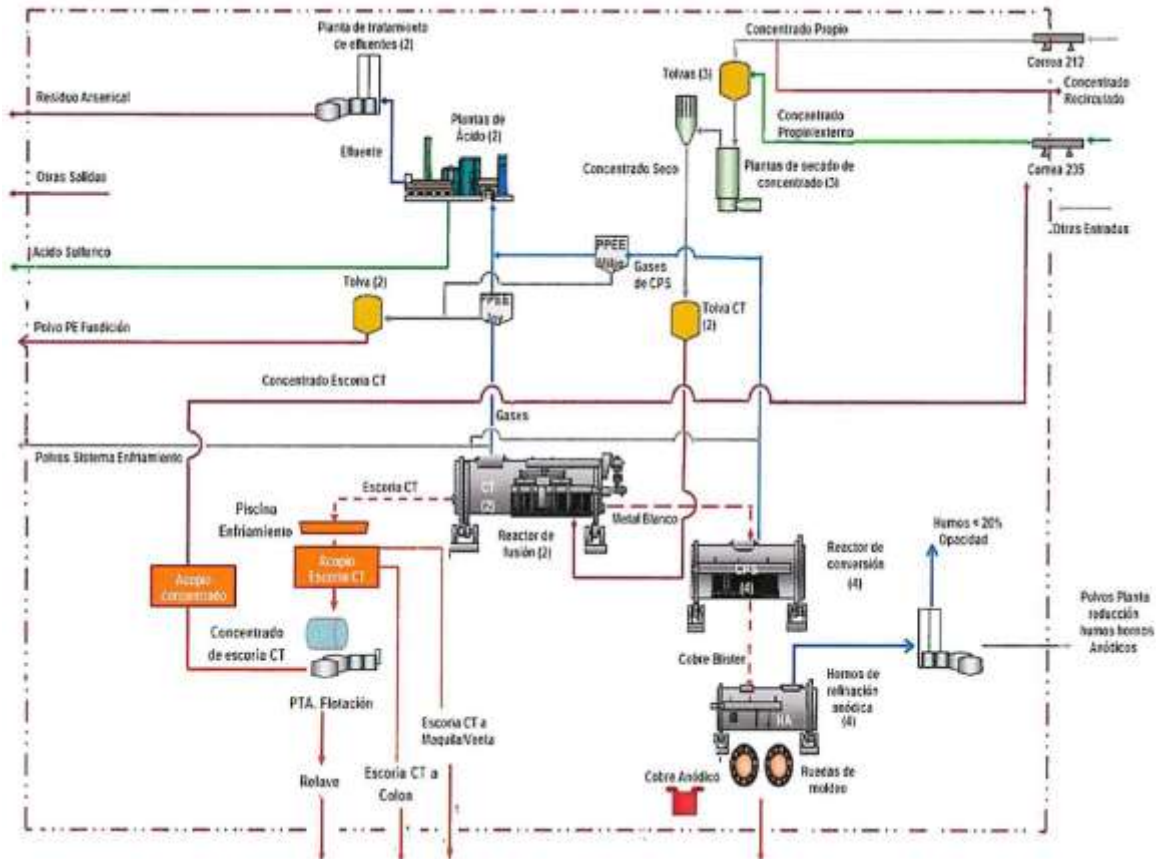


Figura 3-53 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Caletones

Fuente: Auditoría a Metodología de Balance de Arsénico 2019

La fundición Caletones cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-17. A diferencia de otras fundiciones, se observa la existencia de tres hornos de secado. Así como dos convertidores Teniente como reactor de fusión.

Tabla 3-17 Equipos e instalaciones principales de fundición Caletones

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Horno de secado Fluosólido N°1	1	65 [t/h]
Horno de secado Fluosólido N°2	1	90 [t/h]
Horno de secado Fluosólido N°3	1	150 [t/h]
Reactor de Fusión (Tipo Teniente)	2	90 [t/h]
Reactor de Conversión (Tipo CPS)	4	200 [t/carga]
Horno de Refinación Anódica (Tipo Basculante)	4	400 [t/carga]
Rueda de Moldeo 28	1	28 moldes
Rueda de Moldeo Twin	2	16 moldes
P. Limpieza Gases N°1	1	192.400 [Nm3/h]
P. Limpieza Gases N°2	1	329.000 [Nm3/h]
Planta Reducción de Emisiones N°1	1	180.000 [Nm3/h]
Planta Reducción de Emisiones N°2	1	280.000 [Nm3/h]
Planta Reducción de Hornos Anódicos	2	165.659 [m3/h]
Planta Tratamiento Escoria CT	1	3750 [ton/día]

Fuente: Elaboración propia en base a metodología balance de arsénico 2019

A nivel operacional, la Figura 3-54 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”⁴⁷ de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.

⁴⁷ Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

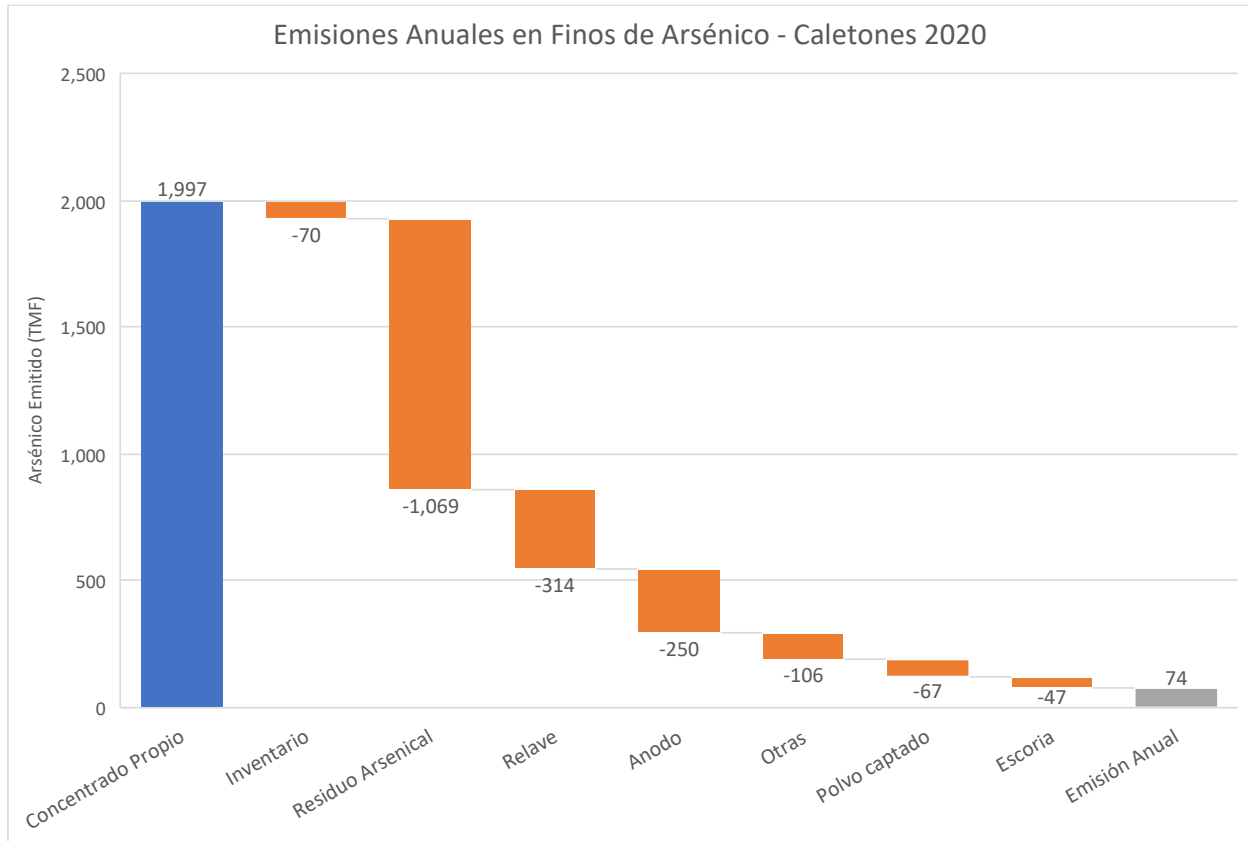


Figura 3-54 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Caletones 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes mensuales

En la Figura 3-54 se puede ver que en la fundición Caletones, la principal entrada de arsénico es la recepción de concentrado propio. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución en más corrientes, la de residuo arsenical, que corresponde al efluente producto de la limpieza de los gases, relave planta de flotación de escoria, ánodos y polvos precipitadores electrostáticos. La primera corriente de salida mencionada, contribuye en un 54% al total acumulado, mientras que el relave y los ánodos producidos representan un 16% y 13%, respectivamente. Lo anterior resulta en una estimación de la emisión anual de 74 [TMF], comparable en magnitud con el arsénico del flujo de otras salidas.

Cabe mencionar, que la variación de los flujos intermedio corresponde al balance de varios flujos, dentro de los cuales los principales son los inventarios de carga fría y concentrado de escoria CT. Es el primero mencionado, el que tiene una mayor movilidad respecto a ese año, con una variación de -54,58 [TMF] de finos de arsénico. Luego, cabe mencionar el inventario de polvos de planta de reducción de humos en hornos anódicos, el cual tiene una variación positiva de 1,8 [TMF] de finos de arsénico, a pesar de no ser de los flujos más grandes.

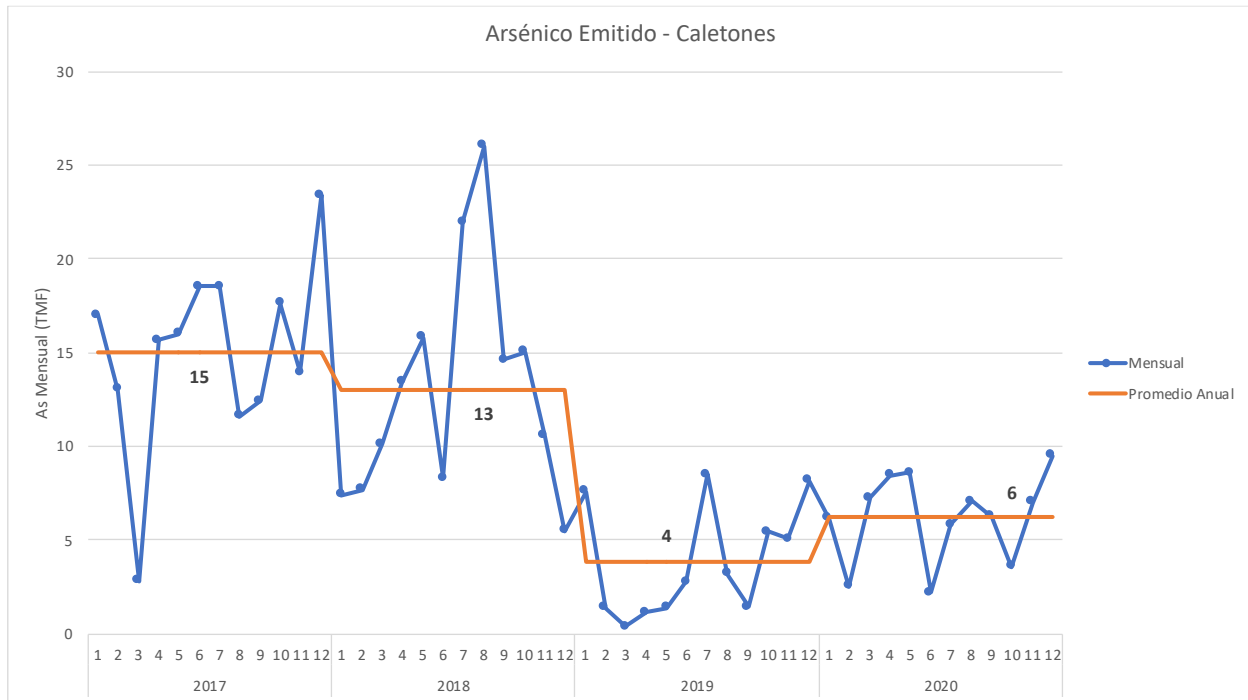


Figura 3-55 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-55 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que oscilan entre valores cercanos a 0 [TMF/mes] y hasta 26 [TMF/mes]. Al comparar los valores anuales, se observa que, si bien los años 2017 y 2018 contaban con valores similares, desde octubre/2018 se observa una reducción sistemática de las emisiones mensuales de arsénico que resultan en emisiones significativamente menores en el año 2019, lo cual también se mantiene para el último año reportado. Los promedios anuales resultantes de los balances de masa parten en 15 [TMF/año] el año 2017 y terminan en 6 [TMF/mes] el año 2020.

Lo anterior resulta en la disminución de las emisiones anuales que se observa en la Figura 3-56. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza.

Se puede observar también que recién el 2019 se cumple con holgura los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Caletones se establece un límite de 130 ton/año de emisión. Este comportamiento tuvo un declive relevante, el cual se mantuvo durante el año 2020, donde, en comparación con años anteriores, la emisión representa menos del doble e incluso en algunos casos, el triple.

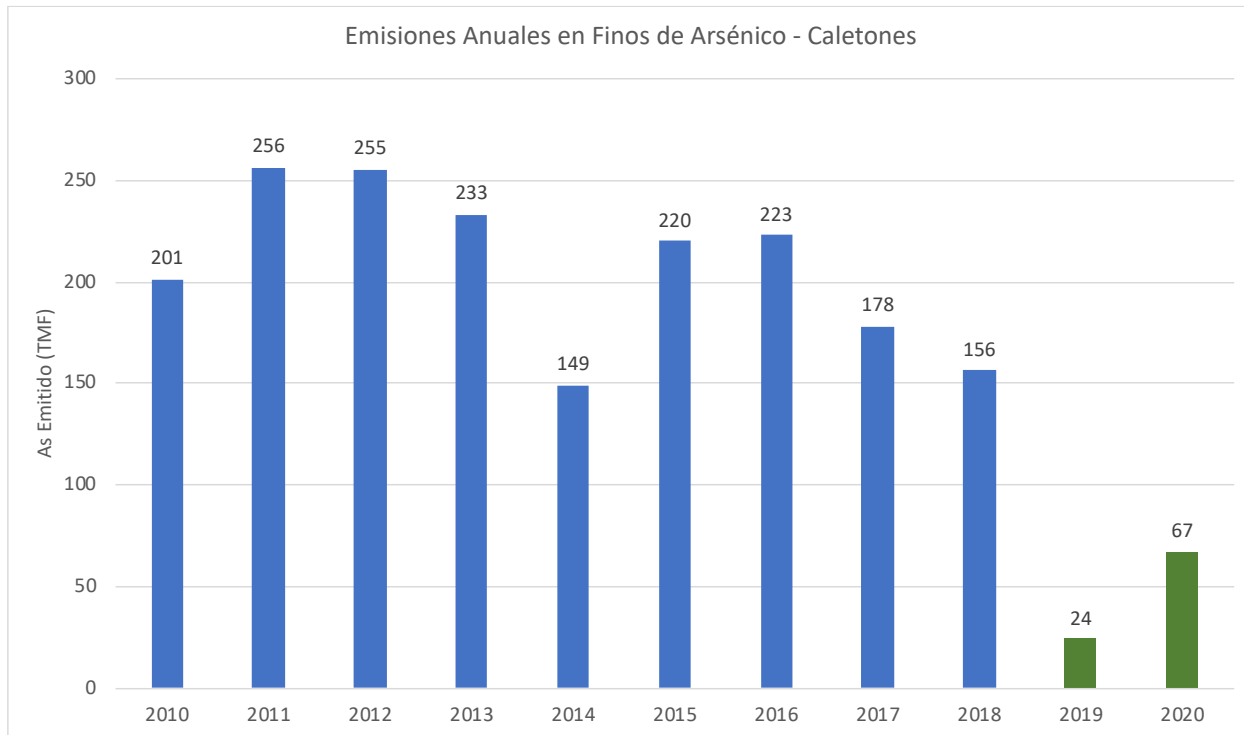
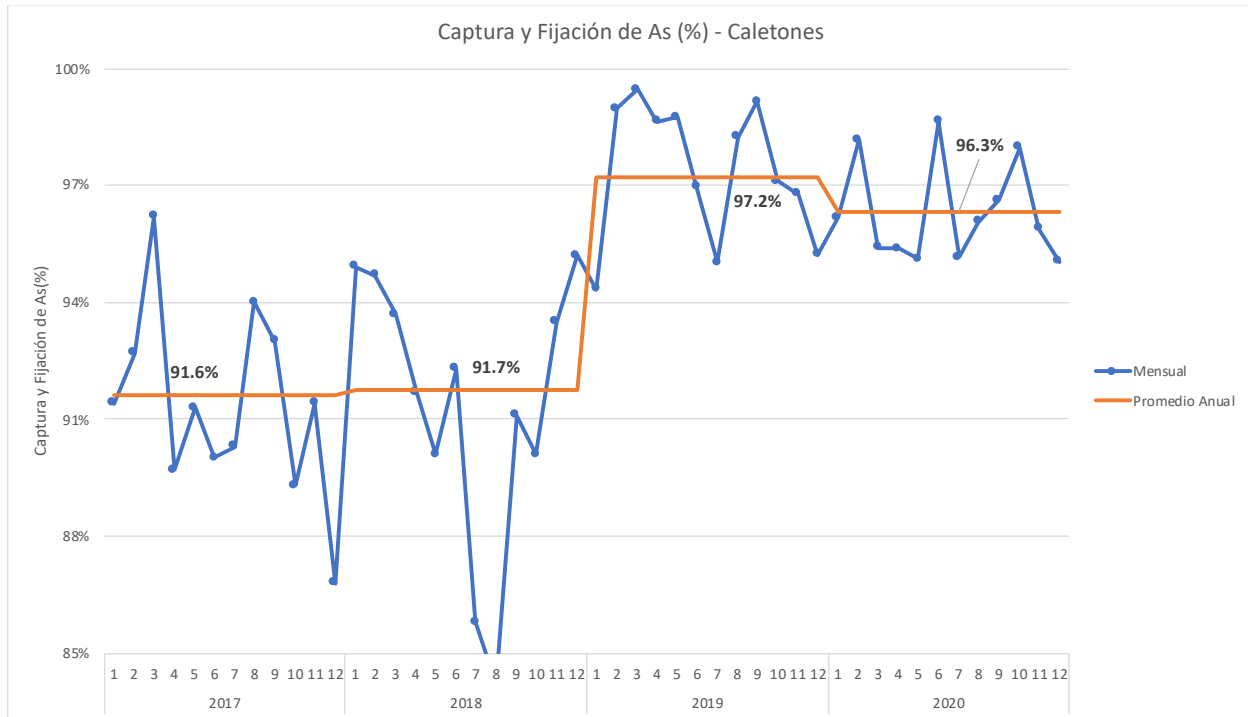


Figura 3-56 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Caletones, 2010-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y antecedentes Codelco

De forma complementaria, en la Figura 3-57 se presentan los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Caletones. La estimación considera la proporción entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto, la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Similar a las emisiones, se observa que recién el 2019 se cumple con la tasa de captura anual, logrando cambiar la tendencia anterior de 91,6%-91,7% a un satisfactorio 97,2%. Este significativo aumento de la tasa de captura y fijación de arsénico es una de las razones principales que explican la reducción en las emisiones mensuales y anuales observadas en la Figura 3-55 y Figura 3-56.



Nota: Por escala no se incluye en la figura el valor 84.2%, correspondiente a agosto/2018.

Figura 3-57 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Caletones, 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-58 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. En la Figura 3-58 se observa la mejora en desempeño ambiental de Caletones, apuntando a que la mejora en los niveles de emisión no responden a cambios en el nivel de actividad (producción de cobre), sino que a una reducción significativa de las emisiones unitarias, considerando las mejoras tecnológicas que la fundición Caletones implementó, en pos de dar cumplimiento a los límites de emisión establecidos en el D.S. 28/2013. Estas, tales como la optimización de plantas de secado, reducción de opacidad humos de hornos anódicos y la planta de tratamiento de escorias.

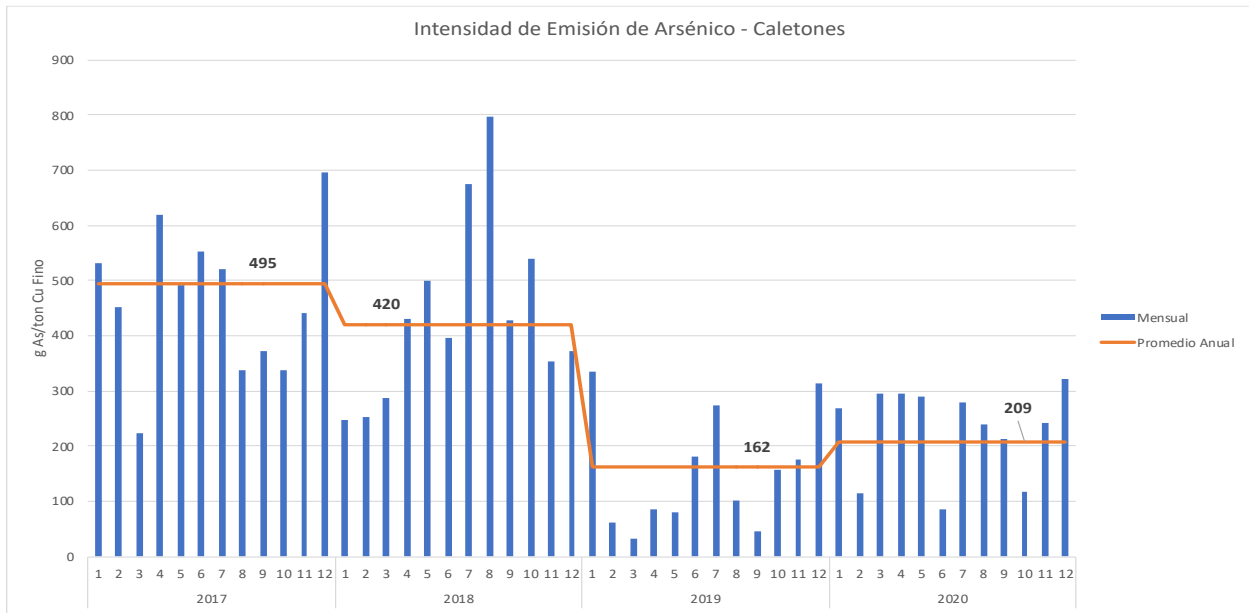
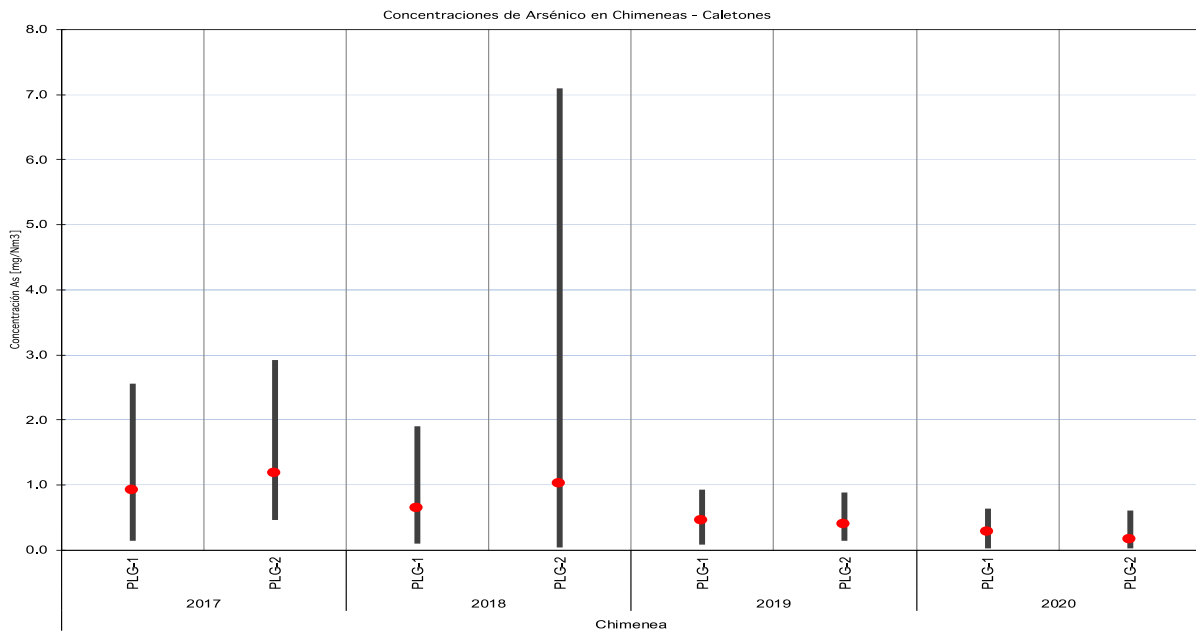


Figura 3-58 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Caletones, periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

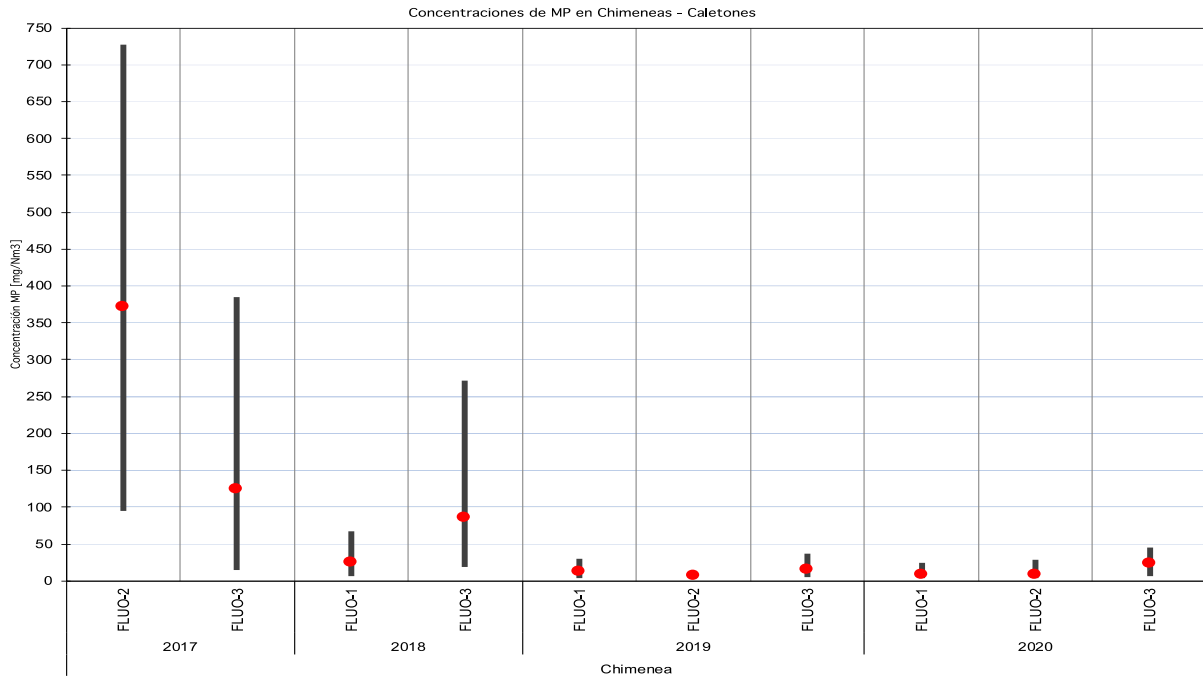


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-59 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Caletones 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-59 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Caletones presenta datos para las chimeneas asociadas la planta de lavado de gases. En general, se puede ver un cumplimiento absoluto en el periodo de entrada en vigencia de la norma, además de una disminución de los valores medios de concentración con el paso del tiempo.



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

Figura 3-60 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Caletones 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-60 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Caletones presenta datos para las chimeneas asociadas los procesos de secadores fluosólidos. En general, se observa una disminución en los valores medios y máximos desde el 2017 hasta el 2019, para luego incrementar los valores medios en las chimeneas de FLUC-2 y FLUC-3 en el 2020 dentro del umbral de 50 [mg/m³N]. Se puede ver un cumplimiento absoluto en las mediciones de material particulado en el periodo de cumplimiento de la normativa, ya que ni una verificación mensual supera el límite de 50 [mg/m³N] de concentración para ni uno de los procesos.

3.3.8 Comparación entre Fundiciones

En el siguiente apartado, se presenta la información recopilada a manera de comparar los distintos indicadores que reportan las fuentes emisoras de arsénico. Así, se podrán identificar los puntos importantes, capacidades y desempeño que tienen las fundiciones de cobre, asociados a la emisión de arsénico.

Tal como se ha mencionado anteriormente, la estandarización de la información reportada toma a lugar desde el periodo del año 2017, cuando comienza a regir la instrucción de carácter general sobre deberes de remisión de información para fuentes emisoras reguladas por el D.S. 28/2013 del MMA (Resolución Exenta N° 866/2016 SMA). Por esto, es que solo los datos más fidedignos y constantes serán presentados. Aun así, es importante identificar que el proceso de reporte de emisiones ha sido un proceso con mejoras progresivas, lo cual se ha visto plasmado en diferencias entre fundiciones, tales como la configuración del sistema, la identificación de flujos en el límite del sistema, métodos matemáticos de ajuste, muestreo y análisis químico, entre otros. Sin perjuicio de lo anterior, es razonable comparar los datos reportados y generar indicadores de desempeño para la comparación.

Ahora bien, respecto al caso del titular ENAMI, se incluirán tanto los valores reportados como los re-estimados para los años 2019 y 2020, correspondientes al periodo de vigencia de la norma.

En este sentido, la Tabla 3-18 presenta las emisiones anuales, junto con el detalle del material de limpieza, removido en el proceso de las fundiciones, a través de las mantenciones de los equipos. En relación a esta remoción, el protocolo se establece que el material de limpieza debe ser considerado solo para el periodo anual, por lo que el valor reportado difiere de la suma total de las emisiones mensuales. Se observa que la participación del material de limpieza respecto de la emisión acumulada en el periodo enero - diciembre varía de forma relevante entre las fundiciones.

Tabla 3-18 Emisiones de Arsénico [TMF] y Razón entre material de limpieza y emisión acumulada por fundición, periodo 2017-2020

Fundición	Año	Emisión Anual [TMF/Año]	Material de Limpieza Reportado [TMF/Año]	Emisión Anual Acumulada (1) [TMF/Año]	Razón material limpieza/emisión acumulada (%)
Chuquicamata	2017	422	77	499	15%
	2018	84	33	117	28%
	2019	32	42	73	58%
	2020	181	14	195	7%
	Total Reportado	719	165	884	22%
Altonorte	2017	116	0	116	0%
	2018	116	33	149	22%
	2019	114	0	114	0%
	2020	118	13	131	10%
	Total Reportado	464	46	510	9%

Fundición	Año	Emisión Anual [TMF/Año]	Material de Limpieza Reportado [TMF/Año]	Emisión Anual Acumulada (1) [TMF/Año]	Razón material limpieza/emisión acumulada (%)
Potrerillos	2017	559	299	858	35%
	2018	470	12	482	2%
	2019	50	1	51	2%
	2020	51	45	96	47%
	Total Reportado	1130	357	1487	24%
HVL	2017	20	0	20	0%
	2018	7	0	7	0%
	2019 (R/RE)	-6/11	0/0	-6/11	0%
	2020 (R/RE)	13/19	0/0	13/19	0%
	Total Reportado (R/RE)	33/58	0	33/58	0%
Ventanas	2017	39	4	43	9%
	2018	26	4	30	13%
	2019	26	2	28	7%
	2020	28	1	29	3%
	Total Reportado	119	11	129	9%
Chagres	2017	26	0	26	0%
	2018	18	14	32	44%
	2019	33	0	33	0%
	2020	9	10	19	53%
	Total Reportado	86	24	110	31%
Caletones	2017	178	3	181	2%
	2018	156	0	156	0%
	2019	22	23	46	50%
	2020	67	7	74	9%
	Total Reportado	423	33	457	7%

(1) Enero a diciembre

Fuente: Elaboración propia en base a reportes de balance de masa y reestimación

A modo de análisis, se puede señalar que la razón porcentual del material de limpieza anual respecto a la emisión acumulada correspondientes a las fundiciones Chagres, Potrerillos y Chuquicamata tienen un valor superior en comparación al resto de las fundiciones, con 31%, 24% y 19%, respectivamente. Es importante denotar que Chagres reportó dos años sin material de limpieza, y para otros dos años 2018 y 2020 se obtienen porcentajes importantes de 44% y 53% respectivamente. Además, las mayores remociones totales de contenido de arsénico en el material de limpieza en los cuatro años considerados, son para Potrerillos y Chuquicamata, reportando 357 y 165 TMF, respectivamente. Por otro lado, las fuentes emisoras fundición Altonorte, Ventanas y Caletones, que reportan menores valores en comparación al resto, se encuentran entre un 7%-9% de material de limpieza por emisiones acumuladas anuales. Finalmente, respecto a la fundición de Hernán Videla Lira, esta no reporta material de limpieza en sus reportes técnicos de balance de masa para este periodo.

Análogamente, cabe destacar que no se encuentra un patrón ni comportamiento en común para el material de limpieza, ya que las mantenciones están programadas individualmente por cada fundición. En general, se puede indicar que las mantenciones de los equipos permitirían cuantificar material que captura y fija arsénico en el proceso de la fundición de cobre, y tal como se puede ver en los resultados, dicho material permite disminuir las emisiones del contaminante.

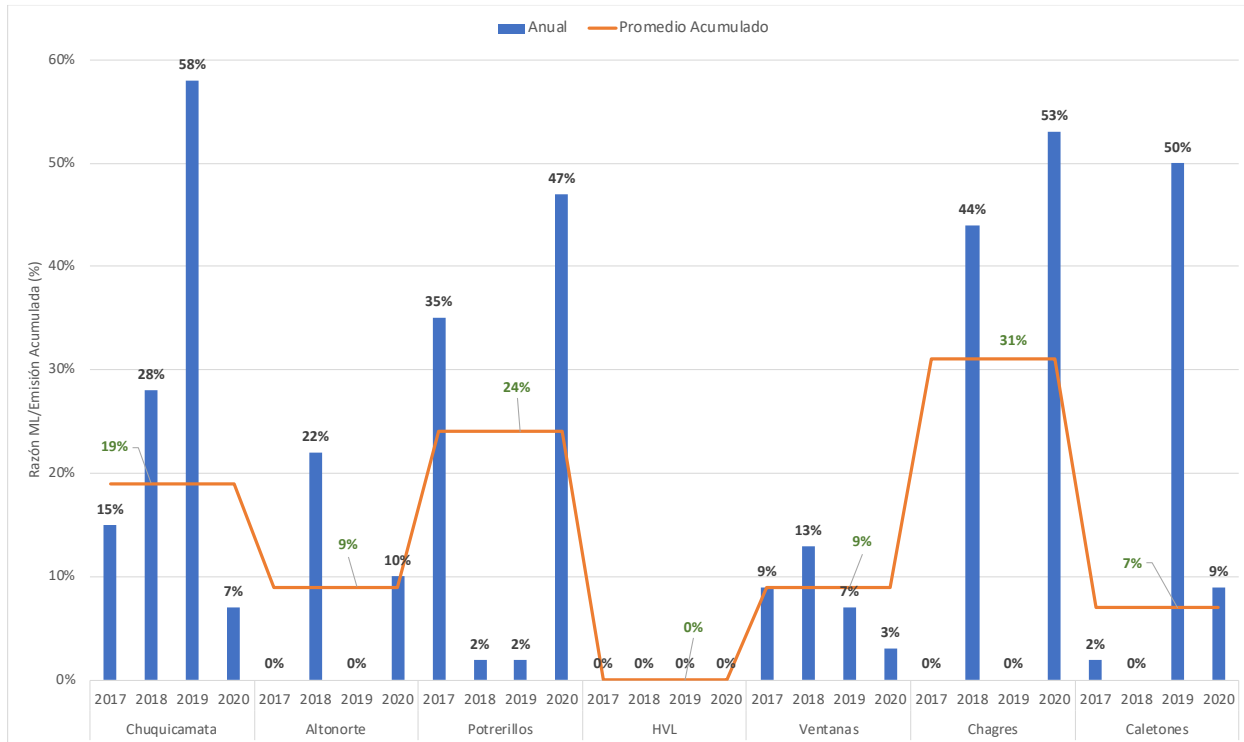


Figura 3-61 Razón Material de Limpieza/Emisión Acumulada, por fundición y año

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Considerando las emisiones anuales, se puede hacer la comparación respecto de los límites máximos de emisiones permitidos para cada fundición, según lo establecido en la Norma (MMA, 2013a). Dado que los límites de emisión son diferentes para cada fundición, se propone el indicador de holgura, el cual corresponde al margen de cumplimiento de las emisiones de arsénico. Este se calcula a través de la siguiente expresión, para un año y por fundición:

$$Holgura_{fundición}^{\text{año}} = \frac{\text{Límite de Emisión} - \text{Emisión Final}}{\text{Límite de Emisión}} [\%]$$

Ecuación 7 Estimación de Holgura

Así, entre mayor es el resultado de la holgura, mejor es el margen de emisión anual de la Fundición respecto del límite máximo de emisión anual permitido en la norma de emisión. Ciertamente, si el resultado es negativo, significa que el límite de emisión fue superado. Para

sintetizar, los resultados obtenidos según las emisiones reportadas y límites establecidos se presentan en la Tabla 3-19. Cabe destacar, que el promedio acumulado es calculado con las emisiones de arsénico correspondientes a los años de entrada en vigencia de los límites de emisión de As, establecidos en el art N°3 del D.S. N° 28/2013 MMA para todas las fundiciones. Además, señalar que para el total reportado se pondera el valor del límite de emisión por el número de años, para generar un promedio acumulado.

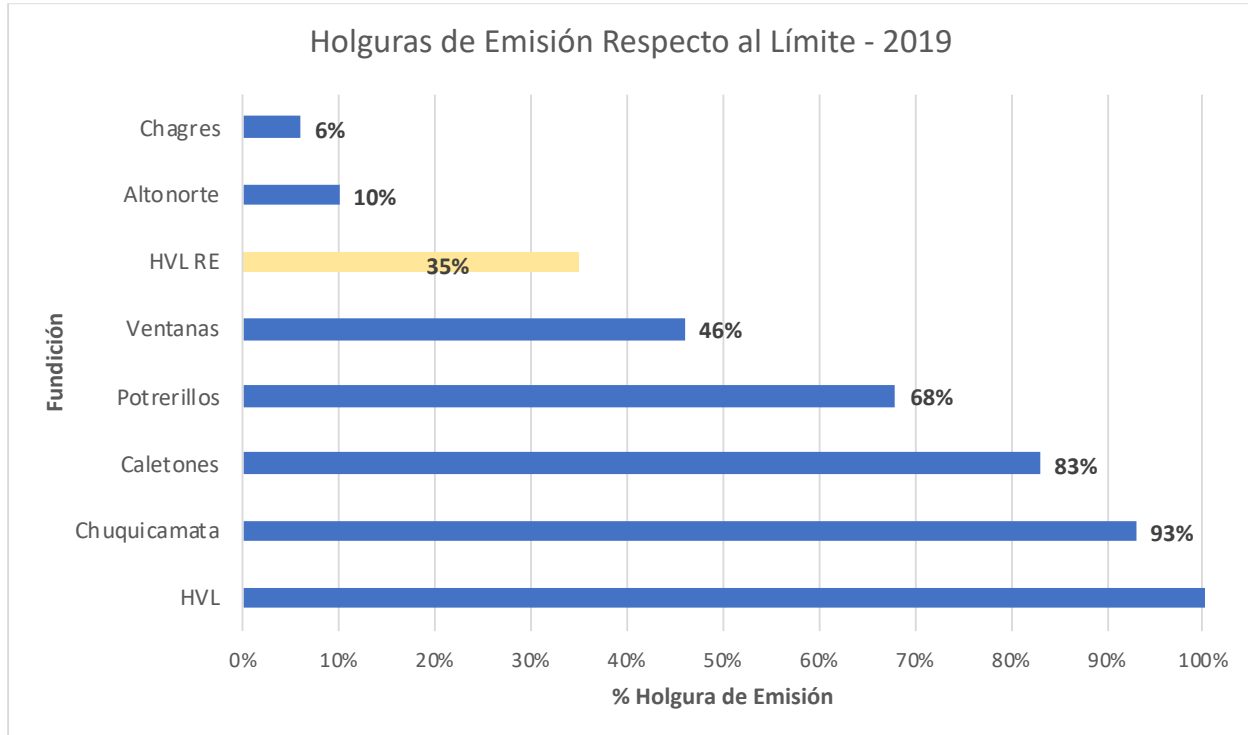
En la Tabla 3-19, se puede apreciar que las fundiciones a las cuales se limitó la emisión anual de As desde el año 2017 son Altonorte, Ventanas y Chagres. Se puede observar, que la primera fundición mencionada ha tenido un comportamiento constante en los valores de holgura, promediando un 8% en los cuatro años estudiados. Por otro lado, Ventanas experimentó un alza en la holgura del año 2017 al 2018, lo cual se ha estabilizado en los últimos tres años estudiados. Luego, la fundición Chagres ha tenido un comportamiento más variable en este periodo, promediando un 39% de holgura acumulada de emisión de As respecto al límite.

Tabla 3-19 Holgura de emisiones respecto de límite de emisión, en períodos de entrada en vigencia del DS 28 por fundición

Fundición	Límite de Emisión As [TMF As/Año]	Año	Emisión As Anual [TMF/Año]	Holgura
Chuquicamata	476	2019	32	93%
		2020	181	62%
		Total Reportado	213	78%
Altonorte	126	2017	116	8%
		2018	116	8%
		2019	114	10%
		2020	118	6%
		Total Reportado	464	8%
Potrerillos	157	2019	50	68%
		2020	51	68%
		Total Reportado	101	68%
HVL	17	2019 (R/RE)	-6/11	135%/35%
		2020 (R/RE)	13/19	24%/-12%
		Total Reportado (R/RE)	7/30	80%/12%
Ventanas	48	2017	39	19%
		2018	26	46%
		2019	26	46%
		2020	28	42%
		Total Reportado	119	38%
Chagres	35	2017	26	26%
		2018	18	49%
		2019	33	6%
		2020	9	74%
		Total Reportado	86	39%
Caletones	130	2019	22	83%
		2020	67	48%
		Total Reportado	89	66%

Nota: R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio declarado por el titular ENAMI para el periodo en periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos. Además, cabe destacar que la fundición Potrerillos reportó resultados negativos de emisión mensual de As en ambos años desde la entrada en vigencia del DS28 MMA.

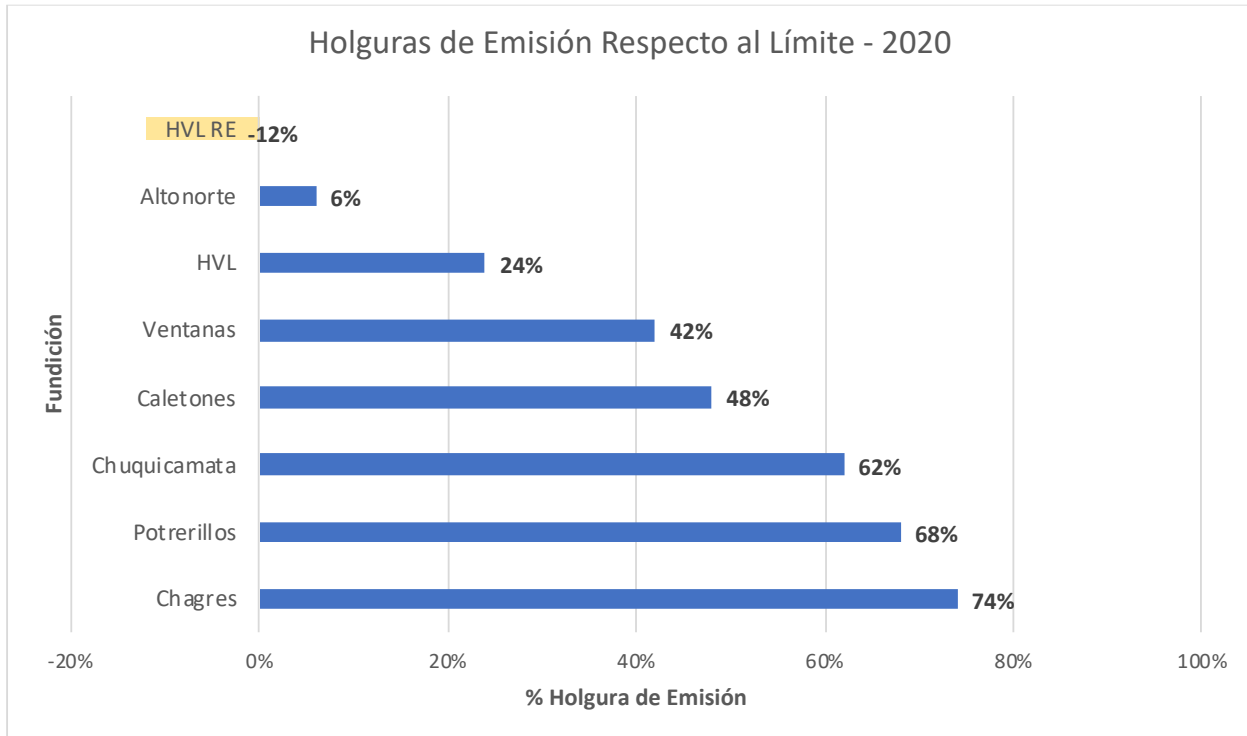
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos



Nota: Para la fundición HVL, se incluyen los valores obtenidos mediante las emisiones reportadas y los reestimados.

Figura 3-62 Holguras de emisión respecto al Límite por fundición, año 2019.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos



Nota: Para la fundición HVL, se incluyen los valores obtenidos mediante las emisiones reportadas y los reestimados.

Figura 3-63 Holguras de emisión respecto al Límite por fundición, año 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

A modo de representación gráfica, se elaboran las Figura 3-62 y Figura 3-63 con el objetivo de analizar visualmente el comportamiento respecto al límite de emisión anual establecido en la norma. Así, también estudiar la magnitud de diferencia por año.

Los valores resultantes indican que la fundición que presenta una menor holgura en el año 2019 respecto al límite de emisión corresponde a la fundición Chagres, registrando un porcentaje de holgura de 9%, lo cual se puede asociar a que no se reportó material de limpieza. Luego, continúa la fundición Altonorte, que para el mismo año registró un porcentaje de holgura del 10% y también no declaró material de limpieza. Por otra parte, en el año 2020, la fundición que presentó el porcentaje de holgura más bajo correspondió a la fundición Altonorte presentando un valor de 6%, en dicho año si reportó material de limpieza y/o mantención, con un valor correspondiente a 13 TMF/año, no obstante, se menciona que dicho valor no es el más alto en comparación a las otras fundiciones. Por otra parte, se observa para la Fundición Altonorte que la disminución en la holgura de emisión entre el año 2019 y 2020 se debe a que en el año 2020 la emisión de As acumulada fue de 131 TMF/año y la emisión anual fue de 118 TMF/año y en el año 2019 la fundición presentó una disminución de 4 TMF/año en su emisión registrando un valor de emisión anual de As, correspondiente a 114 TMF/año, sin embargo, tal como se mencionó anteriormente la Fundición Altonorte presenta un comportamiento desde el año 2017 estable en termino de sus emisiones y porcentaje de captura y fijación.

Por otra parte, se puede destacar el margen que ha presentado Chuquicamata, Caletones y Potrerillos el periodo de 2019, contando con un 93%, 83% y 68%, respectivamente. Asimismo, se distingue que, en el año 2020, las fundiciones de Chagres, Potrerillos y Chuquicamata superaron el 62% de holgura de emisiones respecto al límite.

Ahora bien, para el caso de la fundición HVL, se analizan los valores reportados y re-estimados, ya que los valores reportados escapan de la comparación. Es por esto, que la holgura de emisión máxima tiene un valor porcentual bastante alto (135%), el cual se explica por las emisiones negativas reportadas el año 2019, a pesar de no reportar material de limpieza. Posteriormente, el valor de emisión anual de arsénico re-estimado para el año 2020, cuenta con una holgura negativa del -12% del límite máximo.

Entonces, los valores re-estimados de la fundición de ENAMI, permiten contrastar este indicador con las otras fundiciones y con el valor reportado. En este sentido, el valor reestimado de emisión anual de arsénico correspondiente al periodo 2020 es de 19 [TMF], por lo que la holgura del límite de emisión tiene un valor de -12%. Así, el valor reestimado para ENAMI en el último año reportado arroja un incumplimiento del límite específico para la fundición fijado en la norma (17 [TMF/Año]). Por otro lado, la reestimación del periodo 2019 es de 11 [TMF], por lo cual la holgura disminuye considerablemente a un 35%. Por último, cabe destacar que el promedio acumulado de los años 2019 y 2020 para las emisiones re-estimadas tiene una holgura positiva del 12%.

Por su parte, las fundiciones de Ventanas y Caletones mantienen una holgura del límite de emisión superiores al 42% en ambos años. En particular, la fundición Ventanas cuenta con valores similares para los dos periodos anuales, mientras que Caletones reporta una mayor holgura para el año 2019, consistente con la proporción del material de limpieza correspondiente a 23 TMF As/año, el mayor valor registrado para el periodo analizado.

Continuando con la comparación entre fundiciones, es relevante analizar el porcentaje de captura y fijación de arsénico por fundición y año, considerando que la norma de emisión estableció en su artículo N°3 que adicional al cumplimiento del límite máximo de emisión anual de As, las fundiciones simultáneamente deberán cumplir con un porcentaje de captura y fijación del As igual o superior a un 95%. Es importante acentuar que este corresponde a la división entre la emisión acumulada anual y el total presente en la corriente de entrada. Cabe señalar, que este valor no considera el material de limpieza que se resta en la emisión anual, por lo que es la sumatoria aritmética de las emisiones mensuales.

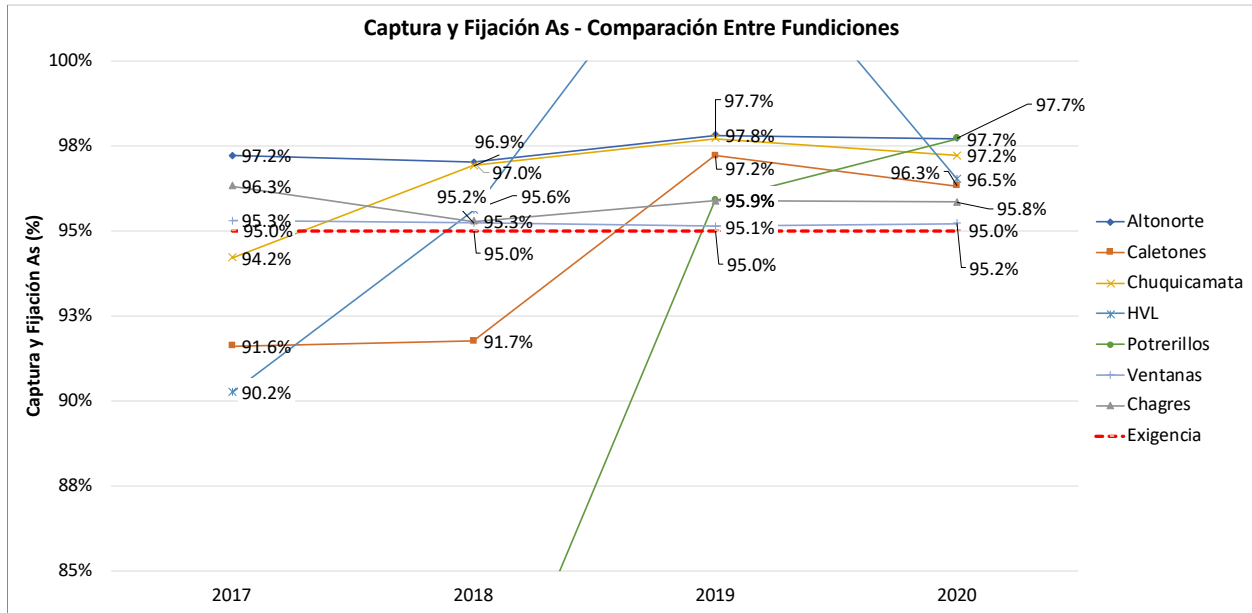


Figura 3-64 Porcentaje de captura y fijación de As (%) para el periodo 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-64 se marca con línea roja segmentada la exigencia de cumplir con un porcentaje mínimo de captura y fijación, el cual corresponde a un 95%. Se puede observar, que la exigencia de porcentaje de captura y fijación de arsénico de la norma de emisión ha sido cumplida por todas las fundiciones en los últimos dos años reportados, periodo en el cual se encuentra vigente la norma para todas las fuentes emisoras afectas. En la gráfica, no se muestran los valores de HVL para el 2019 por superar el 100% de captura y fijación (dada emisión anual negativa), ni de Potrerillos para los años 2017 y 2018, ya que presentó porcentajes menores a un 85%, registrándose valores de 69,4% y 78,9% respectivamente, cabe mencionar que en dichos años para la fundición potrerillos no se encontraba vigente la norma de emisión.

Entonces, tal como se puede ver en la Tabla 3-20 considerando el periodo 2019-2020, años en que la norma se encontraba en vigencia para todas las fundiciones, se puede observar que los mejores resultados de captura y fijación de arsénico anuales se encuentran en Altonorte y Chuquicamata, con 97,7% y 97,4%, respectivamente. Luego, también se destaca Caletones, la cual en el año 2019 presentó un porcentaje de captación y fijación de arsénico de 96,7%.

Tabla 3-20 Captura y fijación de As(%) por fundición, período 2017 a 2020

Fundición	Año	Arsénico Corriente de Entrada Anual[TMF/Año]	Emisión Anual Acumulada [TMF/Año]	% Captura y Fijación Anual de As
Chuquicamata	2017	8.588	499	94,2%
	2018	3.730	117	96,9%
	2019	3.234	73	97,7%
	2020	6.439	195	97,0%
	2019-2020	9.673	268	97,2%
Altonorte	2017	4.192	116	97,2%
	2018	3.873	149	96,2%
	2019	5.090	114	97,8%
	2020	5.615	131	97,7%
	2019-2020	10.705	245	97,7%
Potrerillos	2017	2.794	858	69,3%
	2018	2.287	482	78,9%
	2019	1.290	51	96,0%
	2020	2.225	96	95,7%
	2019-2020	3.515	147	95,8%
HVL	2017	186	20	89,2%
	2018	152	7	95,4%
	2019 (R/RE)	120/120	-6/11	105,0%/90,8%
	2020 (R/RE)	460/460	13/19	97,2%/95,9%
	2019-2020 (R/RE)	580/580	7/30	98,8%/94,8%
Ventanas	2017	821	43	94,8%
	2018	600	30	95,0%
	2019	574	28	95,1%
	2020	585	29	95,0%
	2019-2020	1.159	57	95,1%
Chagres	2017	634	26	95,9%
	2018	673	32	95,2%
	2019	794	33	95,8%
	2020	455	19	95,8%
	2019-2020	1.250	52	95,8%
Caletones	2017	2.039	181	91,1%
	2018	1.788	156	91,3%
	2019	1.654	46	97,2%
	2020	1.997	74	96,3%
	2019-2020	3.651	120	96,7%

Nota: R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio declarado por el titular ENAMI para el periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos.

Para la fundición Potrerillos, año 2019, se utiliza el valor de captación y fijación de arsénico reportado en la rectificación de balances de masa (Resolución Exenta 1915/2020 SMA).

Fuente: Elaboración propia

Por último, se estudia el comportamiento de las fundiciones a través de los años mediante el indicador de desempeño ambiental que asocia el arsénico emitido con los finos de cobre

producidos (ver Tabla 3-21). Cabe mencionar, que además se incluye a la fundición de ENAMI para los años 2019-2020, evaluando una reestimación de todos los parámetros.

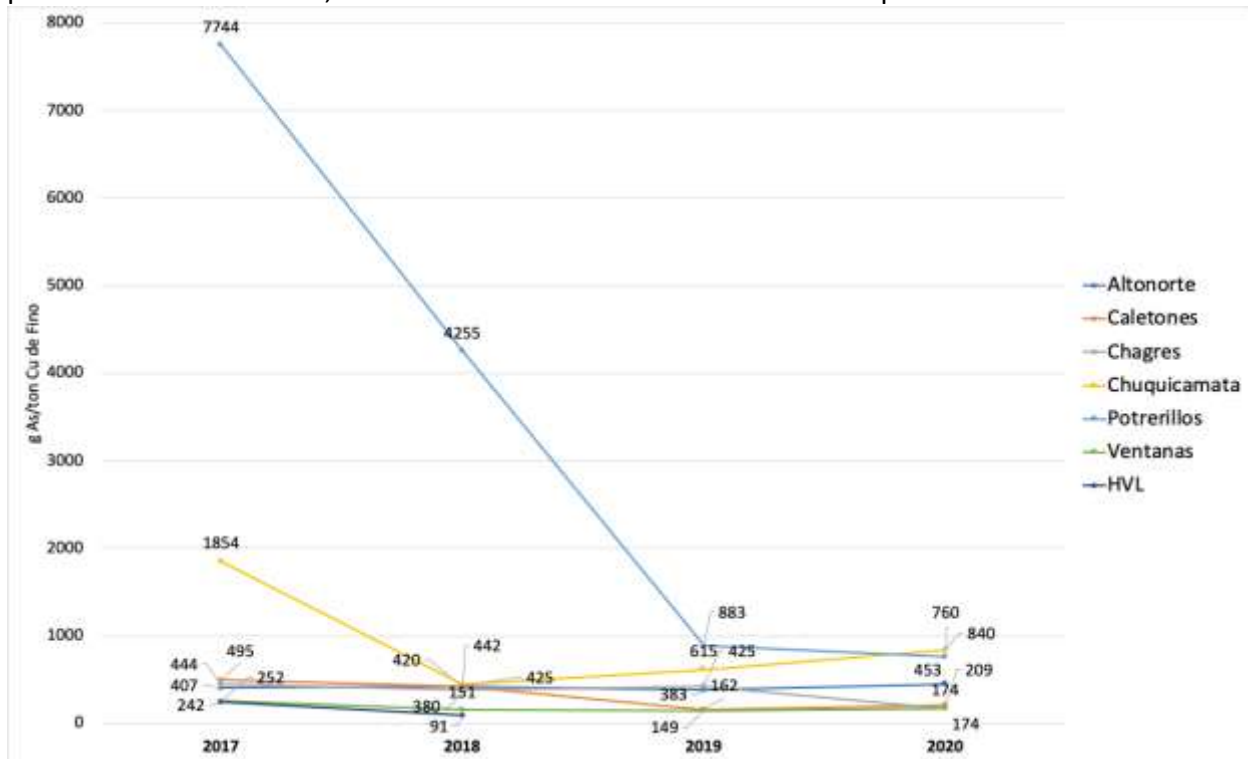


Figura 3-65 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-21 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020

Año	DCH	ALN	POT	HVL R/RE (1)	VEN	CHG	CAL
2017	1.854	407	7.744	242	252	192	495
2018	442	425	4.255	91	151	229	420
2019	615	383	883	-77/130	149	276	162
2020	840	453	760	165/237	174	174	209
2019-2020	728	418	822	44/182	162	225	185

- (1) Para los años 2019 y 2020 se presentan los valores reportados y recalculados. R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio reportado en periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos.

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, analizando el periodo 2019-2020, se observa que la fundición Potrerillos presenta, la mayor emisión de arsénico por tonelada de cobre fino, con un valor del indicador de 822 [g As/t Cu fino]. Por otra parte, en esta fundición se observa una alta intensidad de emisiones de arsénico reportadas en los años 2017 y 2018, que, si bien se reduce de forma significativa tras la entrada en vigencia de los límites de emisión, es la fundición con mayor intensidad promedio, para el periodo 2019-2020. Cabe mencionar que, en el año 2019, la fundición Potrerillos durante el periodo enero-abril del año 2019 se encontraba en un estado operacional de detención y comenzó a reportar emisiones desde mayo 2019, presentando para los meses, mayo, junio y

agosto del mismo año emisiones negativas. En segundo lugar, de intensidad de emisiones, se encuentra la fundición Chuquicamata, por su parte, ha reportado un promedio acumulado entre los años 2019 y 2020 de 728 [g As/t Cu fino]. La división de Chuquicamata tuvo resultados más altos en el año 2017, cuyo valor correspondió a 1.854 [g As/t Cu fino], pero tras las modificaciones realizadas en el marco del DS28/2013 MMA ha tendido a una reducción relevante de la intensidad de sus emisiones, presentando en los años 2019 y 2020, 615 [g As/t Cu fino] y 840 [g As/t Cu fino] respectivamente. No obstante, se destaca que aún se encuentra en proceso de *ramp-up*, lo cual se traduce en que su intensidad de emisiones, desde el año 2018, ha aumentado en una tasa de 27%.

Luego, la fundición Altonorte presenta un indicador de intensidad de emisiones de 418 [g As/t Cu fino] para el periodo estudiado, con un mínimo de 383 [g As/t Cu fino] para el año 2019, y un máximo de 453 [g As/t Cu fino], correspondiente al año 2020. La fundición de Chagres también tiene un comportamiento de su indicador estable para el periodo 2019-2020, donde el valor de intensidad fue de 225 [g As/t Cu fino].

Por su parte, Hernán Videla Lira el indicador reportado es sólo referencial, dada la seguidilla de emisiones negativas provenientes de los balances de masa, eso sí, la reestimación muestra un promedio acumulado del periodo 2019-2020 de 182 [g As/t Fino de Cobre].

Respecto a la fundición Caletones, se puede notar que a partir del año 2019 se alcanza un nivel de intensidad de emisiones de As en torno a 185 [g As/t Cu fino], este indicador bajó a la mitad del reportado en el periodo 2017-2018. Luego, la fundición Ventanas ha tenido un comportamiento más estable desde el año 2019, con un valor promedio en torno a 160 [g As/t Cu fino].

Para complementar el análisis de datos, es importante evaluar la composición de los concentrados, los cuales representan la gran parte de las entradas, tal como se verá más adelante. La Figura 3-66 presenta la composición de arsénico de los concentrados tratados por fundición. En esta, se puede ver que esta concentración es mayor en la fundición Chuquicamata, donde alcanza valores superiores a 10.000 ppm, mientras que Potrerillos y Altonorte se encuentran entre las 5.000-6.000 ppm de concentración de arsénico ⁴⁸. Lo señalado anteriormente tiene relación directa con la emisión de este elemento por cobre producido, dado que el indicador de intensidad de emisión de As de la fundición Chuquicamata en el año 2020, presentó el mayor valor de las fundiciones afectas al D.S. 28/2013 MMA, este siendo 840 [g As/t Cu fino].

⁴⁸ Mayores detalle en el Informe complementario de Norma de Emisión de la presente consultoría, en la sección 3.2.1.8

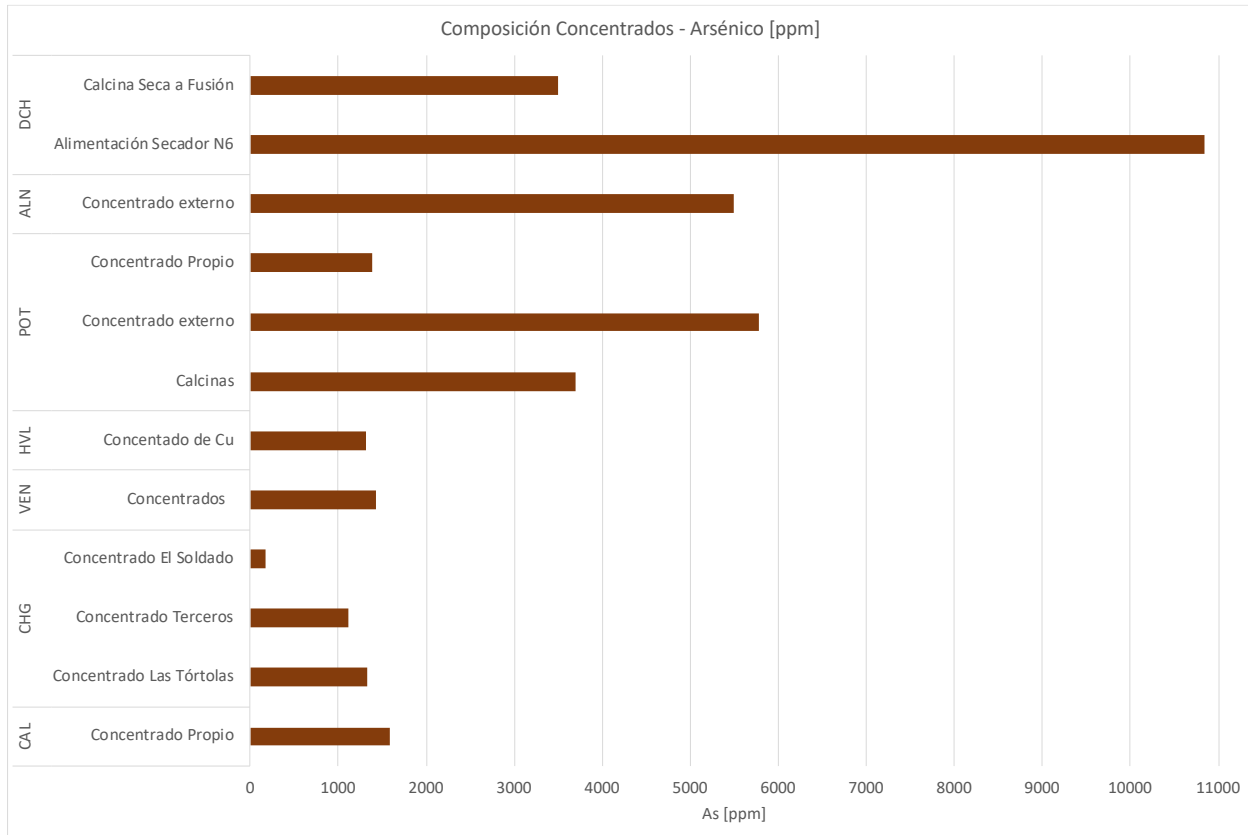


Figura 3-66 Contenido Arsénico en concentrados de cobre [ppm], año 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos periodo 2020

Finalmente, en la Tabla 3-22 se presentan los datos de los principales flujos y su proporción respecto al tipo de corriente. En esta, se puede visualizar la participación del arsénico en las fundiciones, para así poder identificar las corrientes con mayor o menor composición del elemento, además de poder comparar entre fundiciones.

Tabla 3-22 Principales flujos y su proporción respecto del total por fundición, año 2020

Fundición	Tipo Flujo	Corriente	Proporción
Chuquicamata	Entradas	Alimentación Secador N5	52%
		Alimentación Secador N6	38%
		Calcina Seca a Fusión	7%
	Salidas	Efluente limpieza de gases	44%
		Escoria descarte HF	18%
		Polvos Captados tolva tripartita	13%
		Polvos Captados HF	10%
		Ánodos	9%
	Variación de Flujos Intermedios/Entradas		-
Altonorte	Entradas	Concentrado Externo	100%
		PLS	67%
	Salidas	Relave	23%

Fundición	Tipo Flujo	Corriente	Proporción
		Ánodos	10%
	Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-11%
Potrerillos	Entradas	Concentrado Externo	87%
		Concentrado Propio	10%
	Salidas	Efluente limpieza de gases	41%
		Polvo Captado No Recirculado	36%
		Relave	11%
		Ánodos	10%
Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-18%	
HVL	Entradas	CNU CT	100%
	Salidas	Ácido Sulfúrico Grado C	39%
		Escoria a Botadero	25%
		Ánodos	20%
		Otras Producciones	16%
Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-16%	
Ventanas	Entradas	Concentrado Propio	88%
		Restos de Ánodos Ventanas	6%
		Restos de Ánodos Teniente	4%
		Restos de Ánodos HVL	2%
		Polvo de filtro gases del CT (PEPA)	42%
	Salidas	Ánodos Corrientes	25%
		Ácido Sulfúrico Grado C	15%
		Ánodos Hojas Madres	7%
Escoria de descarte	7%		
Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-11%	
Chagres	Entradas	Concentrado Las Tórtolas	81%
		Concentrado Externo	10%
		Concentrado El Soldado	7%
	Salidas	Escoria a Botadero	55%
		Ácido Sulfúrico Grado C	27%
		Ánodos	15%
Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	2%	
Caletones	Entradas	Concentrado Propio	100%
	Salidas	Residuo Arsenical	58%
		Relave PFE	17%
		Ánodos	14%
	Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-3%

Fuente: Elaboración propia en base a reportes de titular a SMA

A modo de análisis de los flujos en los balances de masa de arsénico, se estudian los flujos, disgregándolos por corriente, para obtener información relevante acerca de la composición de aquellos. En la Tabla 3-22, se informa el valor de la proporción porcentual de las corrientes más relevantes, respecto al total de finos de arsénico del flujo correspondiente del balance másico (Entrada o Salida), por fundición. Luego, se procede a calcular la relación entre la variación de flujos intermedios (diferencia entre existencia final e inicial) y las entradas totales. El resultado

obtenido de este último indicador tiene la intención de examinar cuánto implica la entrada en la variación de flujos intermedios. Además, los valores negativos significan que la existencia inicial es menor a la final, en un periodo acumulado anual.

Entonces, en primer lugar, se puede notar que todas las fundiciones tienen como principal entrada los concentrados, los cuales son catalogados entre propios o externos. Entre las fundiciones, se puede observar que Caletones, Chuquicamata, Chagres y Ventanas tienen como principal concentrado los de su producción. También, se pueden notar otras corrientes en los flujos de entradas, tal como restos de ánodos en la fundición Ventanas o calcina seca a fusión en Chuquicamata, los cuales tienen una contribución del 12% y 7%, respectivamente.

Ahora bien, para las corrientes de salida, las corrientes tienen más dispersión, donde se puede ver que los efluentes de limpieza de gases son los principales para Chuquicamata y Potrerillos, con 44% y 41%, respectivamente. También, la escoria de descarte, o escoria a botadero, cuenta con contribuciones considerables en la fundición Chagres, Chuquicamata, HVL, y en un menor nivel a Ventanas. Por otro lado, Altonorte y Caletones tienen una contribución de 23% y 17%, respectivamente, mientras que para Potrerillos se obtiene un 11%.

En el mismo sentido, dentro de las corrientes de salida que cuentan con proporción considerable, pero de menor valor, se encuentran los ánodos. Esta corriente corresponde al cobre producido, el cual tiene un orden del 9% al 25%, donde para Ventanas es la corriente de salida más relevante en finos de arsénico.

Luego, respecto a los flujos de inventario/existencia intermedios, se encuentran variadas relaciones entre fundición, donde las fundiciones de Chuquicamata y Chagres cuentan con una relación positiva, lo que quiere decir que hubo más circulante en el periodo acumulado anual, aunque, con valores pequeños en relación a la entrada total, con un 2% y 1%, respectivamente. Las fundiciones que cuentan con mayor implicancia en este indicador son Potrerillos y HVL.

3.4 Proyección de inventario

A continuación se presenta la metodología y supuestos de proyección (Sección 3.4.1), así como los resultados de la implementación de la metodología (Sección 3.4.2).

3.4.1 Metodología de proyección

De acuerdo a las bases técnicas del estudio, se requiere una proyección de 15 años, es decir, del año 2020 (año base inventario) al año 2035. El desarrollo de una proyección es un ejercicio sujeto a incertidumbre, donde se combina la incertidumbre propia de la estimación de las emisiones, con la incertidumbre de la proyección de la actividad de las fuentes emisoras. En este marco se destaca que en la medida que el horizonte de evaluación aumenta, aumenta también la incertidumbre asociado a que la proyección de la situación futura es un ejercicio que depende de aún más supuestos. Pequeñas diferencias supuestos pueden resultar en variaciones relevantes en el largo plazo. Por ejemplo, ante una situación de crecimiento anual constante, si suponemos

una tasa de 3% en cinco años tendríamos un crecimiento acumulado de 16% mientras que, si consideramos 4%, en los mismos años tendríamos un crecimiento de 22%. En un periodo más largo, por ejemplo 15 años, la tasa de 3% implica un crecimiento de 56%, mientras que una tasa de 5% implica un crecimiento de 80%.

El ejemplo anterior pretende ilustrar que las proyecciones deben ser interpretadas como un ejercicio prospectivo, que refleja un set particular de supuestos de proyección y que, como todo ejercicio de proyección, está sujeto a variables cuyo valor futuro es incierto, y luego los resultados también están sujetos a incertidumbres.

En particular para la proyección del inventario de arsénico descrito anteriormente se considera tres posibles orígenes de variación respecto del inventario base presentado en la Sección 3.2: (1) apertura de nuevas fuentes de emisión o cierre de fuentes existentes; (2) cambios tecnológicos que puedan alterar las tasas de emisión; y (3) cambios en los niveles de actividad de las fuentes existentes. A continuación, se presenta el detalle para cada una de ellos.

Cabe destacar que las emisiones de arsénico corresponden fundamentalmente a las emisiones de las fundiciones de cobre, mientras que un segundo grupo corresponde a número menor de fuentes (85) corresponden a termoeléctricas cuya contribución corresponde a $>0,1\%$. De ellas las principales contribuidoras corresponde a las termoeléctricas que combustionan carbón. Un tercer grupo, cerca de 4.800 fuentes adicionales, representan $<0,1\%$ de las emisiones. El bajo peso específico de las fuentes de este grupo resulta en que se proyecte su emisión igual a la emisión estimada para el año 2020. Si bien pueden existir cambios, su efecto es bastante menor que la incertidumbre asociada a las fuentes principales.

(1) Apertura de nuevas fuentes de emisión o cierre de fuentes existentes

Las principales fuentes de emisión de arsénico corresponden a las fundiciones de cobre, y en segundo lugar o a fuentes que combustionen carbón. Respecto a las fundiciones de cobre, no se cuentan con antecedentes⁴⁹ que permitan proyectar la apertura de una nueva fundición de cobre en territorio nacional, de la misma forma tampoco se espera el cierre de ninguna de las fundiciones. Lo anterior se reflejan en la última proyección de la producción de cobre de Cochilco⁵⁰ (2021), donde hasta el año 2032 sólo se esperan variaciones en las actividades de las fuentes existentes.

Por su parte, en el marco de los esfuerzos de mitigación de las emisiones GEI del país, se generó el plan de descarbonización de la matriz energética, en el cual las empresas se comprometen a

⁴⁹ Algún programa de candidato a la presidencia menciona la posibilidad de crear una nueva fundición, sin entregar mayores antecedentes de capacidad, ubicación o plazos. Se considera que este antecedente no es suficiente certero para incluir una nueva fundición en las proyecciones.

⁵⁰ Proyección de la producción de cobre en Chile 2021 – 2032

no iniciar desarrollo de nuevos proyectos a carbón que no cuenten con sistemas de captura y almacenamiento de carbono. El costo de esta tecnología es privativo, lo que resulta en que las proyecciones del sistema energético, notablemente la PELP⁵¹, no consideren la incorporación de nuevas centrales a carbón. Más aún el plan contempla la meta del cierre de todas las centrales de carbón hacia el año 2040, comprometiendo el cierre de 8 centrales para antes del año 2024. Desde el anuncio del plan se han realizado algunos anuncios que han confirmado el cierre de otras de las centrales existentes. A pesar de la existencia del plan y de los anuncios adicionales, no se cuenta con plazos definidos para el cierre del resto de las centrales a carbón. Respecto a esto, se considera como referencia de plazos un cronograma de cierre que el Coordinador Eléctrico utilizó durante el estudio de los impactos del cierre de las centrales a carbón. Con todo lo anterior el cronograma de cierre considerado se presenta en la Tabla 3-23.

Tabla 3-23 Cronograma de cierre de centrales a carbón considerado en proyección

Central	Primer año de no operación	Comentario respecto a año de cierre considerado
Central termoeléctrica bocamina u1	2021	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergia (2019)
Central termoeléctrica ventanas unidad 1	2021	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergia (2019)
Central térmica Tocopilla	2022	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergia (2019)
Central termoeléctrica ventanas unidad 2	2023	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergia (2019)
Central térmica mejillones	2025	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergia (2019)
Central termoeléctrica Angamos	2026	Anuncio 6 de julio 2021
Central termoeléctrica Campiche	2026	Anuncio 6 de julio 2021
Central termoeléctrica nueva ventanas	2026	Anuncio 6 de julio 2021
Central termoeléctrica nueva Tocopilla	2027	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Central Tarapacá	2032	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Central térmica andina	2036	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Guacolda	2034	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Complejo termoeléctrico Santa maría	2038	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Central termoeléctrica Cochrane	2039	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional

Fuente: Elaboración propia

(2) Cambios tecnológicos que puedan alterar las tasas de emisión

Respecto a posibles cambios tecnológicos que puedan alterar las tasas de emisión, se observa que actualmente las principales fuentes cuentan con normas de emisión, cuyos límites de emisión se estarían cumpliendo satisfactoriamente. Asimismo, las centrales a carbón han estado

⁵¹ Planificación Energética de Largo Plazo – Proceso 2020: <https://energia.gob.cl/planificacion-energetica-de-largo-plazo-proceso>

sujetas a un impuesto sobre sus emisiones de dióxido de carbono, MP, NOx y SO₂, lo cual es un incentivo para lograr niveles de emisión aun menores que los exigidos por la norma. En vista de lo anterior, en la proyección de las emisiones no se considera ningún cambio tecnológico que pudiera variar las tasas de emisión.

(3) Cambio en los niveles de actividad de las fuentes existentes

Respecto a cambios en los niveles de actividad, COCHILCO proyectó que hasta el 2032, habrá pequeñas variaciones en la medida que se realizan mejoras operativas, así como las fundiciones terminan de adaptarse a los cambios tecnológicos que implicó la implementación del DS28/2013 del MMA. De esta forma se espera que las fundiciones pasen de una producción cercana a las 1.300 kt de Cu hasta una producción cercana a 1.500 kt hacia fines de la década. Para la proyección para los 3 años posteriores al año 2032, se considera que se mantiene el nivel productivo del año 2032, es decir, una producción de 1.530 kt desde las fundiciones.

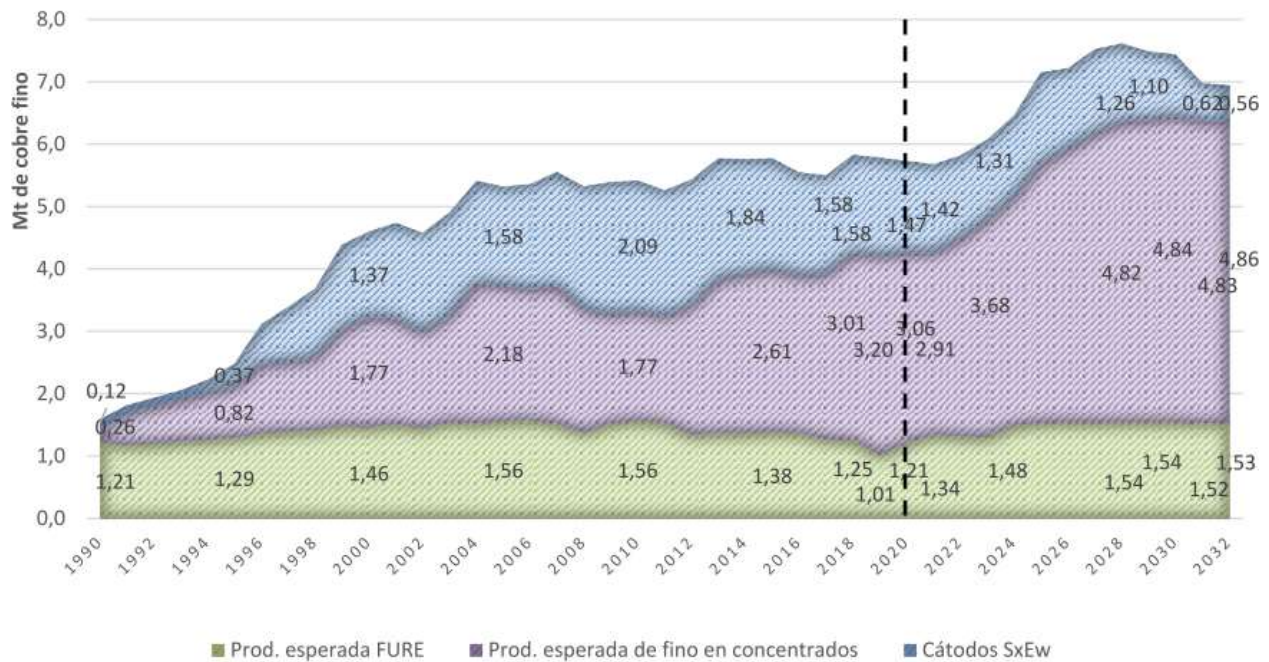


Figura 3-67 Proyección de producción de concentrados de cobre refinados y sin refinar

Fuente: (Cochilco, 2021)

Respecto a las centrales de carbón, la proyección de su nivel de actividad es un ejercicio complejo en la medida que su operación es definido por el Coordinador Eléctrico Nacional en virtud de minimizar los costos marginales del sistema. En este sentido la proyección a 2035, se ve afectada por variables tan complejas de proyectar como la hidrología, la instalación de nuevas centrales de generación, los costos de sistemas de respaldos, la proyección de líneas de transmisión, y la demanda agregada del sistema eléctrico. Sin perjuicio de lo anterior, considerando que las centrales a carbón tienen el costo marginal más bajo de las centrales termoeléctricas, es

esperable que su uso se mantenga relativamente constante, más aún cuando las salidas de algunas de las centrales a carbón van a aumentar la presión por el uso de centrales térmicas de bajo costo. En este sentido se realiza el supuesto de que la proyección a futuro de las emisiones de las centrales termoeléctrica será igual a la del año base. Lo anterior se conjuga con el plan de cierre discutido anteriormente.

3.4.2 Resultados de la proyección

En la Tabla 3-24 se presentan la proyección de la estimación de emisiones de arsénico hasta el año 2035. El crecimiento en los niveles de producción proyectados por Cochilco, se reparte entre las fundiciones que actualmente operan con menor factor de planta. De esta forma, se proyecta que desde el año 2025 todas las fundiciones procesaran un nivel de concentrados que implica que todos tengan un factor de planta superior a 88%. Lo anterior se traduce en que fundiciones que el año 2020 tienen factores de planta más bajos como Chuquicamata (57%), Potrerillos (74%) o Chagres (79%), aumentan sus niveles de procesamiento y, como consecuencia, sus niveles de emisión. Los valores resultantes de esta estimación se presentan en la Tabla 3-24. Asimismo, en el caso de HVL ante la falta de reporte para las emisiones 2020, se asume que en el futuro cumple con los límites de emisión del DS28/2013.

Se observa que en el período se alcanza un peak de emisiones en los años 2025-2030, lo cual se explica por ser los años en que se espera el mayor nivel de actividad de acuerdo a la proyección de COCHILCO (ver Figura 3-66). En general se observa que las emisiones de las fundiciones y de la planta de tostación aumentan en 25%, mientras que las emisiones de las otras fuentes se reducen en un 35% asociado al proceso de descarbonización de la matriz energética, impulsadas por las termoeléctricas que reducen su emisión en un 90%. Lo anterior, resulta en que el peso específico de las otras fuentes en su conjunto en el inventario es aún menor alcanzando sólo un 0,06% del inventario total.

Tabla 3-24 Proyección de inventario de arsénico [ton/año], 2020-2035

Tipo fuente	Fuente	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	
Fundiciones	Chuquicamata	180,8	191,3	272,3	272,3	272,3	283,3	283,3	283,3	283,3	283,3	283,3	279,7	281,5	281,5	281,5	281,5	
	Altonorte	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	122,5	122,5	122,5	122,5	122,5	122,5	120,9	121,7	121,7	121,7	121,7	
	Potreriillos	51,0	53,8	60,9	60,9	60,9	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	62,5	62,9	62,9	62,9	62,9	
	HVL	18,7	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
	Ventanas	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,2	29,4	29,4	29,4	29,4
	Chagres	8,6	8,6	9,6	9,6	9,6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,8	9,9	9,9	9,9	9,9
	Caletones	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	68,9	69,3	69,3	69,3	69,3
Planta Tostación	Ministro Hales	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Otras fuentes	Termoeléctrica	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Otras fuentes	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
Total		473,0	484,6	573,6	573,6	573,6	596,2	596,1	595,9	595,9	595,9	595,9	588,4	592,2	592,2	592,2	592,2	

Fuente: Elaboración propia

4. Efectos en salud y coeficientes de riesgo

El presente capítulo contiene la metodología y resultados de la recopilación y sistematización de información científica disponible relacionada con los efectos en la salud humana de la exposición a arsénico, y sus distintas formas químicas, en el aire.

4.1 Caracterización de efectos adversos en salud asociados a la exposición de arsénico en el aire

En las siguientes Secciones se explicitan las fuentes de información consultadas (ver Sección 4.1), una presentación de los antecedentes generales (ver Sección 4.2) y un detalle completo de los efectos adversos del arsénico sobre los diferentes sistemas (ver Sección 4.3).

4.1.1 Fuentes de información consultadas

Para caracterizar los efectos adversos en la salud asociados a la exposición de arsénico en el aire, se elaboró un perfil toxicológico del metaloide y sus formas químicas disponibles, mediante la recopilación y revisión de información científica relacionada a exposiciones ambientales. La información recopilada se encuentra en el **“Anexo B: revisión bibliográfica efectos en salud”**, adjunto en formato digital. Las bases de datos revisadas fueron:

- MEDITEXT® Medical Management Database
- INFOTEXT® Database for Regulations, Standards & General Information
- HAZARDTEXTTM Hazard Management Database
- REPROTEXT® Reproductive Hazard Reference Database
- CHRIS (Chemical Hazard Response Information System)
- IRIS (Integrated Risk Information System)
- New Jersey Fact Sheets
- HSDB® (Hazardous Substances Data Bank)
- NIOSH Pocket Guide
- RTECS® Registry of Toxic Effects of Chemical Substances
- REPRORISK® System
- REPROTEXT® Reproductive Hazard Reference Database
- TERIS (Teratogen Information System)
- Shepard's Catalog of Teratogenic Agents
- REPROTOX® Reproductive Hazard Information Database
- ATSDT ToxFAQs™ (Agency for toxic substances and disease registry)
- Risk Assessment Information System (RAIS) Toxicity Profiles.
- Organización Mundial de Salud (OMS)

4.1.2 Antecedentes generales

El arsénico es un elemento natural que se distribuye ampliamente en la corteza terrestre. Es clasificado químicamente como un metaloide, que corresponde a los elementos que poseen propiedades tanto metálicas como no metálicas. El arsénico se encuentra generalmente en el medio ambiente combinado con otros elementos como oxígeno, cloro y azufre en su forma inorgánica, y combinado con carbono e hidrógeno en su forma orgánica (ATSDR, 2007).

El arsénico puede emitirse al aire desde fuentes naturales, como a partir del polvo por rachas de viento o por erupciones volcánicas, o por la acción antropogénica, como en procesos de extracción y fundición de minerales, funcionamiento de plantas de energía u otros procesos de combustión de carbón (ATSDR, 2007). La mayoría de las emisiones de arsénico provocadas por el hombre que provienen de fundiciones de metales y la combustión de combustibles, el arsénico se emite principalmente en forma de arsenitos (As_2O_3 o como sales del ácido correspondiente) o arseniatos (As_2O_5 o las sales del ácido arsénico) (European Commission, 2000).

El arsénico presente en la materia es emitido al medioambiente adherido generalmente a pequeñas partículas que puede permanecer en el aire durante muchos días y viajar largas distancias. En cambio el arsénico contenido en el suelo que se puede incorporar al aire por la acción del viento, generalmente se encuentra en partículas más grandes las cuales se depositan en el suelo o son abatidas por la lluvia (ATSDR, 2007).

El arsénico es un reconocido tóxico que puede estar en variadas formas químicas tanto orgánicas como inorgánicas. En la mayoría de los casos la toxicidad inducida por arsénico en humanos se debe a la exposición a formas inorgánicas del metaloide, a través del consumo de alimentos, agua aire y exposiciones ocupacionales, pero no a las formas orgánicas presentes en peces y mariscos principalmente (Costa, 2019). Las formas orgánicas de arsénico son considerablemente menos tóxicas en comparación a las inorgánicas. (ATSDR, 2007).

El arsénico afecta a casi todos los procesos celulares y funciones de los órganos de nuestro cuerpo. La ingesta de arsénico es generalmente la vía de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente aporta menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000).

Los compuestos trivalentes de arsénico son más solubles en agua que los compuestos de arsénico pentavalente y, por lo tanto, son más tóxicos por naturaleza. Las formas reducidas (As trivalente (III)) y oxidadas (As pentavalentes (V)) de arsénico, pueden absorberse y acumularse en tejidos y fluidos corporales. La distribución del arsénico en el cuerpo es bastante constante, pero se distribuye ampliamente en órganos como la piel, los pulmones, el hígado y los riñones. En el hígado, el metabolismo del arsénico implica metilación enzimática y no enzimática. El arsénico inorgánico se reduce de pentóxido a trióxido mediante procesos enzimáticos o no enzimáticos (glutación). Aproximadamente el 70% de arsénico (tanto de tipo orgánico como inorgánico) se excreta a través del sistema renal a través de la orina. El arsénico inorgánico se retiene en el

cuerpo más tiempo que el arsénico orgánico y el proceso de excreción de As inorgánico es más prolongado (Mohammed Abdul, Jayasinghe, Chandana, Jayasumana, & De Silva, 2015).

Dependiendo del tipo de exposición al arsénico (es decir, aguda o crónica), el desarrollo de síntomas clínicos varía. Sin embargo, los síntomas de la exposición aguda se desarrollan mucho más rápidamente, mientras que los síntomas clínicos de la exposición crónica al arsénico se desarrollan durante un período prolongado de exposición. En casos de toxicidad aguda por arsénico, se pueden producir daños en los órganos que pueden provocar la muerte. La mayor parte de los efectos adversos a la salud derivados de la exposición al arsénico descritos en la literatura están asociados a reportes de casos de intoxicación aguda (corto plazo) por la ingesta tanto accidental como intencional (suicidas) de las distintas formas químicas del metaloide, siendo menor la información de efectos a la salud derivados de la exposición por la vía inhalatoria (Mohammed Abdul et al., 2015).

4.1.3 Efectos adversos en salud asociados a la exposición de arsénico en el aire

En las siguientes subsecciones se presentan los principales efectos del arsénico en distintos sistemas de órganos del cuerpo humano que puede asociarse a la exposición por vía inhalatoria. Se incluyen los siguientes sistemas:

- Sistema nervioso
- Sistema respiratorio
- Sistema cardiovascular
- Sistema circulatorio
- Sistema hepático
- Sistema renal
- Sistema reproductivo y del desarrollo
- Desarrollo de cáncer⁵²

4.1.3.1 Sistema nervioso

Neurológicamente hablando el sistema nervioso periférico es un órgano diana clave de la toxicidad del arsénico. El desarrollo de complicaciones neurológicas debido a la exposición aguda y crónica al arsénico es bastante rápido y, generalmente, se informa como neuropatía sensitivomotora simétrica (Mohammed Abdul et al., 2015). Algunos de los síntomas clínicos más comunes incluyen parestesia, dolor y entumecimiento en las plantas de los pies debido a la disminución de la capacidad de las neuronas para desintoxicar especies reactivas de oxígeno (ROS) y la producción de glutatión. El estrés oxidativo se considera una de las principales causas de neurotoxicidad inducida por arsénico, también el arsénico es capaz de inducir la apoptosis neuronal (Nordberg, 2021), (ATSDR, 2016), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

⁵² No corresponde a un sistema, pero dada su relevancia se presenta como una subsección propia.

4.1.3.2 Sistema respiratorio

La exposición al arsénico a través del agua potable o por exposición ocupacional puede provocar complicaciones respiratorias con el tiempo. Existe numerosa evidencia sobre la correlación de la disfunción pulmonar relacionada con la exposición al arsénico y el aumento de la tasa de mortalidad debido a enfermedades respiratorias. La inhalación de polvo o vapores de arsénico puede producir complicaciones respiratorias como tos crónica, laringitis, bronquitis y rinitis (Mohammed Abdul et al., 2015). Algunos de los síntomas respiratorios clínicos comunes observados en un estudio de cohorte incluyen tos crónica, ruidos en el pecho, dificultad para respirar, sangre en el esputo y otros problemas respiratorios (ATSDR, 2016), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

4.1.3.3 Sistema cardiovascular

La sobre exposición a altas dosis de arsénico tiene una correlación con enfermedades cardiovasculares (síndrome coronario agudo, arritmia, hipertensión, insuficiencia arterial, trombosis y aterosclerosis). De esta forma, la exposición al arsénico constituye un factor de riesgo para el desarrollo de patologías cardiovasculares, tal como lo son el tabaquismo, la obesidad, el sedentarismo, la Diabetes Mellitus, la malnutrición por exceso, la dislipidemia, entre otros factores de riesgo (Mohammed Abdul et al., 2015), (ATSDR, 2016), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

4.1.3.4 Sistema circulatorio

Inmediatamente después de la exposición, el arsénico entra en la circulación sistémica. La mayoría del arsénico se une principalmente a la hemoglobina y se acumula en los eritrocitos, lo que induce la hemólisis. La hemólisis señalada genera anemia. Luego, además de esta anemia hemolítica, el arsénico puede causar otros efectos hematológicos en el contexto de la exposición crónica, particularmente leucopenia y trombocitopenia. Estos hallazgos hematológicos pueden encontrarse cada uno de forma independiente y aislada, o pueden encontrarse asociados entre sí. De esta forma, los tres tipos de efecto señalados pueden encontrarse de manera sincrónica, lo que se denomina pancitopenia (Mohammed Abdul et al., 2015), (ATSDR, 2016), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

4.1.3.5 Sistema hepático

La acumulación de arsénico en el hígado después de exposiciones repetidas es relativamente mayor y propensa a una mayor toxicidad hepática. El metabolismo del As inorgánico tiene lugar en el hígado para luego excretarse a través de la orina. La exposición crónica al arsénico puede causar insuficiencia hepática crónica relacionada con una cirrosis hepática de origen tóxico, lo cual va seguido del desarrollo de hipertensión portal. Producto de esto es que se observa hemorragia digestiva alta debido a ruptura de várices esofágicas, junto con ascitis, ictericia y

hepatomegalia (aumento de tamaño del hígado). Consecuentemente con esto, se observa un aumento de las enzimas hepáticas en los análisis de laboratorio (Mohammed Abdul et al., 2015), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

4.1.3.6 Sistema renal

Durante el proceso de eliminación de arsénico a través del sistema renal, la acumulación de arsénico en los riñones produce citotoxicidad en el tejido renal. Niveles por sobre el rango normal de creatinina sérica, nitrógeno ureico en sangre y proteinuria son algunas de las manifestaciones clínicas seguidas de lesión renal (necrosis tubular aguda) por toxicidad por arsénico. Además, se ha informado de una asociación positiva entre la exposición al arsénico y la aparición de albuminuria y proteinuria (Mohammed Abdul et al., 2015), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

4.1.3.7 Sistema reproductivo y del desarrollo

Los estudios en animales han demostrado toxicidad para la reproducción y el desarrollo debido a la exposición al As inorgánico. La exposición al arsénico puede causar retardo del crecimiento intrauterino y puede ser factor de riesgo para abortos, mortinatos y muerte perinatal. El arsénico afecta los órganos sexuales masculinos y femeninos y puede causar problemas de fertilidad en ambos sexos. En los hombres, el arsénico puede inducir disfunción de las gónadas a través de la disminución de la síntesis de testosterona, apoptosis y necrosis (Mohammed Abdul et al., 2015), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

4.1.3.8 Exposición al arsénico y desarrollo de cáncer

El arsénico es un carcinógeno humano bien conocido desde finales del siglo XVII y ha sido clasificado como carcinógeno de grupo 1 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) con evidencia de apoyo de la inducción de carcinogenicidad en humanos. La exposición al arsénico ha demostrado la capacidad de inducir tumorigénesis en humanos en la piel, pulmón, vejiga, hígado y próstata (Mohammed Abdul et al., 2015). Sin embargo, es importante considerar que la exposición oral está asociada con cáncer de vejiga, pulmón y piel, mientras que la exposición por inhalación está asociada sólo con cáncer de pulmón. Por el contrario, algunos efectos no cancerosos (p. Ej. , Lesiones cutáneas, efectos neurotóxicos) son comunes a ambas vías (ATSDR, 2007), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

4.1.3.9 Resumen de efectos adversos de salud

A continuación, se presenta un resumen de los efectos adversos en salud asociados a la exposición por vía inhalatoria (en negro) y otras vías (en rojo) de las especies químicas de arsénico con información disponible.

Tabla 4-1 Efectos agudos no carcinogénicos según forma química de arsénico

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
Nervioso	Coma, encefalopatía tóxica, neuropatía, tetraplejía, convulsiones, amnesia	Encefalopatía tóxica, neuropatía, temblor, coma, convulsiones, mareos, dolor de cabeza, neuropatía periférica, pseudo tumor cerebral, fatiga	Encefalopatía tóxica, neuropatía periférica secundaria,	Encefalopatía tóxica, neuropatía, convulsiones	Jaqueca
Respiratorio	Apnea, lesión pulmonar, bronquitis	Insuficiencia respiratoria aguda, lesión pulmonar aguda, síndrome de distrés respiratorio agudo, disnea, sangrado de nariz, tos, hipoxia, derrame pleural, neumonitis	Edema de laringe, síntoma de irritación de membranas mucosas de nariz y garganta, lesión pulmonar aguda, apnea, lesión pulmonar aguda,	Tos, apnea, lesión pulmonar aguda, síndrome de distrés respiratorio agudo	Insuficiencia respiratoria aguda, derrame pleural
Cardiovascular	Arritmia cardíaca, hipotensión	Taquicardia ventricular, torsade de pointes, hipotensión, cardiomiopatía, arritmia cardíaca, bradicardia, intervalo QT prolongado, edema	Arritmia cardíaca	Arritmia cardíaca, hipovolemia por filtración capilar, hipotensión	Arritmia cardíaca, hipotensión
Circulatorio	Hemólisis, pancitopenia, anemia, leucopenia, coagulación intravascular diseminada	Hemólisis, pancitopenia, leucocitosis, mielo supresión, anomalías de la coagulación, anemia,	Hemólisis, pancitopenia,	Hemólisis, pancitopenia, anemia, coagulación intravascular diseminada	Hemólisis, leucocitosis
Endocrino	Hiperglicemia	Hiperglicemia		Hiperglicemia	

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico Cas: 7440-38-2	Trióxido de arsénico Cas: 1327-53-3	Tricloruro de arsénico Cas: 7784-34-1	Pentóxido de arsénico Cas: 1303-28-2	Arsina Cas: 7784-42-1
Hepático	Daño hepático, enzimas hepáticas anormales. Falla hepática	Daño hepático, enzimas hepáticas aumentadas, lesión de hígado	Daño hepático	Daño hepático	Ictericia, enzimas hepáticas aumentada, hepatomegalia
Renal	Falla renal	Falla renal, nefrotoxicidad,	Falla renal	Falla renal	Falla renal
Reproductivo y del desarrollo	Efectos en el embarazo: nacimiento de un bebé muerto, trastornos del embarazo	Efectos en el embarazo: muerte neonatal, muerte fetal,	Efectos en el embarazo: muerte neonatal	Efectos en el embarazo: muerte neonatal, encefalopatía, incremento abortos espontáneos, toxicidad fetal	
Dermatológico	Líneas de mees, herpes, quemaduras (prurito, Rush cutáneo)	Trastornos dérmicos (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico y dermatitis exfoliativa), piel seca, prurito, dermatitis de contacto, líneas de mees	Irritación cutánea, erupción bulbosa, envenenamiento, dermatitis (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico y dermatitis exfoliativa), línea de mee's.	Dermatitis.	
Gastrointestinal	Gastroenteritis	Dolor abdominal, vómitos, diarrea acuosa o sanguinolenta, debilidad y enrojecimiento de la piel	Irritación gastrointestinal, hemorragia gastrointestinal, gastroenteritis	Gastroenteritis, sabor a ajo	Náuseas y vómitos, pérdida de apetito, dolor abdominal
Otros efectos	Deshidratación, hipocalemia				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-2: Efectos crónicos no carcinogénicos según forma química de arsénico

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico Cas: 7440-38-2	Trióxido de arsénico Cas: 1327-53-3	Tricloruro de arsénico Cas: 7784-34-1	Pentóxido de arsénico Cas: 1303-28-2	Arsina Cas: 7784-42-1
Nervioso	Encefalopatía tóxica, comportamiento anormal, neuropatía, enfermedad cerebrovascular, nistagmo, deterioro cognitivo, perturbación en el pensamiento,			neuropatía	
Respiratorio	Bronquitis asmática, irritación de las membranas mucosas, lesión del sistema respiratorio, bronquiectasias				
Cardiovascular	Miocarditis, isquemia, hipertensión, infarto al miocardio			Miocarditis, isquemia, incremento de presión arterial, infarto al miocardio	
Circulatorio	Anemia hemolítica, pancitopenia, anemia, macrocitosis		Pancitopenia	Pancitopenia, anemia, macrocitosis	
Endocrino	Diabetes mellitus				
Hepático	Daño hepático			Daño hepático	
Reproductivo y del desarrollo	Efectos en el embarazo (aborto espontáneo, muerte fetal, mortalidad neonatal y mortalidad infantil, así como una reducción significativa del peso al nacer). Disfunción eréctil	Efectos en el embarazo (muerte fetal, mortalidad neonatal), deterioro de la fertilidad masculina	Efectos en el embarazo (aborto espontáneo, muerte fetal, mortalidad neonatal y mortalidad infantil, así como una reducción significativa del peso al nacer)	Disfunción eréctil	
Dermatológico	Alopecia		Dermatitis (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico, hiperpigmentación y dermatitis exfoliativa)		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-3 Efectos carcinogénicos según forma química de arsénico

Órgano/sistema afectado	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
Respiratorio	Cáncer de pulmón	Cáncer de pulmón	Mayor riesgo de cáncer de pulmón.	Cáncer de pulmón	
Renal	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	
Hepático	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	
Dermatológico	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	
Otros órganos/sistemas afectados	Ganglios linfáticos, médula ósea, próstata (*)	Ganglios linfáticos, médula ósea, próstata, genotóxico (mutación en leucocitos)	Parece ser mutagénico	próstata(*)	Carcinoma

(*): Asociado solo a exposiciones del tipo ocupacional.

Fuente: Elaboración propia

4.2 Perfil toxicológico arsénico

A continuación, se presenta el perfil toxicológico de las formas químicas con información disponible del metaloide:

4.2.1 Arsénico inorgánico – Número CAS: 7440-38-2

4.2.1.1 Usos/formas/fuentes

El arsénico es un elemento de aspecto metálico, brillante, quebradizo, cristalino y de color gris plateado o blanco estaño. Puede existir en tres formas alotrópicas: amarillo (alfa), negro (beta) y gris (gamma) (HSDB, 2001). La forma metaloide amorfa (alfa-arsénico) se oscurecerá a negro (beta-arsénico) y formará trióxido de arsénico (As_2O_3) en el aire húmedo. Cuando el vapor de arsénico se enfría repentinamente, se forma un tipo de arsénico amarillo que no tiene propiedades metálicas (Budavari, 2000; Hathaway et al, 1996; Lewis, 1996; NIOSH, 2001) (HazardText, 2021e)

Usos:

El arsénico se utiliza: en metalurgia para endurecer cobre, plomo y aleaciones; en la fabricación de ciertos tipos de vidrio; en la producción de pigmentos; en plaguicidas (con mayor frecuencia como trióxido de arsénico), insecticidas, fungicidas y raticidas; en herbicida; en agricultura como desecante del algodón; como subproducto en la fundición de minerales de cobre; como componente de dispositivos eléctricos y como material dopante en la fabricación de semiconductores (Bingham et al, 2001; Budavari, 2000; Hathaway et al, 1996; HSDB, 2001; Lewis, 1998; Zenz, 1994). Históricamente, el arsénico se usaba en un tónico conocido como “solución de Fowler” para tratar una variedad de enfermedades, como la leucemia y la psoriasis (Bingham et al, 2001; Harbison, 1998; Zenz, 1994). También se ha utilizado como marcador radiactivo (un isótopo artificial, As) en toxicología (HSDB, 2001).

El arsénico, como sulfuro de arsénico, también es un componente de ciertos tipos de productos depilatorios, conocidos como agentes depilatorios corrosivos a base de arsénico (CABD) que se han utilizado tradicionalmente en Irán e India. En Irán, CABD también se conoce como “Vajebi” (Farzaneh et al, 2011)(HazardText, 2021e).

También destaca su presencia en sustancias preservantes hidrosolubles para la madera como el arseniato de cobre cromatado (CCA)(Wottitz & Moreno, 2011).

Formas:

El arsénico es un elemento que puede encontrarse en la naturaleza en formas orgánicas e inorgánicas. Rara vez se encuentra en su forma elemental aislada. Más comúnmente, está presente en especies minerales, en aleaciones o como óxido u otra forma compuesta (Budavari, 2000). En su forma inorgánica es posible encontrarle como arsénico trivalente (trioxido de

arsénico, arsenito de sodio, tricloruro de arsénico) o arsénico pentavalente (pentóxido de arsénico, ácido arsenioso, arseniatos).

Fuentes:

Se cree que el arsénico se encuentra en todo el universo. Es el vigésimo elemento más común en la corteza terrestre, con una concentración de 1,8 ppm (Baselt, 1997; Bingham et al, 2001; Budavari, 2000; Zenz, 1994) (HazardText, 2021e).

Se ha encontrado arsénico en(HazardText, 2021e):

- Una variedad de remedios caseros / homeopáticos / herbales de China, India e Irán (Espinoza et al, 1995; Kew et al, 1993; Sheerin et al, 1994; p 5; Hall & Harruff, 1989; Kerr & Saryan, 1986).
- En la contaminación del agua subterránea y potable (hidroarsenismo endémico) en Chile, Taiwán, México, Argentina, Tailandia e India (Mazumder et al, 2001; Rahman y col., 2001; Woollons y Russell-Jones, 1998).
- En un vino elaborado a partir de uvas cultivadas en viñedos tratados con un pesticida arsénico (Houser & Vitek, 1979).
- En conservantes utilizados por taxidermistas (Jensen & Olsen, 1995).
- En opio (contenido de hasta 74,1 mcg / 100 g) (Datta, 1977).
- Brillo de luna contaminado (contiene hasta 415 mcg / L de arsénico) (Gerhardt et al, 1980).
- En la fabricación de vidrio artístico (Apostoli et al, 1998).
- Venenos para hormigas que contienen arsénico sódico (prohibido por la EPA) (Kuslikis et al, 1991).
- Alimentos marinos, especialmente mariscos (las concentraciones varían desde 2 mg / kg para peces de agua dulce hasta 22 mg / kg para langostas) (Buchet et al, 1994; Baselt, 2000).
- Arseniato de cromo-cobre (CCA) utilizado como conservante de la madera (exposición al arsénico a través del polvo en el aire) (Jensen & Olsen, 1995; Nygren et al, 1992; Peters et al, 1984).

4.2.1.2 Efectos clínicos agudos:

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de

arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

Toxicológicos: El arsénico trivalente (As^{3+}) interrumpe la fosforilación oxidativa, lo que conduce a la formación de radicales libres mediante la inhibición del complejo multienzimático piruvato deshidrogenasa, que posteriormente disminuye la gluconeogénesis debido a la falta de acetil-CoA. El arsénico pentavalente (As^{5+}) puede transformarse en arsénico o sustituir al fosfato inorgánico en la glucólisis, lo que provoca el desacoplamiento de la fosforilación oxidativa y la pérdida de la formación de ATP. Crónicamente, el arsénico puede causar daño al ADN, mutación en el gen supresor p-53 e inhibición de los mecanismos de reparación del ADN que conducen al cáncer. Los metales que contienen arsénico se consideran no tóxicos debido a su baja solubilidad. El arsénico orgánico tiene una toxicidad significativamente menor en comparación con las formas inorgánicas trivalentes y pentavalentes (HazardText, 2021a).

Toxicidad leve a moderada: Los síntomas gastrointestinales ocurren rápidamente después de una ingestión aguda. Los signos y síntomas iniciales incluyen ardor en los labios, constricción de la garganta y disfagia. A continuación de estos síntomas sigue un dolor abdominal intenso, náuseas, vómitos y diarrea profusa “como agua de arroz” que puede provocar hipovolemia (HazardText, 2021a).

Además, la hipovolemia por fuga capilar (tercer espacio) es un efecto temprano común. Puede producirse una prolongación del Intervalo QT. Los calambres musculares, el edema facial, la bronquitis, la disnea, el dolor de pecho, la deshidratación, la sed intensa y las alteraciones de los líquidos y los electrolitos también son comunes después de exposiciones importantes. También se puede desarrollar un olor a ajo en el aliento y las heces. La toxicidad subaguda puede producir neuropatías, tanto motoras como sensoriales, y puede progresar a un síndrome similar a Guillain-Barré (HazardText, 2021a).

Toxicidad severa: La hipotensión y la taquicardia son signos tempranos comunes de intoxicación grave. La hipotensión puede ser resistente a la reanimación con líquidos y puede producirse insuficiencia multiorgánica. Pueden aparecer fiebre y taquipnea. Estos pacientes pueden desarrollar arritmias ventriculares, incluida la Torsade de pointes (TdP). Se han informado encefalopatía, convulsiones y coma. Varios días después de la ingestión pueden aparecer insuficiencia renal aguda, anemia hemolítica, rabdomiólisis y hepatitis (HazardText, 2021a).

4.2.1.3 Efectos clínicos crónicos

La absorción oral de arsénico generalmente es la ruta de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente contribuye con menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000). Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La secuencia de intoxicación crónica incluye debilidad, anorexia, hepatomegalia, ictericia y molestias gastrointestinales, seguidas de conjuntivitis, irritación del tracto respiratorio superior, hiperpigmentación, y dermatitis exfoliativa. Voz ronca y perforación del tabique nasal es un resultado común después de una inhalación prolongada de polvo o humo de arsénico blanco. Los síntomas del sistema nervioso periférico pueden incluir entumecimiento, ardor y hormigueo en las manos y los pies; dolor; parestesias; fasciculaciones musculares; temblor grueso; ataxia y confusión mental. Puede seguir debilidad muscular, sensibilidad en las extremidades y dificultad para caminar. La fase final consiste en una neuropatía sensorial periférica de manos y pies. También puede ocurrir neuropatía motora asociada. Ciertos compuestos de arsénico son carcinógenos humanos conocidos. La exposición crónica en entornos ocupacionales puede causar intoxicación y conlleva un mayor riesgo de cáncer de piel, pulmón, vejiga y posiblemente de hígado (HazardText, 2021a).

4.2.1.4 Rangos de toxicidad:

a) Exposición letal mínima

Los diferentes compuestos de arsénico pueden tener diferentes dosis letales. La dosis letal más baja registrada de arsénico es de aproximadamente 130 mg (Bingham et al, 2001; OHM / TADS, 2001). Tan solo 20 mg de arsénico pueden producir toxicidad potencialmente mortal (Hutton & Christians, 1983; Schoolmeester & White, 1980; Zaloga et al, 1970). De acuerdo con una revisión retrospectiva de 155 pacientes con intoxicación por agente depilatorio a base de arsénico corrosivo (CABD), 9 pacientes murieron luego de una ingestión media de 213 +/- 141 g del polvo CABD. Si bien la formulación de estos productos no está estandarizada, el análisis de CABD ha demostrado que consta de aproximadamente un 25% de sulfuro de arsénico y un 65% de bicarbonato de calcio (HazardText, 2021a).

b) Exposición máxima tolerada

AGUDA: El consumo humano diario promedio de arsénico es: 0,025-0,033 mg/kg (en alimentos y agua) (Baselt, 2000). Las estimaciones de dosis tóxicas orales agudas de compuestos de arsénico oscilan entre 1 mg y 10 g. Tan solo 10 ppm en agua puede ser un peligro grave para la salud (OHM / TADS, 2001) (HazardText, 2021a).

CRÓNICA: Los sujetos expuestos crónicamente a niveles entre 0,1 y 0,39 mg/L de arsénico en el agua potable no mostraron diferencias en los efectos sobre la salud de sujetos expuestos a 0,001 mg/L de arsénico (Valentine et al, 1992). La ingestión prolongada de compuestos arsenicales en el rango de 0,04-0,09 mg/kg/día producía con frecuencia una intoxicación leve (Hayes & Laws, 1991). Se informó que los montañeros de Estiria (Austria) ingirieron arsénico una o dos veces por semana como tónico y, en consecuencia, se volvieron tolerantes a dosis diarias estimadas en 400 mg o más (Hayes & Lawes, 1991) (HazardText, 2021a).

c) Clasificación cancerígena:

Tabla 4-4 Clasificación carcinogénica – arsénico inorgánico

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	Referencia
ACGIH	Arsénico y compuestos inorgánicos de As	A1	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	Arsénico inorgánico	A	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	Arsénico y compuestos inorgánicos de As	1	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	Arsénico y compuestos inorgánicos de As: arsénico metálico	Categoría 1	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	Arsénico (compuestos inorgánicos, como As)	Ca	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	Arsénico y compuestos inorgánicos	K	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	Arsénico y compuestos inorgánicos	-	(European Commission, 2000)

Fuente: Extraído de Arsenic. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021a)

Definiciones:

- **ACGIH - A1:** Carcinógeno humano confirmado: El agente es carcinogénico para los humanos según el peso de la evidencia de estudios epidemiológicos.
- **EPA - A:** Carcinógeno humano.
- **IARC – 1:** El agente (o mezcla) es cancerígeno para los seres humanos. La circunstancia de exposición implica exposiciones que son cancerígenas para los seres humanos. Esta categoría se utiliza cuando existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en humanos. Excepcionalmente, un agente (o mezcla) puede incluirse en esta categoría cuando la

evidencia de carcinogenicidad en humanos es menos que suficiente, pero hay evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales de experimentación y evidencia sólida en humanos expuestos de que el agente (o mezcla) actúa a través de un mecanismo relevante de carcinogenicidad.

- **MAK - Categoría 1:** Sustancias que causan cáncer en el hombre y se puede suponer que contribuyen de manera significativa al riesgo de cáncer. Los estudios epidemiológicos proporcionan evidencia adecuada de una correlación positiva entre la exposición de los seres humanos y la aparición de cáncer. Los datos epidemiológicos limitados se pueden corroborar con la evidencia de que la sustancia causa cáncer por un modo de acción que es relevante para el hombre.
- **NIOSH – Ca:** NIOSH considera que esta sustancia es un potencial carcinógeno ocupacional.
- **NTP – K:** Conocido = Se sabe que es un carcinógeno humano

d) Valores de referencia exposición aguda

Tabla 4-5 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria - arsénico inorgánico

Criterio de toxicidad	Concentración (ng/m ³)	Efecto crítico	Referencia
Acute Reference Exposure Level (REL)	200	Disminución del peso fetal en ratones	(OEHHA, 2014)
Short-Term Air Permitting Effects Screening Levels (ESLs)	3000	La toxicidad materna en ratas se documentó como estertores durante la exposición antes del apareamiento y la gestación en un estudio de varios días.	(TCEQ, 2011)

Nota: Acute REL: Concentración en o por debajo de la cual no se prevén efectos adversos para la salud durante una exposición promedio de 1 hr (<https://oehha.ca.gov/air/general-info/oehha-acute-8-hour-and-chronic-reference-exposure-level-rel-summary>)

Fuente: Elaboración propia

e) Valores de referencia exposición crónica

Cancerígenos

Tabla 4-6 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: cancerígenos - arsénico inorgánico

Criterio de toxicidad	Concentración (ng/m ³)	Efecto crítico	Referencia
Inhalation Unit Risk (IUR)	4,3	Mortalidad por cáncer pulmonar	(US-EPA, 2011)
Inhalation Unit Risk (IUR)	3,3	Mortalidad por cáncer pulmonar	(CARB, 1990)
Inhalation Unit Risk (IUR)	0,15	Mortalidad por cáncer pulmonar	TCEQ (Erraguntla et al., 2012)
Inhalation Unit Risk (IUR)	0,7	Mortalidad por cáncer pulmonar	Netherlands (Dutch Expert Committee on Occupational Safety, DECOS)(Lewis et al., 2015)

Nota: Inhalation Unit Risk (IUR) estimación cuantitativa en términos de riesgo por volumen de aire respirado expresado generalmente en unidades de ug/m³ de la sustancia cancerígena (US-EPA, 1994).

Fuente: Elaboración propia

No cancerígenos

Tabla 4-7 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: no cancerígenos - arsénico inorgánico

Criterio de toxicidad	Concentración asociada con riesgo (ng/m ³)	Efecto crítico	Referencia
Chronic Reference Exposure Level (REL)	15	Disminución de la función intelectual en niños de 10 años.	(OEHHA, 2014)

Nota: Chronic REL: están diseñados para abordar exposiciones continuas durante toda la vida: la métrica de exposición utilizada es la exposición promedio anual. (<https://oehha.ca.gov/air/general-info/oehha-acute-8-hour-and-chronic-reference-exposure-level-rel-summary>).

Fuente: Elaboración propia

f) Valores de toxicidad

No se encontró información específica de valores de toxicidad por la vía inhalatoria. Se presentan los disponibles de otras vías

Tabla 4-8 Valores de toxicidad arsénico inorgánico

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Dosis Letal (LD)	Humano - oral	1-2 mg/kg
Dosis Letal (LD)	Conejo - oral	4-19 mg/kg
Dosis Letal (LD)	Rata - oral	8 mg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Ratón - Intraperitoneal	46,200 mcg/kg -- ataxia, hipermotilidad gastrointestinal, diarrea
Dosis Letal 50 (LD50)	Ratón - oral	25-47 mg/kg 145 mg/kg -- ataxia, hipermotilidad gastrointestinal, diarrea
Dosis Letal 50 (LD50)	Cerdo - oral	6,5 mg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Rata - Intraperitoneal	13.390 mcg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Rata - oral	15 mg/kg 112 mg/kg 763 mg/kg -- ataxia, hipermotilidad gastrointestinal, diarrea
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Cerdo de guinea - Intraperitoneal	10 mg/kg -- degeneración del hígado graso, cambios en el riñón, vejiga y uréter
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Cerdo de guinea - Subcutánea	300 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - Subcutánea	300 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Rata - Intramuscular	25 mg/kg
Dosis tóxica mínima publicada (TDLo)	Humano - oral	76 mg/kg por 12 años intermitentes - cancerígeno según los criterios RTECS, tumores del hígado, hemorragia 7.857 mg/kg for 55 años intermitentes -- dermatitis, cambio en la estructura / función del esófago, hemorragia Niños, 4 mg/kg -- cambios en el recuento de leucocitos, acidosis metabólica, cambios en el ECG no diagnósticos
Dosis tóxica mínima publicada (TDLo)	Conejo - implante	75 mg/kg -- agente tumorigénico equívoco según los criterios del RTECS, tumores de pulmón, tórax e hígado
Dosis tóxica mínima publicada (TDLo)	Rata - Oral	Hembra, 580 mcg / kg durante 30 semanas antes del apareamiento y 20 días de embarazo: anomalías del desarrollo del sistema musculoesquelético Hembra, 605 mcg / kg para 35semanas antes del apareamiento: mortalidad antes y después de la implantación 1.360 mg/kg por 17 días- Intermitente: cambios gastrointestinales, cambios en el recuento de células, inflamación crónica del riñón

Fuente: Arsenic. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021a)y Arsenic. Toxicology detail (Micromedex, 2021a)

4.2.1.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

Tabla 4-9 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria- arsénico inorgánico

Entidad	Descripción	Valor (ng/m ³)	Categoría carcinogénica
ACGIH	TLV-TWA	10.000	A1: Carcinógeno humano confirmado: El agente es carcinogénico para los humanos según el peso de la evidencia de estudios epidemiológicos.
	TLV-STEL	No listado	
	TLV-Ceiling	No listado	
OSHA	8 hrs. TWA	No listado	-
	Concentración máxima aceptable	No listado	
NIOSH	TWA	No listado	Ca: NIOSH considera que esta sustancia es un potencial carcinógeno ocupacional
	STEL	2.000 15- minutos	
	Ceiling	No listado	
	IDLH	5.000.000	
DS 594	LPP	10.000	A.1: Sustancia comprobadamente cancerígenas para el ser humano

Fuente: Workplace Standards extraído de Arsenic. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021a) y Arsenic. Toxicology details (Micromedex, 2021a)

Nota:

- TLV-TWA: Umbral Límite-Media Ponderada en el Tiempo, es el valor límite ambiental publicado por la ACGIH; se definen como la "concentración media ponderada en el tiempo, para una jornada laboral normal de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas, a la que pueden estar expuestos casi todos los trabajadores repetidamente día tras día, sin efectos adversos".
- STEL: Límite de exposición a corto plazo. Concentración promedio ponderada en un tiempo de 15 minutos a la que trabajadores pueden estar expuestos hasta 4 veces al día con al menos 1 hora entre exposiciones sucesivas sin efectos adversos si no se supera el TLV-TWA.
- TLV-Ceiling: Nivel de concentración que no deben ser superados en ningún momento de la jornada de trabajo. Éstos pueden ser determinados como valores promediados para períodos de 15 minutos en los casos en que no sea factible una medida instantánea.
- IDLH: Concentración inmediatamente peligrosa para la vida o la salud. Según el NIOSH de EE. UU. Corresponde a la concentración máxima de exposición de la cual se puede escapar en treinta minutos sin ningún síntoma que impida el escape o efectos irreversibles para la salud.
- LPP: límites permisibles ponderados.

4.2.1.6 Toxicocinética

a) Absorción:

Dado que el arsénico existe en el aire como un componente material particulado, la absorción a través del pulmón implica dos procesos: la deposición de las partículas en la superficie del pulmón y la absorción de arsénico del material depositado. En los pacientes con cáncer de pulmón expuestos al arsénico en el humo del cigarrillo, se calculó que la deposición era aproximadamente del 40% y la absorción era del 75% al 85% (Holland et al. 1959). Por lo tanto, la absorción total (expresada como porcentaje de arsénico inhalado) fue de aproximadamente 30 a 34%. En los trabajadores expuestos a polvos de trióxido de arsénico en fundiciones, la cantidad de arsénico excretado en la orina (la principal vía de excreción) fue de aproximadamente el 40-60% de la dosis inhalada estimada (Pinto et al. 1976; Vahter et al. 1986). La absorción de polvos y humos de trióxido de arsénico (evaluados mediante la medición de metabolitos urinarios) se correlacionó con las concentraciones de aire de arsénico promedio ponderadas en el tiempo de los muestreadores de aire de la zona de respiración personal (Offergelt et al. 1992). Las correlaciones fueron mejores inmediatamente después de un turno y justo antes del inicio del siguiente turno. Aunque el porcentaje de deposición no se midió en estos casos, parece probable que se absorbiera casi todo el arsénico depositado. Esta conclusión está respaldada por estudios de instilación intratraqueal en ratas y hámsteres, donde la eliminación de oxi compuestos de arsénico (arsenito de sodio, arseniato de sodio, trióxido de arsénico) del pulmón fue rápida y casi completa (60-90% en 1 día) (Marafante y Vahter 1987; Rhoads y Sanders 1985). En contraste, el sulfuro de arsénico y el arsenato de plomo se eliminaron más lentamente (Marafante y Vahter 1987), lo que indica que la tasa de absorción puede ser menor si el arsénico inhalado se encuentra en una forma altamente insoluble. No hay datos que sugieran que la absorción de arsénico inhalado en los niños sea diferente de la de los adultos (ATSDR, 2007).

Las sales de arsenito son más solubles en agua y se absorben mejor que el trióxido de arsénico.

3) Los compuestos arsenicales trivalentes (arsenitos, como el trióxido de arsénico) son más solubles en agua que los arseniatos (arsenicales pentavalentes). Los arsenitos son generalmente más tóxicos que los arseniatos ya que se absorben más fácilmente (Hayes, 1982). Los compuestos arsenicales orgánicos por lo general son pobremente absorbidos desde el tracto gastrointestinal (Micromedex, 2021a).

b) Distribución:

La distribución del arsénico después de la exposición por inhalación se ha estudiado en ratones (Burchiel et al. 2009, 2010). Los ratones (machos C57B1 / 6N) se expusieron (solo por la nariz) a aerosoles de trióxido de arsénico en concentraciones de 50 o 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ As durante 3 horas/día durante 14 días. Inmediatamente después de la exposición, se observaron aumentos relacionados con la dosis en el arsénico absorbido, en la vejiga, la sangre, el cerebro, los riñones, el hígado, los pulmones y el bazo. Las concentraciones más altas se observaron en hígado, seguidas de vejiga y riñón (ATSDR, 2016).

El arsénico atraviesa fácilmente la barrera placentaria y se ha reportado daño fetal en animales y seres humanos (Micromedex, 2021a).

c) Metabolismo

La principal ruta metabólica del arsénico en el humano es a través del hígado, donde ocurre un proceso de reducción del arsénico V a arsénico III, y reacciones de metilación en donde el arsénico III es metilado por acción enzimática en dos pasos sucesivos, dando por producto los metabolitos metilados ácido monometilarsónico (MMA) y ácido dimetilarsínico (DMA), los cuales son más activos que el arsénico original, por lo que este tipo de metabolismo se conoce como bioactivación (ATSDR, 2016). Estos procesos parecen ser los mismos tanto si la exposición es por inhalación, vía oral o parenteral (Maud & Rumsby, 2008).

d) Excreción

No se encontró información de excreción por la vía inhalatoria. Se presenta la información disponible de otras vías:

Riñón: La eliminación urinaria completa puede llevar semanas después de una dosis única de arsénico, aunque la mayor parte de una dosis única de arsénico inorgánico se excreta en los primeros días después de la ingestión.

La mayor parte del arsénico ingerido se excreta rápidamente en la orina (en 72 horas). A los 5 a 10 días, niveles de arsénico en orina de 1 a 9 mg/L sugieren una exposición estimada superior a 3 mg/día o una fuente continua de exposición al arsénico. (Tsuji et al, 2004) (Micromedex, 2021a).

Heces: Se eliminan pequeñas cantidades de arsénico en las heces (Schoolmeester & White, 1980; Giberson et al, 1976). Los arseniatos se absorben mal en el tracto gastrointestinal y se excretan en gran parte, sin cambios por las heces. (Hayes, 1982) (Micromedex, 2021a).

4.2.1.7 Mecanismo de acción

e) Mecanismos farmacocinéticos

Captación celular: La absorción celular de arsénico depende del estado de su oxidación y del tipo de célula. El arsénico puede atravesar las membranas celulares por difusión pasiva o por transporte mediado por proteínas transportadoras. Para la difusión pasiva, las membranas celulares son más permeables al As (III) que al As (V). Para el transporte mediado por transportadores, los canales de aquaporinas y los transportadores de fosfato se han propuesto como mecanismos para el transporte de arsenito y arsenato mediado por transportadores, respectivamente (Bustaffa et al.2014; Druwe y Vaillancourt 2010; Kumagai y Sumi 2007)(ATSDR, 2016).

Polimorfismos genéticos de enzimas metabolizadoras de arsénico: El As (III) es más tóxico que As (V) y, de manera similar, las formas metiladas de arsenito parecen ser más tóxicas que las formas metiladas de arsenato. Por lo tanto, las alteraciones en el metabolismo del arsénico que dan como resultado un aumento de la formación o una disminución de la oxidación de compuestos de As (III) a compuestos de As (V) pueden aumentar la toxicidad inducida por el arsénico. Los polimorfismos genéticos de varias enzimas involucradas en el metabolismo del arsénico se han asociado con un aumento de los metabolitos de As (III) en la orina. Las alteraciones en el metabolismo del arsénico pueden, en parte, proporcionar una base para la sensibilidad interindividual al arsénico (Bailey y Fry 2014a, 2014b; Bhattacharjee et al.2013a; Bustaffa et al.2014; Faita et al.2013; Naujokas et al.2013; Sumi y Himeno 2012; Smith y Steinmaus 2009). Estudios han examinado la relación entre los polimorfismos de las enzimas que metabolizan el arsénico y los perfiles urinarios de los metabolitos y/o el riesgo de efectos inducidos por el arsénico en las poblaciones humanas. Los polimorfismos examinados incluyen AS3MT (Agusa et al.2009; Engstrom et al.2009, 2011; Porter et al.2010; Rodrigues et al.2012; Tellez-Plaza et al.2013), cistation- β -sintasa (Porter et al. 2010), glutatión S-transferasa π 1 (Agusa et al.2012; Antonelli et al.2014; Marcos et al.2006), glutatión S-transferasa ω 1 (Ahsan et al.2007; Antonelli et al.2014; Marcos et al. 2006; Porter et al.2010; Rodrigues et al.2012), metilentetrahidrofolato reductasa (Ahsan et al.2007; Chung et al.2010; Porter et al.2010) y ADN metiltransferasa 1 específico de N-6-adenina (Harari et al.2013). En general, los resultados muestran que los polimorfismos genéticos de las enzimas que metabolizan el arsénico en los seres humanos están asociados con diferencias en la proporción de MMA: DMA en la orina (ATSDR, 2016).

f) Mecanismos de toxicidad

La toxicidad del arsénico, incluido el cáncer, es muy probable que se deba a múltiples mecanismos, con algunos mecanismos que actúan de forma secuencial o sinérgica. Dos tipos generales de mecanismos parecen estar involucrados en la toxicidad inducida por arsénico: (1) formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y daño subsiguiente a macromoléculas celulares y estrés oxidativo y (2) interacción de arsénico reactivo o especies de metabolitos de arsénico con macromoléculas celulares. Además, los avances recientes en los mecanismos de toxicidad inducida por el arsénico se han centrado en los cambios epigenéticos(ATSDR, 2016).

Los resultados de los estudios mecanicistas de la toxicidad del arsénico sugieren un papel de las ROS en la toxicidad del arsénico inorgánico (Bailey y Fry 2014b; Bhattacharjee et al.2013a, 2013b; Bustaffa et al.2014; Druwe y Vaillancourt 2010; Faita et al.2013; Kumagai y Sumi 2007; Martinez et al.2011; Salinkow y Zhitkovich 2008). El anión superóxido y la formación subsiguiente de peróxido de hidrógeno y radical hidroxilo se han propuesto como los ROS primarios asociados con el estrés oxidativo inducido por arsénico. Se considera que el estrés oxidativo es uno de los efectos biológicos iniciales de la toxicidad inducida por el arsénico, incluida la carcinogénesis(ATSDR, 2016).

La generación de ROS inducida por arsénico se ha asociado con numerosos efectos sobre tejido celular, a través de daño directo o provocar una cascada de efectos en respuesta al estrés

oxidativo. Los siguientes efectos se han asociado con ROS inducidos por arsénico: niveles reducidos de óxido nítrico en estado estable; alteraciones en las reacciones de oxidación/reducción intracelular, que pueden alterar el estado redox intracelular; disminución de los niveles de glutatión; peroxidación lipídica; daño a las proteínas; inhibición de la piruvato deshidrogenasa; disrupción de la membrana mitocondrial e inhibición de enzimas mitocondriales; fosforilación de proteínas alterada y la consiguiente alteración de diversas vías de transducción de señales; aumento de la expresión de factores de transcripción de respuesta al estrés e inestabilidad genómica a través del daño al ADN (roturas de cadena simple y doble, aductos de ADN, mutaciones de pares de bases, reordenamiento de inserciones de deleciones y amplificaciones de secuencias), inhibición irreversible de la reparación del ADN, disfunción de los telómeros, y detención mitótica (ATSDR, 2016).

La interacción del arsénico reactivo o metabolitos de arsénico con macromoléculas celulares se asocia con alteraciones en la función celular (Bhattacharjee et al. 2013a; Bustaffa et al. 2014; Druwe y Vaillancourt 2010; Salinkow y Zhitkovich 2008; Wantanabe e Hirano 2013). Debido a la reactividad del arsénico y los metabolitos, se han identificado varias células objetivo para los efectos inducidos por el arsénico, y la mayoría tiene numerosos efectos en cascada. El arsenato, arsenito, MMA y DMA interactúan directamente con grupos tiol de macromoléculas (p. Ej., Cisteína y glutatión). Como resultado, el arsénico puede inhibir la actividad de las enzimas ricas en tiol, como el piruvato deshidrogenasa, la 2-oxoglutarato deshidrogenasa y la tirosina fosfatasa, e interactuar con las proteínas “dedos de zinc”. También se ha demostrado que el arsénico interfiere con la fosforilación oxidativa mediante la formación de un éster de arseniato inestable. Las especies de arsénico participan en varias reacciones bioquímicas que incluyen interacciones covalentes, reacciones de metilación y desmetilación, reacciones ácido-base y de oxido-reducción. El arsénico altera las proteínas en la vía de señalización de la insulina, lo que provoca una alteración de la homeostasis de la glucosa. Otros efectos celulares atribuidos al arsénico incluyen la estimulación del receptor de esfingosina 1-fosfato (un receptor acoplado a proteína G), detención mitótica e interacciones con tubulina (que conducen a detención mitótica) (ATSDR, 2016).

Cambios epigenéticos. El epigenoma se refiere a compuestos químicos que funcionan como reguladores de genes sin alterar las secuencias de ADN. Investigaciones recientes han demostrado la importancia del epigenoma para mantener el desarrollo, el crecimiento y la homeostasis celular. Los cambios epigenéticos pueden provocar cambios en la expresión genética y provocar inestabilidad genética. Se han propuesto cambios en el epigenoma como mecanismos importantes en la toxicidad inducida por el arsénico, los efectos en el desarrollo y la carcinogénesis (Arita y Costa 2009; Bailey y Fry 2014b; Bhattacharjee et al. 2013a, 2013b; Bustaffa et al. 2014; Martinez et al. 2011; Salinkow y Zhitkovich 2008). Sin embargo, las consecuencias biológicas específicas y las relaciones causales de los cambios epigenéticos no se han establecido y es probable que varíen con los tipos de células y la dosis de arsénico y la duración de la exposición (ATSDR, 2016).

Se ha demostrado que el arsénico afecta el epigenoma mediante alteraciones en la metilación del ADN, las histonas y los microARN (miARN). La metilación del ADN es la adición de un grupo metilo a un nucleótido de citosina o adenina en el ADN; La metilación es un mecanismo importante para regular la expresión génica. Los resultados de estudios in vitro y en animales y de estudios de población humana han demostrado que el arsénico induce tanto la hipometilación como la hipermetilación del ADN. Las alteraciones en la metilación del ADN se han asociado con el desarrollo de enfermedades inducidas por el arsénico, incluida la carcinogénesis y los efectos sobre el desarrollo. Se ha propuesto que la hipometilación regula al alza los oncogenes y que la hipermetilación regula a la baja los genes supresores de tumores. Las histonas, el principal componente proteico de la cromatina, participan en la regulación de la expresión génica. El ADN se envuelve alrededor de las histonas, formando nucleosomas. Estudios recientes muestran que el arsénico puede producir modificaciones postraduccionales en las histonas a través de la metilación, acetilación, fosforilación y ubiquitinación de aminoácidos específicos dentro de la histona y, por lo tanto, afectar la transcripción de genes. Los miARN son pequeños ARN no codificantes que participan en la regulación postranscripcional de la expresión génica. Se ha demostrado que el arsénico altera la expresión de miARN y se ha propuesto que los miARN están involucrados en el desarrollo y progresión del cáncer (ATSDR, 2016).

4.2.2 Trióxido de arsénico - Número CAS: 1327-53-3

El trióxido de arsénico es una forma inorgánica trivalente de arsénico inorgánico. A continuación, se presenta la caracterización del perfil, el cual se basa en la información disponible en “*Hazard Text – Hazard Management – Arsenic Trioxide*” (HazardText, 2021d).

4.2.2.1 Usos/formas/fuentes

USOS:

USO TERAPÉUTICO: El trióxido de arsénico se utiliza para la inducción de la remisión y consolidación en pacientes con leucemia promielocítica aguda (APL) con la presencia de la translocación t (15; 17) o expresión del gen PML / RAR-alfa, que son refractarios o han recaído de quimioterapia con retinoides y antraciclinas (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (HazardText, 2021d).

OTROS USOS: El trióxido de arsénico es el compuesto de arsénico comercial más importante (Clayton & Clayton, 1994). Es el material principal utilizado para producir todos los compuestos de arsénico, y se utiliza como intermediario para insecticidas, herbicidas y fungicidas, como conservante de madera, como agente decolorante y refinador en la fabricación de vidrio, en preparaciones farmacéuticas, pigmentos y en inmersión para ovinos y bovinos para conservar pieles, como mordiente textil y para purificar gases sintéticos (EPA, 1985; Lewis, 1993; Budavari, 1996; Morgan, 1989). Aproximadamente el 85% del uso de plaguicidas de trióxido de arsénico ha sido en preparaciones líquidas destinadas a matar ratones y ratas (EPA, 1988). El 15% restante se ha utilizado para matar topos, tuzas y hormigas (EPA, 1988). Sin embargo, muchos pesticidas que

contienen arsénico han sido prohibidos en los Estados Unidos (Clayton & Clayton, 1994). Durante muchos años, los pesticidas arsénicos fueron la causa más común de intoxicación fatal en los EE.UU. (Hayes & Laws, 1991) (HazardText, 2021d).

FORMAS:

USO TERAPÉUTICO: La inyección de trióxido de arsénico está disponible como solución estéril, transparente e incolora de 10 mg / 10 ml (1 mg/ml) en ampollas de vidrio de un solo uso de 10 ml (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (HazardText, 2021d).

The most common inorganic arsenical in air is arsenic trioxide

El trióxido de arsénico es la forma química de arsénico inorgánico más común en el aire (European Commission, 2000).

FUENTES

El trióxido de arsénico se obtiene como subproducto en la fundición de concentrados de cobre y plomo (HSDB, 2006). En los Estados Unidos, el trióxido de arsénico se encuentra principalmente en la fundición de minerales de sulfuro de cobre; las exposiciones más altas suelen ser las de los tostadores (HSDB, 2006). El trióxido de arsénico en forma solubilizada se convierte en arsenito de sodio, que es más tóxico que en la forma no solubilizada (HazardText, 2021d).

4.2.2.2 Efectos clínicos agudos:

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

Toxicológicos: El arsénico trivalente (As^{3+}) interrumpe la fosforilación oxidativa, lo que conduce a la formación de radicales libres mediante la inhibición del piruvato deshidrogenasa, que posteriormente disminuye la gluconeogénesis debido a la falta de acetyl-CoA. Crónicamente, el arsénico puede causar daño al ADN, mutación en el gen supresor p-53 e inhibición de los mecanismos de reparación del ADN que conducen al cáncer (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Toxicidad leve a moderada: Los síntomas gastrointestinales ocurren rápidamente después de una ingestión aguda. Los signos y síntomas iniciales incluyen ardor en los labios, constricción de la garganta y disfagia. A continuación de estos síntomas sigue un intenso dolor abdominal, náuseas, vómitos y diarrea profusa "como agua de arroz" que puede provocar hipovolemia (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Además, la hipovolemia por fuga capilar (tercer espacio) es un efecto temprano común. Puede producirse una prolongación del Intervalo QT. Los calambres musculares, el edema facial, la bronquitis, la disnea, el dolor de pecho, la deshidratación, la sed intensa y las alteraciones de los líquidos y los electrolitos también son comunes después de exposiciones importantes. También se puede desarrollar un olor a ajo en el aliento y las heces. La toxicidad subaguda puede producir neuropatías, tanto motoras como sensoriales, y puede progresar a un síndrome similar a Guillain-Barré (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Toxicidad severa: La hipotensión y la taquicardia son signos tempranos comunes de intoxicación grave. La hipotensión puede ser resistente a la reanimación con líquidos y puede producirse insuficiencia multiorgánica. Pueden aparecer fiebre y taquipnea. Estos pacientes pueden desarrollar arritmias ventriculares, incluida la Torsade de pointes (TdP). Se han informado encefalopatía, convulsiones y coma. Varios días después de la ingestión pueden aparecer insuficiencia renal aguda, anemia hemolítica, rabdomiólisis y hepatitis (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

4.2.2.3 Efectos clínicos crónicos

La absorción oral de arsénico generalmente es la ruta de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente contribuye con menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000). Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La secuencia de intoxicación crónica incluye debilidad, anorexia, hepatomegalia, ictericia y molestias gastrointestinales, seguidas de conjuntivitis, irritación del tracto respiratorio superior, hiperpigmentación, y dermatitis. Voz ronca y perforación del tabique nasal es un resultado común después de una inhalación prolongada de polvo o humo de arsénico blanco. Los síntomas del sistema nervioso periférico pueden incluir entumecimiento, ardor y hormigueo en las manos y los pies; dolor; parestesias; fasciculaciones musculares; temblor grueso; ataxia; y confusión mental. Puede seguir debilidad muscular, sensibilidad en las extremidades y dificultad para caminar. La fase final consiste en una neuropatía sensorial periférica de manos y pies. También puede ocurrir neuropatía motora asociada. Ciertos compuestos de arsénico son carcinógenos humanos conocidos. La exposición crónica en entornos ocupacionales puede causar intoxicación y conlleva un mayor riesgo de cáncer de piel, pulmón, vejiga y posiblemente de hígado (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

4.2.2.4 Rangos de toxicidad:

No se encontró información de rango de toxicidad por la vía inhalatoria. Se presenta la información disponible de otras vías:

g) Exposición letal mínima

Se han enumerado dosis potencialmente mortales de trióxido de arsénico de 70 a 180 mg o de 1 a 2,5 mg/kg (HSDB, 2006) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Oral: Una dosis oral de 120 mg de trióxido de arsénico puede ser fatal (Finkel, 1983). La ingestión de 2 gramos de trióxido de arsénico en un intento de suicidio fue fatal a pesar de la terapia de quelación, cuidados intensivos de apoyo y hemodiálisis (Levin-Scherz et al, 1987) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Un trabajador que estuvo enterrado bajo trióxido de arsénico crudo durante 1 a 2 minutos murió pocas horas después de la exposición, a pesar del tratamiento intensivo (Gerhardsson et al, 1988) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

El trióxido de arsénico en forma solubilizada se convierte en arsenito de sodio, que es más tóxico que en forma no solubilizada. Se ha reportado que 200 mg de trióxido de arsénico ingeridos de forma aguda por un adulto pueden ser letales (Baselt y Cravey, 1989; Baselt, 1988) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

SERIE DE CASOS: Una serie de pacientes desarrollaron intoxicación aguda por arsénico después de ingerir sopa de curry mezclada con trióxido de arsénico. La concentración estimada de arsénico en la sopa fue de aproximadamente 6.000 mcg/g o superior. Un total de 67 personas se vieron afectadas; 4 murieron (un niño de 10 años, una niña de 16 años, un hombre de 53 años y un hombre de 64 años) aproximadamente a las 12 horas posteriores a la ingestión, siendo la principal causa de muerte por efectos cardiovasculares (Yamauchi & Takata, 2021) (HazardText, 2021d).

h) Exposición máxima tolerada

Adultos

Un hombre de 43 años sobrevivió tras ingerir 54 g de trióxido de arsénico en un intento de suicidio, 200 veces la dosis letal (Duenas-Laita et al, 2005) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Un hombre de 23 años ingirió intencionalmente 1.040 mg de trióxido de arsénico. Las manifestaciones clínicas incluyeron debilidad severa, diarrea acuosa parda, vómitos y sed insaciable, seguidas de campos visuales restringidos, disfunción hepática, dermatitis y neuropatía periférica. Fue tratado con reanimación con líquidos y BAL. Todos los síntomas del paciente, incluida su discapacidad visual, se resolvieron durante las siguientes 3 semanas y fue dado de alta sin secuelas (Kamijo et al, 1998) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Una mujer de 33 años sobrevivió a la ingestión de 1850 mg de trióxido de arsénico después del tratamiento con 2,3 propanosulfonato (DMPS) y hemodiálisis (Kruszewska et al, 1996) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Un hombre de 77 años desarrolló náuseas, vómitos, insuficiencia renal y anemia después de ingerir 4 g de trióxido de arsénico en un intento de suicidio. Con cuidados de apoyo, incluida la terapia de quelación con dimercaprol (BAL), el paciente se recuperó gradualmente (Yilmaz et al, 2009) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Una mujer de 67 años que fue tratada por psoriasis persistente con solución de Fowler durante un período de 15 años (estimado en 25 g de trióxido de arsénico en total) desarrolló fibrosis hepática no cirrótica como resultado de la intoxicación crónica por arsénico (Piontek et al, 1989). (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Un hombre de 45 años se presentó al servicio de urgencias con náuseas y vómitos varias horas después de ingerir intencionalmente 1 g de un material que contenía arsénico que se sospechaba que era material dental de trióxido de arsénico. Una radiografía de abdomen reveló varias lesiones radiopacas en el colon ascendente. Su nivel de arsénico en suero fue de 212,5 mcg / L (referencia normal, menos de 20 mcg/L). El tratamiento incluyó lavado gástrico con carbón activado y quelación con ácido dimercaptopropanosulfónico IV (DMPS). Las complicaciones durante su estadía en el hospital incluyeron el desarrollo de una lesión renal aguda; sin embargo, sus síntomas mejoraron posteriormente de manera gradual y fue dado de alta 17 días después (Tan et al, 2015) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Una mujer de 37 años ingirió intencionalmente 37,5 g de trióxido de arsénico y posteriormente desarrolló hipotensión, taquicardia, prolongación del intervalo QTc, acidosis metabólica, insuficiencia renal aguda, desgarros esofágicos y gastritis. Con terapia de quelación y cuidados de apoyo, se recuperó gradualmente sin secuelas (Lu et al, 2017) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Niños

La ingestión aguda de 9 a 14 mg de trióxido de arsénico por un niño de 16 meses produjo signos y síntomas gastrointestinales clásicos de intoxicación por arsénico (Watson et al, 1981) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

i) Clasificación cancerígena:

Tabla 4-10 Clasificación carcinogénica - Trióxido de arsénico

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	Referencia
ACGIH	No listada	No listada	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	No listada	No listada	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	Trióxido de arsénico	1	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	Arsénico y compuestos inorgánicos de As: Trióxido de arsénico	Categoría 1	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	No listada	No listada	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	No listada	No listada	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	Trióxido de arsénico	1	(European Commission, 2000)

Fuente: Extraído de Arsenic trioxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: (2021) (HazardText, 2021d)

Definiciones:

- IARC – 1:** El agente (o mezcla) es cancerígeno para los seres humanos. La circunstancia de exposición implica exposiciones que son cancerígenas para los seres humanos. Esta categoría se utiliza cuando existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en humanos. Excepcionalmente, un agente (o mezcla) puede incluirse en esta categoría cuando la evidencia de carcinogenicidad en humanos es menos que suficiente, pero hay evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales de experimentación y evidencia sólida en humanos expuestos de que el agente (o mezcla) actúa a través de un mecanismo relevante de carcinogenicidad.
- MAK - Categoría 1:** Sustancias que causan cáncer en el hombre y se puede suponer que contribuyen de manera significativa al riesgo de cáncer. Los estudios epidemiológicos proporcionan evidencia adecuada de una correlación positiva entre la exposición de los seres humanos y la aparición de cáncer. Los datos epidemiológicos limitados se pueden corroborar con la evidencia de que la sustancia causa cáncer por un modo de acción que es relevante para el hombre.

- **Comunidad Europea – 1:** Sustancias que se sabe que son cancerígenas para el hombre.

j) Valores de referencia aguda:

Tabla 4-11 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria – trióxido de arsénico

Criterio de toxicidad	Concentración (ng/m ³)	Efecto crítico	Referencia
Short-Term Air Permitting Effects Screening Levels (ESLs)	3000	La toxicidad materna en ratas se documentó como estertores durante la exposición antes del apareamiento y la gestación en un estudio de varios días.	(TCEQ, 2011)

Fuente: Extraído de https://www.tceq.texas.gov/toxicology/esl/list_main.html

k) Valores de referencia crónica

No se encuentra información específica.

l) Valores de toxicidad

No se encontró información de valores de toxicidad por la vía inhalatoria. Se presenta la información disponible de otras vías:

Tabla 4-12 Valores de toxicidad - trióxido de arsénico

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Dosis Letal 50 (LD50)	Ratón - intravenosa	10.700 mcg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Ratón - oral	20 mg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Ratón - subcutánea	9800 mcg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Rata - intraperitoneal	871 mg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Rata - oral	10 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Vaca - oral	30 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Pollo - subcutánea	13 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Perro - oral	10 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Humano - oral	1.429 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - intravenosa	10.560 mcg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - oral	4 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo – subcutánea	7 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Rata - subcutánea	8 mg/kg

Fuente: Arsenic trioxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: (2021) (HazardText, 2021d)

4.2.2.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

Tabla 4-13 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria - trióxido de arsénico

Entidad	Descripción	Valor (mg/m ³)	Categoría carcinogénica	Efecto crítico
ACGIH	TLV-TWA	No listado	No listado	-
	TLV-STEL	No listado		
	TLV-Ceiling	No listado		
OSHA	8 hrs. TWA	No listado	No listado	
	Concentración máxima aceptable	No listado		
NIOSH	TWA	No listado	No listado	
	STEL	No listado		
	Ceiling	No listado		
	IDLH	No listado		

Fuente: Workplace standards extraído de Arsenic trioxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Value (HazardText, 2021d)

4.2.2.6 Toxicocinética

m) Absorción:

Los compuestos de arsénico se absorben principalmente a través del tracto gastrointestinal o después de la inhalación. Hasta el 80% del trióxido de arsénico ingerido puede ser absorbido (Mahieu et al, 1981) (Micromedex, 2021c).

Dado que el arsénico existe en el aire como material particulado, la absorción a través del pulmón implica dos procesos: la deposición de las partículas en la superficie del pulmón y la absorción de arsénico del material depositado. En los pacientes con cáncer de pulmón expuestos al arsénico en el humo del cigarrillo, se calculó que la deposición era aproximadamente del 40% y la absorción era del 75% al 85% (Holland et al. 1959). Por lo tanto, la absorción total (expresada como porcentaje de arsénico inhalado) fue de aproximadamente 30 a 34%. En los trabajadores expuestos a polvos de trióxido de arsénico en fundiciones, la cantidad de arsénico excretado en la orina (la principal vía de excreción) fue de aproximadamente el 40-60% de la dosis inhalada estimada (Pinto et al. 1976; Vahter et al.1986). La absorción de polvos y humos de trióxido de arsénico (evaluados mediante la medición de metabolitos urinarios) se correlacionó con las concentraciones de aire de arsénico promedio ponderadas en el tiempo de los muestreadores de aire de la zona de respiración personal (Offergelt et al. 1992). Las correlaciones fueron mejores inmediatamente después de un turno y justo antes del inicio del siguiente turno. Aunque el porcentaje de deposición no se midió en estos casos, parece probable que se absorbiera casi todo el arsénico depositado. Esta conclusión está respaldada por estudios de instilación intratraqueal en ratas y hámsteres, donde la eliminación de oxi compuestos de arsénico (arsenito de sodio, arseniato de sodio, trióxido de arsénico) del pulmón fue rápida y casi completa (60-90% en 1 día) (Marafante y Vahter 1987; Rhoads y Sanders 1985). En contraste, el sulfuro de arsénico y el arsenato de plomo se eliminaron más lentamente (Marafante y Vahter 1987), lo que indica que la tasa de absorción puede ser menor si el arsénico inhalado se encuentra en una forma

altamente insoluble. No hay datos que sugieran que la absorción de arsénico inhalado en los niños sea diferente de la de los adultos (ATSDR, 2007).

n) Distribución:

La distribución del arsénico después de la exposición por inhalación se ha estudiado en ratones (Burchiel et al. 2009, 2010). Los ratones (machos C57B1 / 6N) se expusieron (solo por la nariz) a aerosoles de trióxido de arsénico en concentraciones de 50 o 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ As durante 3 horas/día durante 14 días. Inmediatamente después de la exposición, se observaron aumentos relacionados con la dosis en el arsénico absorbido en la vejiga, la sangre, el cerebro, los riñones, el hígado, los pulmones y el bazo. Las concentraciones más altas se observaron en hígado, seguidas de vejiga y riñón (ATSDR, 2016).

La acumulación de arsénico se observa típicamente en tejidos que contienen cantidades significativas de proteínas que contienen grupos sulfhidrilo (ejemplo., uñas, cabello, médula ósea) (Shen et al, 1997)(Micromedex, 2021c)

o) Metabolismo

En uso terapéutico el trióxido de arsénico se somete a hidrólisis para formar ácido arsenioso, la especie farmacológicamente activa, cuando se coloca en solución. El ácido arsenioso se metila en metabolitos menos citotóxicos, ácido monometilarsónico y ácido dimetilarsínico, mediante metiltransferasas principalmente en el hígado. En uso terapéutico se ha observado que en el hígado el arsénico pentavalente se reduce a arsénico trivalente por la arsenato reductasa; el arsénico trivalente se metila en ácido monometilarsónico y el ácido monometilarsónico es metilado en ácido dimetilarsónico mediante metiltransferasas. El metabolito activo es el ácido dimetilarsínico (Prod Info TRISENOX (R) IVinjection, 2010) (Micromedex, 2021c).

p) Excreción

Riñón: Aproximadamente el 15% de la dosis de trióxido de arsénico se excreta en la orina como ácido arsenioso inalterable, la especie activa. Los metabolitos metilados del ácido arsenioso (ácido monometilarsónico y ácido dimetilarsínico) se excretan principalmente en la orina (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010).

Bilis: Es extensa, basado en la aparición de cantidades sustancialmente mayores de arsénico recuperadas en las heces frente a la orina en un estudio (Shen et al, 1997).

Total body clearance: El clearance total del ácido arsenioso, la especie activa del trióxido de arsénico, es de 49 L/h. El clearance no se ve afectado por el peso corporal o la dosis (para un rango de dosis de 7 a 32 mg) (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (Micromedex, 2021c).

q) Vida media eliminación

La vida media de eliminación media del ácido arsenioso, la especie activa del trióxido de arsénico, es de 10 a 14 horas (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (Micromedex, 2021c).

4.2.2.7 Mecanismo de acción

r) Mecanismos farmacocinéticos

El mecanismo de acción del trióxido de arsénico no se comprende del todo bien; sin embargo, los estudios in vitro indican que los cambios morfológicos y la fragmentación del ADN característicos de la apoptosis ocurren en las células de leucemia promielocítica humana NB4 después de la administración de trióxido de arsénico. Además, el trióxido de arsénico induce daño y degradación de la proteína de fusión PML / RAR-alfa (ProdInfo TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (Micromedex, 2021c).

s) Mecanismos de toxicidad

El arsénico trivalente altera la fosforilación oxidativa, lo que conduce a la formación de radicales libres mediante la inhibición del piruvato deshidrogenasa, que posteriormente disminuye la gluconeogénesis debido a la falta de acetyl-CoA. Crónicamente, el arsénico puede causar daño al ADN, mutación en el gen supresor p-53 e inhibición de los mecanismos de reparación del ADN que conducen al cáncer (Ford, 2006) (Micromedex, 2021c)..

4.2.3 Tricloruro de arsénico - Número CAS: 7784-34-1

4.2.3.1 Usos/formas/fuentes

Usos

Se utiliza en las industrias de la cerámica y la metalurgia, en la producción de productos farmacéuticos, herbicidas e insecticidas con arsénico orgánico y en la síntesis de cloroderivados de la arsina (Budavari, 1996; ITI, 1995; Harbison, 1998; Hathaway et al, 1996; Lewis, 1997; HSDB , 2000) (HazardText, 2021c).

Formas

El tricloruro de arsénico es un líquido aceitoso incoloro o amarillo, que se evapora en el aire y tiene un olor acre desagradable y un sabor metálico dulce (AAR, 1998; (Budavari, 1996; Hathaway et al, 1996; ITI, 1995; Sittig, 1991). ; Lewis, 1998; Lewis, 1997). El tricloruro de arsénico libera ARSÉNICO y ÁCIDO CLORHÍDRICO al entrar en contacto con el agua o cuando se calienta hasta su descomposición (AAR, 1998; (Lewis, 1996; EPA, 1985; OHM / TADS, 1991; HSDB, 2000). Su toxicidad está determinada por ambos componentes (HazardText, 2021c).

4.2.3.2 Efectos clínicos agudos:

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

Los vapores o el polvo de tricloruro de arsénico son muy irritantes para los ojos, la piel, la nariz, la garganta y las membranas mucosas (AAR, 1998; Lewis, 1997; EPA, 1985; Grant, 1993; HSDB, 2000). La irritación de los ojos por los vapores de tricloruro de arsénico puede caracterizarse por enrojecimiento, lagrimeo y sensación de picazón o ardor (Grant, 1993; HSDB, 2000). La exposición dérmica directa puede causar irritación y formación de ampollas en la piel causando daños graves en el punto de contacto (Lewis, 1998; EPA, 1985; Sittig, 1991). El tricloruro de arsénico irrita e inflama las membranas mucosas de la nariz, aumentando enormemente la permeabilidad de los capilares sanguíneos (HSDB, 2000; Morgan, 1993; EPA, 1985). Pueden seguir sensaciones de ardor y sequedad, y constricción de las cavidades nasales, incluso conduciendo a perforaciones del tabique (Clayton y Clayton, 1994; Hathaway et al, 1996). Después de la ingestión, el tricloruro de arsénico puede causar irritación severa de la boca, el esófago y el estómago (EPA, 1985; HSDB, 2000). Los efectos inmediatos incluyen ardor sensaciones de los labios, constricción de la garganta y dificultad para tragar (Hathaway et al, 1996; HSDB, 2000). Puede ocurrir una corrosión severa en el esófago o el estómago. Puede producirse gastroenteritis hemorrágica acompañada de pérdida de electrolitos y líquidos, colapso y shock (Sittig, 1991; HSDB, 2000). La ingestión aguda de arsénico generalmente produce síntomas en 30 a 60 minutos, pero la aparición de los síntomas puede retrasarse varias horas si se ingiere con alimentos (Morgan, 1993; Sittig, 1991; HSDB, 2000). Después de la ingestión, inhalación o exposición dérmica al tricloruro de arsénico, puede ocurrir una intoxicación sistémica por arsénico (CHRIS, 2000; EPA, 1985; HSDB, 2000; Lewis, 1998). Los principales órganos diana de la intoxicación por arsénico inicialmente son el tracto gastrointestinal, los riñones, el hígado, el corazón y el cerebro. Eventualmente, la piel, la médula ósea y el sistema nervioso periférico pueden dañarse significativamente (Finkel, 1983; Morgan, 1993; Sittig, 1991; HSDB, 2000). Un sabor metálico dulce o un olor a ajo en el aliento y las heces pueden ayudar a identificar la intoxicación por tricloruro de arsénico. Los síntomas adicionales incluyen dolor abdominal intenso, vómitos, disfagia y diarrea acuosa abundante (como agua de arroz) y, a veces, con sangre (EPA, 1988; HSDB, 2000; Morgan, 1993; Hathaway et al, 1996; Sittig, 1991). Son frecuentes la deshidratación, la sed intensa y las alteraciones hidroelectrolíticas. La hipovolemia por fuga capilar ("tercer espacio") y el aumento de la permeabilidad capilar son signos tempranos comunes de intoxicación (Morgan, 1993; EPA, 1988; HSDB, 2000). La lesión renal se manifiesta como oliguria con hematuria, proteinuria y glucosuria y, en casos graves de intoxicación, puede producirse una necrosis tubular aguda (Morgan, 1993; HSDB, 2000). El tricloruro de arsénico daña el parénquima hepático y produce un aumento de las enzimas hepáticas, infiltración grasa,

necrosis central y cirrosis (HSDB, 2000). Los efectos cardiovasculares pueden resultar de alteraciones electrolíticas y acción tóxica directa después de la intoxicación por tricloruro de arsénico, causando arritmias cardíacas y anomalías del ECG que puede persistir durante meses después de la recuperación (Morgan, 1993; HSDB, 2000). Puede producirse encefalopatía permanente por exposición aguda a compuestos de arsénico. La encefalopatía puede provocar atrofia de la corteza de uno a seis meses después de la exposición (Fincher y Koerker, 1987). Los efectos agudos del sistema nervioso central pueden incluir dolores de cabeza, mareos, debilidad y espasmos musculares, sudores fríos, letargo, delirio, convulsiones ocasionales y síncope; pueden producirse casos graves, parálisis general, coma e incluso la muerte (HSDB, 2000; Lewis, 1996; Morgan, 1993). La neuropatía periférica de las neuronas sensoriales y motoras puede aparecer después de la intoxicación por tricloruro de arsénico, independientemente de la ruta de exposición (Clayton y Clayton, 1994; Harbison, 1998). Comúnmente comienza una a 3 semanas después (Le Quesne y McLeod, 1977; Heyman et al, 1956), generalmente como parestesias de las plantas de los pies, luego las manos, progresando proximalmente durante los siguientes días (Heyman et al, 1956). Entonces se desarrolla una debilidad y atrofia muscular severa, más distal que proximal, causando discapacidad (Le Quesne y McLeod, 1977; Donofrio y col., 1987; Heyman y col., 1956). Inicialmente puede confundirse con el síndrome de Guillain-Barré (Clayton y Clayton, 1994; Donofrio et al, 1987).

Los hallazgos físicos de la neuropatía por arsénico generalmente incluyen una disminución prominente de la sensación al tacto, dolor y temperatura, siguiendo una distribución simétrica de guante y calcetín (Harbison, 1998; Heyman et al, 1956). También son comunes la pérdida del sentido de la vibración, la pérdida de reflejos y la debilidad muscular. El arsénico inhibe las enzimas necesarias para la respiración celular y tiene el efecto de agotar las reservas de energía celular, lo que conduce a la muerte celular (Schoolmeester y White, 1980). La hemólisis, pancitopenia y anemia hipoplásica pueden ocurrir después de una intoxicación aguda por arsénico (ITI, 1995; Kyle y Pease, 1965; Kjeldsberg y Ward, 1972). Líneas blancas transversales en las uñas, pueden verse después de una exposición aguda, suelen tardar 5 semanas en aparecer por encima de la cutícula y avanzar 1 mm por semana, permitiendo una aproximación del tiempo de exposición aguda (Heyman et al, 1956). En los animales, los síntomas agudos de la intoxicación por tricloruro de arsénico pueden incluir salivación, sed, vómitos, cólicos violentos, diarrea acuosa y a veces, con sangre y agotamiento. Los síntomas puede progresar a depresión y pérdida del apetito, marcha tambaleante, temblores, estupor, parálisis de las extremidades inferiores y convulsiones (HazardText, 2021c).

4.2.3.3 Efectos clínicos crónicos

La absorción oral de arsénico generalmente es la ruta de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente contribuye con menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000). Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La intoxicación crónica por arsénico debido al tricloruro de arsénico produce manifestaciones dérmicas más prominentes que los efectos gastrointestinales que caracterizan la intoxicación aguda. Hiperpigmentación de la piel, hiperqueratosis, edema de la cara, párpados y tobillos, salivación excesiva y sudoración con olor a ajo tanto en el aliento como en la transpiración, dermatitis exfoliativa. La dermatitis y los cambios cutáneos cancerosos son signos tempranos de intoxicación crónica (Morgan, 1993; HSDB, 2000; Lewis, 1996) Raffle, 1994). También puede ocurrir pérdida de cabello o uñas y estrías blancas en las uñas (líneas de Mee) (HSDB, 2000; (Morgan, 1993; Finkel, 1983). Los trabajadores expuestos crónicamente al arsénico por inhalación y contacto dérmico han desarrollado ronquera, dolor de garganta, irritación nasal y posible perforación del tabique nasal, irritación de ojos, piel y membranas mucosas y, raramente, cirrosis del hígado (ACGIH, 1996; (Harbison, 1998; Sittig, 1991; HSDB, 2000; Clayton y Clayton, 1994). El tricloruro de arsénico es muy irritante para los ojos; La exposición crónica puede causar conjuntivitis con lagrimeo y sensación de irritación, posiblemente debido a la excreción de arsénico en las lágrimas. Se debate si los compuestos arsenicales orgánicos afectan selectivamente al nervio óptico o la retina causando ceguera (Grant, 1993; Hathaway et al, 1996). Las alteraciones del sistema digestivo, como calambres, estomatitis, estreñimiento o diarrea, náuseas y pérdida de apetito y peso corporal, pueden ser el resultado de la exposición crónica al tricloruro de arsénico (Lewis, 1996; Morgan, 1993; HSDB, 2000). El daño hepático, revelado como hepatomegalia e ictericia, puede progresar a cirrosis, hipertensión portal y ascitis (Lewis, 1996; Morgan, 1993; HSDB, 2000). La intoxicación sistémica crónica también puede caracterizarse por neuritis periférica, que se manifiesta por confusión y debilidad, falta de coordinación, ardor u hormigueo en las manos y pies, parestesia e hiperestesia (Grant, 1993; HSDB, 2000; ITI, 1995). Los compuestos arsenicales pueden afectar la médula ósea y alterar la composición celular de la sangre (HSDB, 2000). El arsénico tiene un efecto depresor sobre la eritropoyesis de la médula ósea y mielopoyesis (ITI, 1995; Sittig, 1991). La evaluación hematológica después de la exposición crónica al tricloruro de arsénico generalmente revela anemia hipoplásica o aplásica, a veces acompañado de leucopenia. Se ha informado leucemia mieloide aguda, y la eosinofilia y la anisocitosis pueden ser evidentes (ITI, 1995; HSDB, 2000; Kjeldsberg y Ward, 1972). Se ha informado que el deterioro de la circulación periférica y el fenómeno de Raynaud están relacionados con la exposición a largo plazo a compuestos de arsénico (Hathaway et al, 1996). Se han observado cambios en el electrocardiograma después de la exposición crónica al arsénico, estos cambios se atribuyen a alteraciones electrolíticas causadas por intoxicación por arsénico (Sittig, 1991). En los animales, los síntomas crónicos de la intoxicación por tricloruro de arsénico pueden incluir indigestión, sed, emaciación, pelo seco, pulso débil e irregular membranas mucosas de color rojo ladrillo (HSDB, 2000) (HazardText, 2021c).

4.2.3.4 Rangos de toxicidad:

t) Exposición letal mínima

INHALACIÓN: En animales de experimentación, una exposición por inhalación de 5 minutos a 40.000 ppm de tricloruro de arsénico provoca la muerte por espasmo laríngeo (Delepine, 1923).

DÉRMICA: Después de la exposición dérmica directa con el líquido, la necrosis tisular progresa rápidamente con absorción sistémica de arsénico (Delepine, 1923).

ORAL: 1 mg/kg de arsénico ingerido puede ser letal en un niño (Woody y Komentani, 1948). Tan solo 20 miligramos de arsénico pueden producir toxicidad potencialmente mortal (Zaloga et al, 1970; Schoolmeester & White, 1980). Una dosis oral de 120 mg de trióxido de arsénico puede ser fatal (Finkel, 1983).

DOSIS LETAL - La dosis humana mortal es de 70 a 180 mg dependiendo del peso de la víctima (EPA, 1985) (HazardText, 2021c).

u) Exposición máxima tolerada

AGUDA: Las estimaciones de dosis tóxicas orales agudas de varios compuestos de arsénico oscilan entre un miligramo y 10 gramos. El trióxido de arsénico en forma solubilizada se convierte en arsenito de sodio, que es más tóxico que en forma no solubilizada. La ingestión de 200 miligramos de trióxido de arsénico por un adulto puede ser letal (Baselt y Cravey, 1989; Baselt, 1988). La ingestión aguda de 9 a 14 miligramos de trióxido de arsénico por un niño de 16 meses produjo signos y síntomas gastrointestinales clásicos de intoxicación por arsénico (Watson et al, 1981). Un hombre de 30 años sobrevivió a una ingestión de 6 onzas de "Blue Ball Rat Killer" que contenía 1,5% de óxido de arsénico (2.150 miligramos de arsénico metálico por 6 onzas) con terapia agresiva (reanimación con fluidos, quelación y hemodiálisis) (Fesmire et al, 1988). El arsénico trivalente (arsenito) es más tóxico en animales que la forma pentavalente (arsenato) (Morgan, 1989). Puede producirse una toxicidad significativa con grandes cantidades de sales pentavalentes en humanos. El arsénico pentavalente puede convertirse in vitro en arsénico trivalente (HazardText, 2021c).

v) Clasificación cancerígena

Tabla 4-14 Clasificación carcinogénica - Tricloruro de arsénico

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	referencia
ACGIH	No listada	No listada	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	No listada	No listada	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	No listada	No listada	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	No listada	No listada	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	No listada	No listada	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	No listada	No listada	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	No listada	-	(European Commission, 2000)

Fuente: Extraído de Arsenic trichloride. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021c).

w) Valores de referencia aguda:

Sin información.

x) Valores de referencia crónica

Sin información.

y) Valores de toxicidad

Tabla 4-15 Valores de toxicidad - tricloruro de arsénico

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Concentración letal mínima publicada (LCLo)	Gato - inhalación	200 mg/m ³ para 20 metros
Concentración letal mínima publicada (LCLo)	Ratón - inhalación	338 mg/m ³ para 10 metros
Dosis letal 50 (LD50)	Rata - oral	48 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50)	Rata - dermal	80 mg/kg

Fuente: Workplace standards extraído de Arsenic trichloride. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021c).

4.2.3.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

Tabla 4-16 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria tricloruro de arsénico

Entidad	Descripción	Valor (mg/m ³)	Categoría carcinogénica	Efecto crítico
ACGIH	TLV-TWA	No listado	No listado	-
	TLV-STEL	No listado		
	TLV-Ceiling	No listado		
OSHA	8 hrs. TWA	No listado	No listado	
	Concentración máxima aceptable	No listado		
NIOSH	TWA	No listado	No listado	
	STEL	No listado		
	Ceiling	No listado		
	IDLH	No listado		

Fuente: Workplace standards extraído de Arsenic trichloride. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021c).

4.2.3.6 Toxicocinética

No se encuentra información específica.

4.2.3.7 Mecanismo de acción

No se encuentra información específica.

4.2.4 Pentóxido de arsénico - Número CAS: 1303-28-2

4.2.4.1 Usos/formas/fuentes

Usos

El pentóxido de arsénico se utiliza como herbicida, conservante de madera, adhesivos metálicos, insecticidas, fungicida, en teñido e impresión, y en la producción de arseniatos (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2008; Sax & Lewis, 1987; Budavari, 1989; OHM / TADS, 1991; HSDB, 1991; EPA, 1985). Se sabe poco sobre los efectos del pentóxido de arsénico (HazardText, 2021b).

Formas

El pentóxido de arsénico es un compuesto de arsénico inorgánico sólido pentavalente, cristalino, blanco, amorfo, inodoro. Se disuelve en agua para formar ácido arsénico (AAR, 1987; Sax y Lewis, 1987; Sax y Lewis, 1989; Budavari, 1989; OHM / TADS, 1991; CHRIS, 1991; HSDB, 1991; EPA, 1985) (HazardText, 2021b).

4.2.4.2 Efectos clínicos agudos:

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

Toxicológicos: El arsénico pentavalente puede transformarse en arsénico o sustituir al fosfato inorgánico en la glucólisis, lo que provoca el desacoplamiento de la fosforilación oxidativa y la pérdida de la formación de ATP (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

Toxicidad leve a moderada: Los síntomas gastrointestinales ocurren rápidamente después de una ingestión aguda. Los signos y síntomas iniciales incluyen ardor en los labios, constricción de la garganta y disfagia. A continuación de estos síntomas sigue un dolor abdominal intenso, náuseas, vómitos y diarrea profusa "como agua de arroz" que puede provocar hipovolemia (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

Además, la hipovolemia por fuga capilar (tercer espacio) es un efecto temprano común. Puede producirse una prolongación del Intervalo QT. Los calambres musculares, el edema facial, la bronquitis, la disnea, el dolor de pecho, la deshidratación, la sed intensa y las alteraciones de los líquidos y los electrolitos también son comunes después de exposiciones importantes. También se puede desarrollar un olor a ajo en el aliento y las heces. La toxicidad subaguda puede producir

neuropatías, tanto motoras como sensoriales, y puede progresar a un síndrome similar a Guillain-Barré (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

Toxicidad severa: La hipotensión y la taquicardia son signos tempranos comunes de intoxicación grave. La hipotensión puede ser resistente a la reanimación con líquidos y puede producirse insuficiencia multiorgánica. Pueden aparecer fiebre y taquipnea. Estos pacientes pueden desarrollar arritmias ventriculares, incluida la Torsade de pointes (TdP). Se han informado encefalopatía, convulsiones y coma. Varios días después de la ingestión pueden aparecer insuficiencia renal aguda, anemia hemolítica, rabdomiólisis y hepatitis (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

4.2.4.3 Efectos clínicos crónicos

La absorción oral de arsénico generalmente es la ruta de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente contribuye con menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000). Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La exposición crónica, el arsénico puede causar daño al ADN, mutación en el gen supresor p-53 e inhibición de los mecanismos de reparación del ADN que conducen al cáncer(HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

La secuencia de intoxicación crónica incluye debilidad, anorexia, hepatomegalia, ictericia y molestias gastrointestinales, seguidas de conjuntivitis, irritación del tracto respiratorio superior, hiperpigmentación, y dermatitis exfoliativa. Una voz ronca y perforación del tabique es un resultado común después de una inhalación prolongada de polvo o humo de arsénico blanco. Los síntomas del sistema nervioso periférico pueden incluir entumecimiento, ardor y hormigueo en las manos y los pies; dolor; parestesias; fasciculaciones musculares; temblores fuertes; ataxia; y confusión mental. Puede seguir debilidad muscular, sensibilidad en las extremidades y dificultad para caminar. La fase final consiste en una neuropatía sensorial periférica de manos y pies. También puede ocurrir neuropatía motora asociada. Ciertos compuestos de arsénico son carcinógenos humanos conocidos. La exposición crónica en entornos ocupacionales puede causar intoxicación y conlleva un mayor riesgo de cáncer de piel, pulmón, vejiga y posiblemente de hígado (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

Se consideró que la exposición crónica al pentóxido de arsénico era, al menos en parte, responsable de un patrón complejo de efectos sobre la salud en una familia que incluye: hiperestesias sensoriales, calambres musculares, conjuntivitis pruriginosa recurrente, otitis media, sinusitis, bronquitis, neumonía, erupciones cutáneas descritas como " tipo sarampión", piel enrojecida y engrosada en las plantas, malestar general, disminución de la sensibilidad en manos y pies, dolores de cabeza, desmayos, convulsiones tónico clónicas en niños más pequeños,

epistaxis, fácil formación de moretones, alopecia y parto prematuro (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

4.2.4.4 Rangos de toxicidad:

z) Exposición letal mínima

Una concentración de 10 ppm de pentóxido de arsénico en el agua presenta un peligro agudo (OHM / TADS, 2000).

Se observó una rápida extinción en las colonias reproductoras de ratas y ratones cuando se agregaron 5 mg / L de pentóxido de arsénico al agua potable (OHM / TADS, 2000). 1 mg / kg de arsénico ingerido puede ser letal en un niño (Woody y Kometani, 1948). La dosis letal más pequeña registrada de arsénico es de aproximadamente 130 mg (Bingham et al, 2001; OHM / TADS, 2001). Tan solo 20 mg de arsénico pueden producir toxicidad potencialmente mortal (Hutton & Christians, 1983; Schoolmeester & White, 1980; Zaloga et al, 1970) (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

INFORMES DE CASOS: Entre 1966 y 1979, se produjeron 61 casos de intoxicación accidental por arsenito de sodio, incluidos 11 pacientes que fueron hospitalizados y 24 casos mortales en adultos y niños reportado al Sistema de Monitoreo de Incidentes de Plaguicidas de la EPA (PIMS) (EPA, 1988) (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

aa) Exposición máxima tolerada

AGUDA: Las estimaciones de dosis tóxicas orales agudas de varios compuestos de arsénico oscilan entre 1 miligramo y 10 gramos. El arsénico pentavalente se puede convertir in vivo en arsénico trivalente. El arsénico trivalente (arsenito) es más tóxico en los animales que la forma pentavalente (arsenato). Sin embargo, puede ocurrir una toxicidad significativa con grandes cantidades de sales pentavalentes en humanos (Morgan, 1993).

Un hombre de 30 años sobrevivió a una ingestión de 6 onzas de "Blue Ball Rat Killer" que contenía 1,5% de óxido de arsénico (2.150 miligramos de arsénico metálico por 6 onzas) con terapia agresiva (reanimación con fluidos, quelación y hemodiálisis) (Fesmire et al, 1988).

En una serie de casos de 149 ingestas de veneno para hormigas que contenía arseniato en Minnesota, principalmente en niños menores de tres años, no se les administró ningún tratamiento y no se produjeron efectos adversos en el seguimiento de 4 a 6 meses después de la exposición. En dos casos, los niveles de arsénico en orina sin quelación alcanzaron 3.500 y 5.819 mcg/24 horas y no se observaron secuelas, lo que sugiere que muchas ingestiones pequeñas de arsénico pueden permanecer asintomáticas (Kingston et al, 1993).

bb) Clasificación cancerígena

Tabla 4-17 Clasificación carcinogénica - Pentóxido de arsénico

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	referencia
ACGIH	No listada	No listada	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	No listada	No listada	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	Pentóxido de arsénico	1	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	No listada	No listada	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	No listada	No listada	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	No listada	No listada	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	Pentóxido de arsénico	1	(European Commission, 2000)

Fuente: extraído de Arsenic pentoxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021b).

Definiciones:

- **IARC – 1:** El agente (o mezcla) es cancerígeno para los seres humanos. La circunstancia de exposición implica exposiciones que son cancerígenas para los seres humanos. Esta categoría se utiliza cuando existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en humanos. Excepcionalmente, un agente (o mezcla) puede incluirse en esta categoría cuando la evidencia de carcinogenicidad en humanos es menos que suficiente, pero hay evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales de experimentación y evidencia sólida en humanos expuestos de que el agente (o mezcla) actúa a través de un mecanismo relevante de carcinogenicidad.
- **Comunidad Europea – 1:** Sustancias que se sabe que son cancerígenas para el hombre.

cc) Valores de referencia aguda:

No se encuentra información específica

dd) Valores de referencia crónica

No se encuentra información específica

ee) Valores de toxicidad

Tabla 4-18 Valores de toxicidad - pentóxido de arsénico

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Dosis letal 50 (LD50)	Ratón - oral	55 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50)	Rata - oral	8 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - intravenosa	6 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - subcutánea	12.400 mcg/kg

Fuente: Extraído de Arsenic pentoxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021b).

4.2.4.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

Tabla 4-19 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria pentóxido de arsénico

Entidad	Descripción	Valor (mg/m ³)	Categoría carcinogénica	Efecto crítico
ACGIH	TLV-TWA	No listado	No listado	-
	TLV-STEL	No listado		
	TLV-Ceiling	No listado		
OSHA	8 hrs. TWA	No listado	No listado	
	Concentración máxima aceptable	No listado		
NIOSH	TWA	No listado	No listado	
	STEL	No listado		
	Ceiling	No listado		
	IDLH	No listado		

Fuente: Workplace standards extraído de Arsenic pentoxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021b).

ff) Toxicocinética

Absorción: El pentóxido de arsénico se absorbe mínimamente a través de la piel intacta y se absorbe fácilmente por ingestión, inhalación y a través de las membranas mucosas (CDC) (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2008)(Micromedex, 2021b).

Se realizaron experimentos con vacas en pastoreo y vacas mantenidas en el interior para estudiar la transferencia de elementos tóxicos de su ración a la leche y tejidos comestibles. Los elementos tóxicos se administraron mediante obleas de concentrados que contenían una mezcla de cadmio, plomo, acetato mercurio y pentóxido de arsénico. El hígado y particularmente el riñón fueron los sitios principales de acumulación de elementos. El aumento de las concentraciones de elementos en la dieta no dio como resultado concentraciones significativamente más altas en la leche, la sangre y el tejido muscular. El arsénico soluble resultó en niveles más altos de este elemento en

el tejido muscular. En cuanto al carácter de los cambios patológicos, no se observaron diferencias esenciales entre los grupos control y experimental. ("ARSENIC PENTOXIDE HSDB ® - Hazardous Substances Data Bank," 1992).

gg) Mecanismo de acción

No se encuentra información específica

4.2.5 Arsina - Número CAS: 7784-42-1

4.2.5.1 Usos/formas/fuentes

USO COMERCIAL: La arsina se produce intencionalmente para su uso en síntesis orgánica y en la industria electrónica (US DHHS, 1986; Sheehy & Jones, 1993; Schenker, 1992). Se utiliza en la industria de los semiconductores para grabar arseniuro de galio, lo que mejora la eficiencia de los semiconductores (HazardText, 2021e).

FUENTES: La arsina se produce cuando el agua entra en contacto con arseniuro metálico o cuando los ácidos entran en contacto con arsénico metálico o compuestos de arsénico (US DHHS, 1986) (HazardText, 2021e).

PRODUCCIÓN ACCIDENTAL DE ARSINA (INDUSTRIA): Las exposiciones pueden resultar de cualquier operación en la que un ácido reductor o agua actúe sobre metales u otras sustancias que contengan arsénico / arseniuro (Stokinger, 1981). Las circunstancias comunes a la industria que han resultado en exposición a la arsina incluyen: fundición y refinado de metales, galvanizado, soldadura, recubrimiento de plomo, grabado y rociado de agua sobre escoria metálica (US DHHS, 1986) (HazardText, 2021e).

PRODUCCIÓN ACCIDENTAL DE ARSINA (CONSUMIDORES): Las circunstancias en las que los hogares, los agricultores u otros consumidores han generado accidentalmente arsina incluyen: el uso de soluciones ácidas para limpiar los desagües en los que anteriormente se vertieron compuestos de arsénico, el uso de ácido para limpiar los contenedores que anteriormente contenían herbicidas a base de arsenito de sodio, exponiendo escaleras de aluminio a piscinas de arsenito de sodio., reutilización de contenedores para insecticidas incompatibles (US DHHS, 1986) (HazardText, 2021e).

4.2.5.2 Efectos clínicos agudos:

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de

arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

Los compuestos de arsénico se absorben principalmente a través del tracto gastrointestinal,

Toxicológicos: La arsina se absorbe bien por inhalación y se distribuye por todo el cuerpo. Las exposiciones grandes resultan en hemólisis. El mecanismo informado es la fijación de arsina por grupos sulfhidrilo en la hemoglobina y otras proteínas esenciales. La interacción forma un intermedio reactivo que altera el flujo de iones transmembrana y aumenta en gran medida el calcio intracelular(HazardText, 2021e)(Micromedex, 2021d).

Toxicidad leve a moderada: Puede causar dolores de cabeza, olor a ajo en el aliento, náuseas, vómitos y dolor abdominal o en flancos (HazardText, 2021e)(Micromedex, 2021d).

Toxicidad severa: La toxicidad grave es causada por la hemólisis y sus complicaciones. Hipotensión, dolor en flancos, coluria, hematuria, insuficiencia renal aguda, hiperpotasemia, debilidad y calambres musculares, alteración del estado mental y cambios en el ECG (Ej., Ondas T puntiagudas, ensanchamiento del QRS) secundarios a hiperpotasemia o isquemia secundaria a la reducción de la capacidad de transporte de oxígeno. La evidencia de hemólisis puede aparecer pocas horas después de una exposición severa o puede demorarse más de 6 horas después de una exposición menos severa. En los próximos días pueden aparecer ictericia, hepatomegalia y derrames pleurales. La neuropatía periférica puede ser un efecto retardado y puede no ser completamente reversible(HazardText, 2021e)(Micromedex, 2021d)

4.2.5.3 Efectos clínicos crónicos

Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La exposición crónica puede resultar en la excreción de arsénico en la orina; pequeñas cantidades pueden excretarse como trimetilarsina y la arsina se excreta en las heces, el cabello y las uñas en pequeñas cantidades durante largos períodos de tiempo. No provoca manifestaciones clínicas de toxicidad por arsénico. Es posible que los límites de exposición actuales no eviten el desarrollo de toxicidad crónica por la arsina (Hathaway et al, 1996). Se sabe muy poco sobre los efectos potenciales de la exposición crónica a la arsina (OIT, 1983). En casos de intoxicación ocupacional crónica se han desarrollado anemia grave, hemólisis, punteado basófilo de los glóbulos rojos y daño renal (ACGIH, 1991; HSDB, 2002). En la intoxicación crónica, además de anemia puede haber cefalea o dolor de cabeza, náuseas, vómitos, disnea o dificultad para respirar, parestesia de las extremidades e ictericia (Klimecki y Carter, 1995). Después de algunas semanas de exposición (3 horas/día), los animales de experimentación han desarrollado hemólisis y anemia (ACGIH, 1991). Varias dosis han provocado cambios en el peso del bazo y del hígado (RTECS, 2002). Estudios subcrónicos de catorce, 18 y 90 días en ratas, hámsteres y ratones revelaron cambios hematológicos, así como agrandamiento del hígado y el bazo, hiperplasia de la médula ósea y aumento de la actividad de la delta-amino-levulínico ácido deshidratasa, a niveles por

debajo de los límites de exposición actuales (Blair et al, 1990). La exposición repetida de 3 especies de roedores a la arsina entre 0,025 y 5 ppm durante 28 a 90 días produjo hematopoyesis extramedular y estasis biliar intracanalicular (Blair et al, 1990). Estos estudios son importantes porque sugieren efectos significativos de exposiciones repetidas a arsina en niveles por debajo del TLV actual (Klimecki & Carter, 1995) (HazardText, 2021e)(Micromedex, 2021d).

4.2.5.4 Rangos de toxicidad:

hh)Exposición letal mínima

Los límites de exposición industrial en el aire indican que las exposiciones superiores a 0,05 partes por millón (ppm) en el aire son potencialmente tóxicas y NIOSH considera que las concentraciones de 3 ppm en el aire son inmediatamente peligrosas para la vida o la salud (US DHHS, 1994). La exposición a concentraciones en el aire de arsina de 250 ppm es rápidamente fatal, las concentraciones en el aire vde 25 a 50 ppm durante 30 minutos pueden ser fatales y las concentraciones de 10 ppm pueden ser fatales en tiempos de exposición más largos (NIOSH, 1997) (HazardText, 2021e).

ii) Exposición máxima tolerada

Una concentración de mas de 0,05 partes por millón (ppm) en el aire es potencialmente tóxico. Los síntomas de intoxicación aparecen después de la exposición por inhalación a concentraciones de 0,5 ppm (Budavari y Blumetti, 1983). El umbral de olor de 0,5 ppm no se considera adecuado para proteger a los trabajadores en un entorno industrial, ya que las exposiciones en exceso de 0,05 ppm pueden considerarse tóxicas (OSHA, 1989).

jj) Clasificación cancerígena

Tabla 4-20 Clasificación carcinogénica - Arsina

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	referencia
ACGIH	Arsina	A4	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	Arsina	No evaluada bajo el programa de IRIS	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	Arsina	1	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	No listada	No listada	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	Arsina	Ca	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	No listada	No listada	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	No listada	-	(European Commission, 2000)

Fuente: Extraído de Arsina. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values:(HazardText, 2021e)

Definiciones:

ACGIH: (A4) No clasificable como carcinógeno humano: Agentes que causan preocupación de que podrían ser carcinógenos para los humanos pero que no pueden evaluarse de manera concluyente debido a la falta de datos. Los estudios in vitro o en animales no proporcionan indicaciones de carcinogenicidad que sean suficientes para clasificar al agente en una de las otras categorías.

EPA: (A) No listado

IARC: (1) El agente (o mezcla) es cancerígeno para los seres humanos. La circunstancia de exposición implica exposiciones que son cancerígenas para los seres humanos. Esta categoría se utiliza cuando existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en humanos. Excepcionalmente, un agente (o mezcla) puede incluirse en esta categoría cuando la evidencia de carcinogenicidad en humanos es menos que suficiente, pero hay evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales de experimentación y evidencia sólida en humanos expuestos de que el agente (o mezcla) actúa a través de un mecanismo relevante de carcinogenicidad.

NIOSH: (Ca) NIOSH considera que esta sustancia es un potencial carcinógeno ocupacional.

kk) Valores de referencia exposición aguda

Tabla 4-21 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria - arsina

Criterio de toxicidad	Concentración (ng/m ³)	Efecto crítico	Referencia
Acute Reference Exposure Level (REL)	200	Disminución del peso fetal en ratones	(OEHHA, 2014)
Short-Term Air Permitting Effects Screening Levels (ESLs)	3000	La toxicidad materna en ratas se documentó como estertores durante la exposición antes del apareamiento y la gestación en un estudio de varios días.	(TCEQ, 2011)

Fuente: Elaboración propia

II) Valores de referencia exposición crónica

Cancerígenos

No se encuentra información específica para efectos cancerígenos

No cancerígenos

Tabla 4-22 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: no cancerígenos - arsina

Criterio de toxicidad	Concentración asociada con riesgo (ng/m ³)	Efecto crítico	Referencia
inhalation Reference Concentration (RfC) i	50	Aumento de la hemólisis, morfología anormal de los eritrocitos y aumento del peso del bazo	(US-EPA, 1994)

 Fuente: Elaboración propia en base a EPA Risk Assessment Values for CAS7784-42-1.
 U.S. Environmental Protection Agency, 2011.

mm) Valores de toxicidad

Tabla 4-23 Valores de toxicidad arsina

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Concentración Letal 50 (LC50)	Perro - inhalación	350 mg/m ³ para 30 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Cabra -inhalación	1 mg/m ³ para 10 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Ratón -inhalación	250 mg/m ³ para 10 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Conejo -inhalación	650 mg/m ³ para 10 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Rata -inhalación	390 mg/m ³ para 10 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Obeja -inhalación	1 mg/m ³ para 10 m
Concentración letal mínima publicada (LCLo)	Gato -inhalación	150 mg/m ³ para 20 m
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Humano -inhalación	25 ppm para 30 m
		300 ppm para 5 m
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Primate -inhalación	600 mg/m ³ por 1 hora
Dosis letal 50 (LD50))	Gato - intraperitoneal	2 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50))	Cabra - intraperitoneal	3 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50))	Ratón - intraperitoneal	3 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50))	Conejo - intraperitoneal	2500 mcg/kg
Concentración tóxica mínima publicada (TCLo)	Humano - inhalación	3 ppm
		325 mcg/m ³

Fuente: Extraído de Arsina. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021e)

4.2.5.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

Tabla 4-24: Límites ocupacionales de exposición inhalatoria- arsina

Entidad	Descripción	Valor	Categoría carcinogénica
ACGIH	TLV-TWA	0,005 ppm 20.000 ng/m ³	A4 No clasificable como carcinógeno humano: Agentes que causan preocupación de que podrían ser carcinógenos para los humanos pero que no pueden evaluarse de manera concluyente debido a la falta de datos. Los estudios in vitro o en animales no proporcionan indicaciones de carcinogenicidad que sean suficientes para clasificar al agente en una de las otras categorías.
	TLV-STEL	No listado	
	TLV-Ceiling	No listado	
OSHA	8 hrs. TWA	0,05 ppm 200.000ng/m ³	-
	Concentración máxima aceptable	No listado	
NIOSH	TWA	No listado	Ca: NIOSH considera que esta sustancia es un potencial carcinógeno ocupacional
	STEL	No listado	
	Ceiling	2.000 ng/m ³ 15-minutos	
	IDLH	3.000.000 ng/m ³	
DS 594	LPP	180.000 ng/m ³	

Fuente: Workplace Standards extraído de Arsina. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Value (HazardText, 2021e)ars y Arsenic. Toxicology details (Micromedex, 2021b)

Nota:

- TLV-TWA: Umbral Límite-Media Ponderada en el Tiempo, es el valor límite ambiental publicado por la ACGIH; se definen como la "concentración media ponderada en el tiempo, para una jornada laboral normal de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas, a la que pueden estar expuestos casi todos los trabajadores repetidamente día tras día, sin efectos adversos".
- STEL: Límite de exposición a corto plazo. Concentración promedio ponderada en un tiempo de 15 minutos a la que trabajadores pueden estar expuestos hasta 4 veces al día con al menos 1 hora entre exposiciones sucesivas sin efectos adversos si no se supera el TLV-TWA.
- TLV-Ceiling: Nivel de concentración que no deben ser superados en ningún momento de la jornada de trabajo. Éstos pueden ser determinados como valores promediados para períodos de 15 minutos en los casos en que no sea factible una medida instantánea.
- IDLH: Concentración inmediatamente peligrosa para la vida o la salud. Según el NIOSH de EE. UU. Corresponde a la concentración máxima de exposición de la cual se puede escapar en treinta minutos sin ningún síntoma que impida el escape o efectos irreversibles para la salud.

4.2.5.6 Toxicocinética

nn) Absorción

La arsina es absorbida por inhalación (Stokinger, 1981)(Micromedex, 2021d). Los vapores, particularmente arsina y etil arsina, se difunden a través del saco pulmonar. Aproximadamente el 60% del gas arsina es absorbido por ratones expuestos a 0.025-2.5 mg / L por inhalación. En conejos, las concentraciones más altas se encontraron en hígado, pulmón y riñones. (PubChem, 2021).

oo) Distribución:

El arsénico se distribuye bien por todo el cuerpo, incluidos los glóbulos rojos, el hígado, los huesos, la piel, las vísceras, el cabello y las uñas (Stokinger, 1981) (Micromedex, 2021d).

pp) Metabolismo

La exposición crónica a la arsina puede resultar en excreción de arsénico en la orina con el tiempo. Una pequeña cantidad puede excretarse como trimetilarsina (Stokinger, 1981) (Micromedex, 2021d). Después de la inhalación de arsina y la conversión a As (III), el metabolismo del arsénico incluye metilación y la excreción urinaria siguió un modelo trifásico con períodos de 28 horas, 59 horas y 9 días(PubChem, 2021).

qq) Excreción

RIÑÓN: El arsénico se excreta en la orina en pequeñas cantidades durante un período prolongado y en las heces en pequeñas cantidades durante un largo período de tiempo. También una pequeña cantidad de arsina puede excretarse en el pulmón como trimetilarsina, en el cabello y las uñas durante un período prolongado (Stokinger, 1981) (Micromedex, 2021d).

4.2.5.7 Mecanismo de acción

HEMÓLISIS - Basado en estudios en ratones, Blair et al, 1990a, propusieron que el mecanismo de hemólisis de glóbulos rojos inducida por gas arsina se debe a la depleción de glutatión intracelular dentro del eritrocito. Este estudio también demostró que la hemoglobina se oxida a metahemoglobina con la formación de cuerpos de Heinz. El resultado final es la oxidación de los grupos sulfhidrilo en la hemoglobina y posiblemente en las membranas de los glóbulos rojos, lo que conduce a la inestabilidad de la membrana y a una rápida hemólisis intravascular masiva. Winski, et al, 1997 No se observó una reducción de glutatión y disulfuro de glutatión en los glóbulos rojos humanos in vitro. Se postuló un mecanismo alternativo que involucra una interacción directa arsina-hemoglobina formando metabolitos de arsénico que causan alteración directa de la membrana celular de los eritrocitos.

Los mecanismos de toxicidad de la arsina (AsH₃) no se comprenden completamente. Se realizaron estudios para determinar la toxicidad de AsH₃ y arsenito (As (III)) en una línea celular epitelial tubular renal para modelar la disfunción renal causada por la exposición a AsH₃. La hipótesis fue que el As (III) es el metabolito tóxico responsable de la toxicidad renal del AsH₃. Hubo una respuesta tóxica dependiente de la concentración y el tiempo después de la incubación con As (III). El As (III) produjo una fuga significativa de LDH tan pronto como 1 hora y una pérdida de potasio intracelular a las 5 horas. AsH₃ no produjo cambios en estos parámetros. El AsH₃ no afectó ni a los niveles de potasio ni a los de LDH durante 24 horas y hasta una concentración de AsH₃ de 1 mM. En este sistema, el As (III) indujo una fuga de LDH antes de la pérdida de K⁺. También se estudiaron los efectos de toxicidad similar al estrés oxidativo determinando los niveles de glutatión (GSH), glutatión disulfuro (GSSG) y proteína de choque térmico 32 (Hsp32). Los niveles de GSH no se vieron afectados notablemente por ningún arsénico durante un período de 6 horas o hasta una concentración de 100 microM del arsénico. Sin embargo, 100 microM de AsH₃ aumentaron significativamente los niveles de GSSG a los 30 minutos y alcanzaron un máximo a las 2,5 horas. La incubación con 10 microM de AsH₃ fue suficiente para aumentar significativamente los niveles de GSSG. Como (III) no tuvo un efecto marcado sobre GSSG. Ambos compuestos arsenicales (50 microM) produjeron un ligero aumento (aproximadamente tres veces) en los niveles de Hsp32 después de 4 horas de incubación. Estos resultados mostraron que el AsH₃ inalterado producía efectos tóxicos similares al estrés oxidativo sin producir muerte celular. Sin embargo, concentraciones similares de As (III) indujeron la respuesta al estrés y fueron tóxicas para las células. Estos datos indicaron que AsH₃ no es directamente tóxico para las células LLC-PK1 (PubChem, 2021).

La hemoglobina (Hb) se ha reconocido desde hace mucho tiempo como un componente necesario del mecanismo general de la hemólisis inducida por AsH₃. Un estudio investigó el papel de la Hb en la hemólisis inducida por AsH₃. El propósito era determinar si la exposición a AsH₃ alteraba la estructura de los componentes hemo o globina de la Hb. Se incubó arsina con oxihemoglobina (oxyHb) y carboxihemoglobina (carboxiHb) humanas aisladas, y se examinaron la liberación de hemo y la formación de modificaciones de hemoglobina inducidas por AsH₃. La arsina aumentó la cantidad de hemo liberado por oxyHb en un 18%. Cuando se incubó carboxiHb con AsH₃, no hubo cambios en la liberación de hemo, lo que sugiere que la sexta posición del ligando en el hierro hemo puede ser crítica en la interacción con AsH₃. Las interacciones arsina-Hb se estudiaron mediante análisis espectral de masas de hemo, globina de cadena alfa y globina de cadena beta. La arsina no tuvo un efecto significativo en los espectros LCMS de cadena alfa o beta en oxyHb y carboxiHb, pero en oxyHb, la arsina aumentó constantemente la frecuencia de pérdida de fragmentos de iones acetato de metilo desde la hemo (.CH₂OOH, m/z = 59) en la matriz de espectrometría asistida laser de desorción/ionización masa (MALDI-MS). La formación de enlaces cruzados de proteína Hb se investigó mediante transferencia Western usando un anticuerpo anti-Hb en membranas aisladas de eritrocitos tratados con AsH₃, pero no se encontraron aductos de membrana Hb. Estos resultados sugieren que la interacción entre AsH₃ y hemoglobina da como resultado un aumento en la liberación de hemo que puede contribuir al mecanismo hemolítico de AsH₃ (PubChem, 2021).

El gas arsina es un agente hemolítico indirecto debido a su inhibición de la catalasa de los eritrocitos, lo que conduce a la acumulación de peróxido de hidrógeno que a su vez destruye la membrana de los eritrocitos. La actividad hemolítica de la arsina se debe a su capacidad para disminuir/reducir el contenido de glutatión (PubChem, 2021).

El mecanismo de la intoxicación por arsina es la hemólisis intravascular rápida. Esto puede deberse a la unión de la arsina a la hemoglobina, con la posterior liberación intraeritrocítica de arsénico elemental, o la reacción de la arsina con grupos sulfhidrilo en las enzimas respiratorias de los eritrocitos. La hemólisis intravascular conduce a la reducción observada de la hemoglobina y del hematocrito, al aumento de la hemoglobina sérica y de la bilirrubina de reacción directa y a la hemoglobinuria. Al parecer, la insuficiencia renal se debe a la precipitación de hemoglobina en los túbulos renales. Los túbulos necróticos con cilindros de hemoglobina se observan de manera característica en la autopsia en casos fatales de intoxicación por arsina. La arsina puede tener un efecto tóxico directo sobre los riñones (PubChem, 2021).

Los mecanismos de la hemólisis de la arsina parecen implicar la oxidación de la arsina a arsenito in vivo con la posterior inhibición de las enzimas que contienen sulfhidrilo. Los estudios sobre los efectos directos de la arsina en cortes de hígado y riñón han demostrado que la respiración del tejido (PubChem, 2021).

4.3 Coeficientes de riesgo identificados

El Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) es el límite superior de la probabilidad de que una persona va a contraer cáncer (ya sea tratable o letal) durante su vida entera, entre todas las personas expuestas de por vida (70 años) a una concentración promedio de un contaminante, y por encima de la probabilidad basal normal de contraer cáncer. El riesgo extra se atribuye a una causa específica. Se denomina riesgo “extra” de cáncer porque es un riesgo asociado al problema de contaminación, y por lo tanto es “extra” o “adicional” al riesgo normal basal de cáncer que tiene cada persona determinada o específica (US-EPA, n.d.).

La estimación del RECV para sustancias cancerígenas por la vía de inhalación, se lleva a cabo usando las concentraciones en el aire de la sustancia cancerígena y el criterio de toxicidad que en este caso corresponde el Riesgo Unitario Inhalatorio (IUR⁵³ por su sigla en inglés)

A continuación, se presentan los niveles encontrados de riesgo unitario inhalatorio, con las concentraciones asociadas a 3 distintos niveles de riesgo: a 1 persona en 1 millón, 1 persona en 100.000 y 1 persona en 10,000, respectivamente.

⁵³ El riesgo unitario inhalatorio (IUR) es la estimación cuantitativa en términos de riesgo por volumen de aire respirado expresado generalmente en unidades de ug/m³ de la sustancia cancerígena. (US-EPA, 1994)

Tabla 4-25 Coeficientes de riesgo asociados a efectos cancerígenos

Criterio de toxicidad Inhalation Unit Risk (IUR) (por ng/m ³)	Concentración asociada con riesgo de 1 en 1.000.000 (ng/m ³)	Concentración asociada con riesgo de 1 en 100.000 (ng/m ³)	Concentración asociada con riesgo de 1 en 10.000 (ng/m ³)	Efecto crítico	Fuente
4,3e-6	0,2	2,3	23,3	Cáncer pulmonar	(US-EPA, 2011)
3,3e-6	0,3	3,0	30,3	Cáncer pulmonar	(CARB, 1990)
0,2e-6	6,7	66,7	666,7	Cáncer pulmonar	TCEQ (Erraguntla et al., 2012)
0,7e-6	1,4	14,3	142,9	Cáncer pulmonar	Netherlands (Dutch Expert Committee on Occupational Safety, DECOS) (Lewis et al., 2015)
1,5e-6	0,7	6,7	66,7	Cáncer pulmonar	WHO Air Quality Guidelines for Europe.

Fuente: Elaboración propia

5. Relación entre emisión y concentración de arsénico en el aire

5.1 Metodología de estimación de relación entre emisión y concentración

La presente sección introduce la metodología para la estimación de la concentración de arsénico en ambiente a partir del inventario de emisiones procedentes de cada fuente de emisión reportada por cada planta en el presente estudio.

Respecto a la metodología para proyectar las emisiones de cada uno de los escenarios evaluados, se considera, según los resultados previos otorgados por los antecedentes técnicos, el siguiente protocolo:

- Escenario línea base de emisiones: Levantamiento de información respecto a las operaciones unitarias en cada planta y sus fuentes de emisión atmosféricas asociadas.
- Caracterización de las fuentes de emisión: geolocalización, dimensiones.
- Cálculo de las tasas de emisión por fuente.
- Evaluación de los niveles de concentración de arsénico mediante la aplicación del modelo de dispersión atmosférica Calpuff específico en los receptores discretos seleccionados con la contraparte técnica.

Para realizar el estudio de dispersión atmosférica de calidad del aire se sigue el procedimiento recomendado por el SEIA representado en la Figura 5-1.

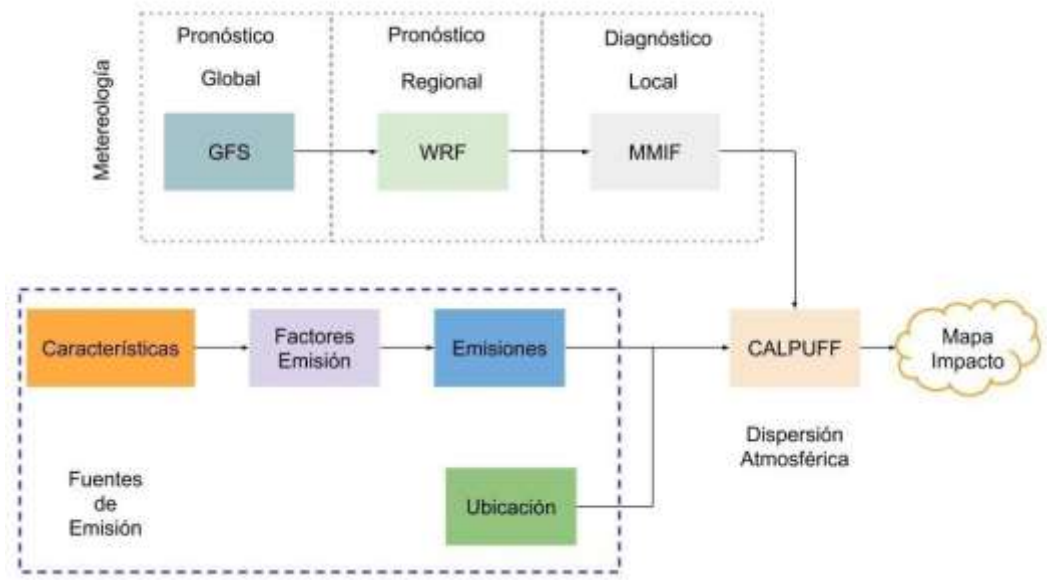


Figura 5-1 Diagrama de flujo de información meteorológica numérica y fuentes de emisión atmosféricas para la modelación de las emisiones atmosféricas según el SEIA.

Fuente: Elaboración propia.

La elaboración del estudio de dispersión atmosférica de las emisiones procedentes de cada planta se compone de las siguientes etapas descritas a continuación:

- **Modelización meteorológica:** obtener los campos escalares y vectoriales que definen el estado atmosférico desde una escala global hasta local (*downscaling*).
- **Validación meteorológica:** analizar el grado de validez de los resultados numéricos obtenidos contrastándolos con la red de monitoreo superficial disponible del SINCA. Como producto, se analizarán los sesgos que pudiesen ocurrir dentro del dominio de simulación para posteriormente interpretar con mayor certeza los impactos obtenidos mediante Calpuff.
- **Caracterización de las plantas:** definir todas las fuentes de emisión atmosféricas, su ubicación, régimen de operación mensual y tasas de emisión como datos de entrada a Calpuff.
- **Proyección de emisiones y análisis de incertidumbre asociado a las emisiones de arsénico procedentes de cada planta:** evaluar los niveles de concentración en inmisión, contrastando con las mediciones informadas en cada estación de monitoreo disponible dentro del dominio de simulación.

Según los resultados indicados en la Sección 3.2, la mayor parte (sobre el 99%) de las emisiones son generadas por las fundiciones de cobre, por lo cual se desarrolló la metodología a partir de dichos datos. Sin embargo, se destaca que la metodología desarrollada puede ser aplicada a cualquier fuente de emisión atmosférica de arsénico.

5.1.1 Modelización meteorológica

En lo referente a los estudios realizados al amparo de esta licitación, se ejecutará la pasada de WRF para un año de datos inicializado a partir de los datos de reanálisis FNL *del National Centers for Environmental Prediction ds083.3* (NCEP⁵⁴). El año base de datos meteorológico utilizado se corresponde con el más reciente terminado, es decir, el año 2020, el cual también corresponde al año en donde todas las fundiciones cuentan con avance suficiente en sus instalaciones para cumplir con el DS 28/2013. De este modo, y partiendo de condiciones a escala sinóptica del NCEP, se seguirá un patrón de cuatro dominios anidados hasta obtener 1 dominio de alta resolución (1 km²) sobre las zonas de estudio.

La configuración de los dominios de WRF se realizará conforme a las recomendaciones de la Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA (2012)⁵⁵, teniendo en cuenta los dominios espaciales de modelación y el siguiente conjunto de parametrizaciones físicas:

Dominio:

- Resolución horizontal: 27.000 m, 9.000 m, 3.000 m y 1.000 m.
- Niveles verticales: 44.
- Proyección del Mapa: Lambert Conformal Conic.

Física:

⁵⁴ <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/#!description>

⁵⁵ https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/namelist.input

- Esquema de radiación: Goddard (onda corta) y RRTM (onda larga).
- Modelo del suelo: Difusion 5 layer scheme.
- Tratamiento de capa superficial: Monin-Obukhov Similaridad.
- Parametrización de la Capa Límite: QNSE
- Esquema de convección: Kain-Fritsch.
- Microfísica de nubes y precipitación: WSM (3 especies microfísicas).
- Parametrización de turbulencia: Smagorinsky (primer orden).

5.1.1.1 Dominios de simulación WRF

La configuración de los dominios WRF se corresponde a un anidado de 4 dominios con las siguientes características:

- dx, dy: resolución horizontal en km.
- nx, ny: número de nodos horizontales.
- Lx, Ly: extensión del dominio horizontal en km.

Tabla 5-1 Características dominios WRF

ID	dx (km)	dy (km)	nx	ny	Lx (km)	Ly (km)
d01	27	27	91	91	2.457	2.457
d02	9	9	91	91	819	819
d03	3	3	88	88	264	264
d04	1	1	82	82	82	82

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se presenta el anidamiento utilizado de acuerdo con las características anteriores descritas en la Tabla 5-1:

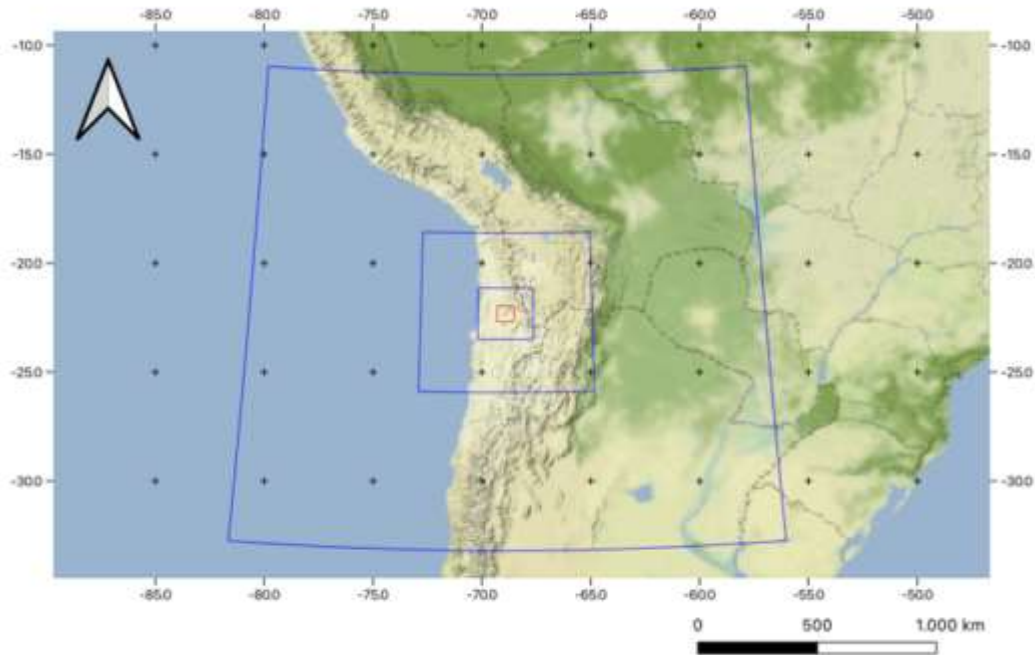


Figura 5-2 Anidado de cuatro dominios WRF utilizado para cada una de las ubicaciones correspondientes a las 8 plantas

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en las siguientes figuras se indican los dominios internos de 1 km de resolución, incluyendo las fuentes de emisión atmosféricas, estaciones de monitoreo de calidad del aire con datos de arsénico definidos para cada dominio de estudio de norte a sur, el detalle de estos se indica en la Sección 5.1.3.

La selección de los puntos de interés (receptores discretos) se desarrolló según la información disponible en la Biblioteca del Congreso Nacional, donde cada punto de interés corresponde a un centroide de las áreas urbanas según esta fuente de datos.

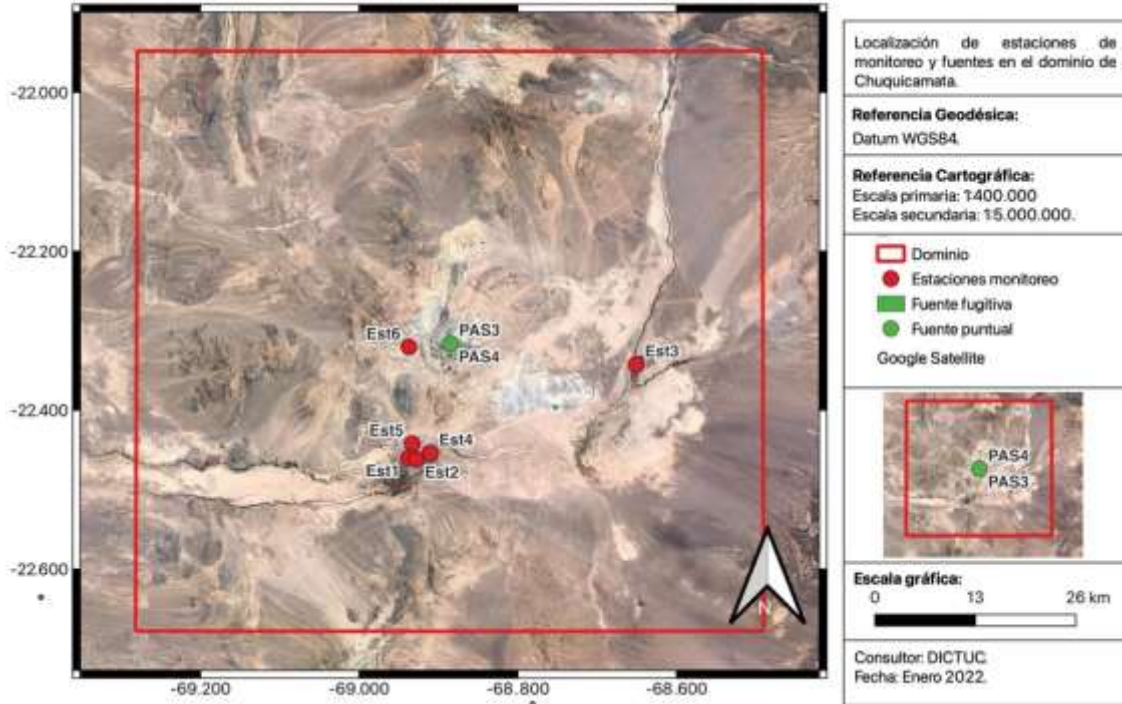


Figura 5-3 Dominio – Fundición Chuquicamata

Fuente: Elaboración propia

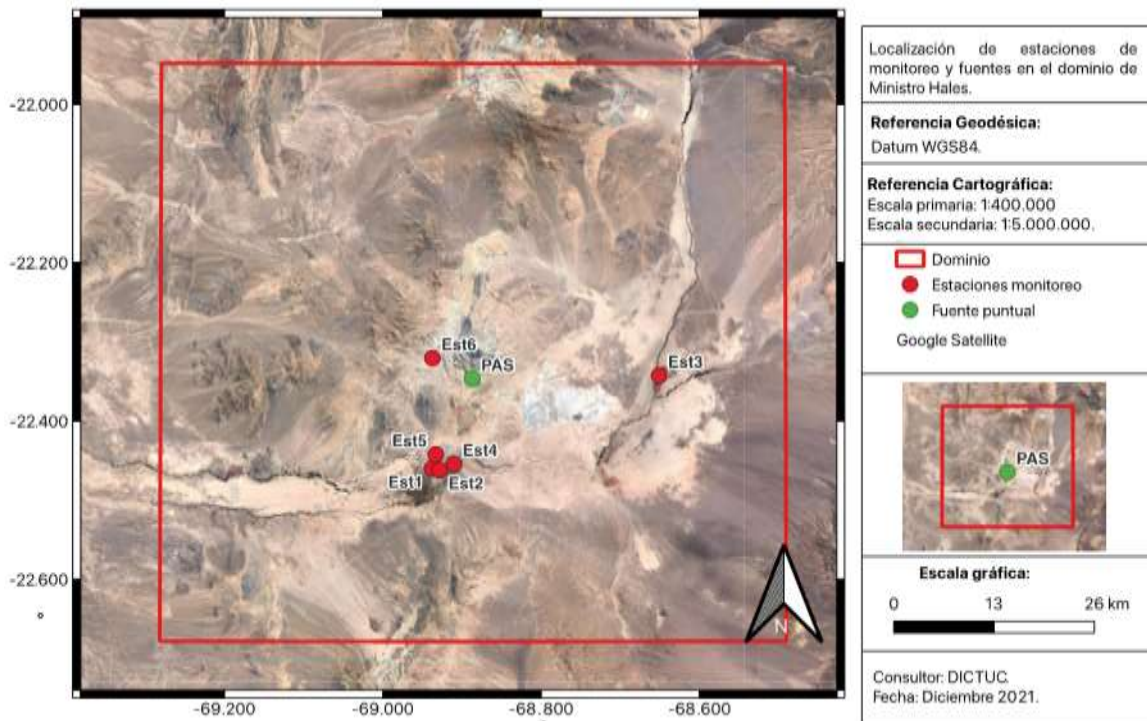


Figura 5-4 Dominio – Planta Tostación Ministro Hales

Fuente: Elaboración propia

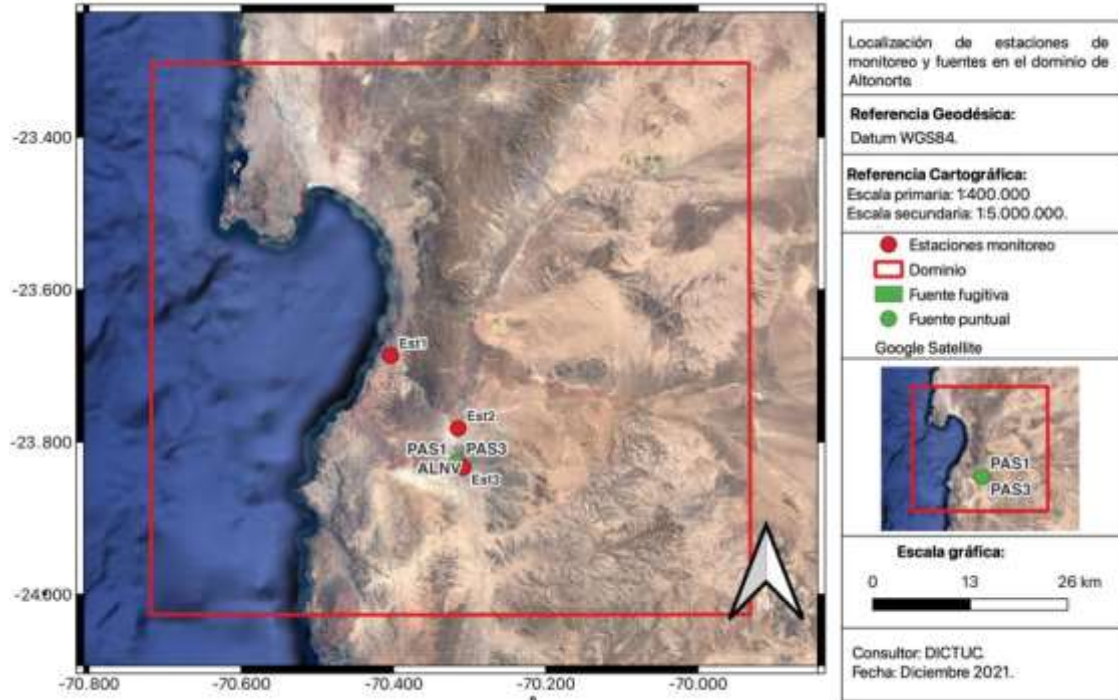


Figura 5-5 Dominio – Fundición Altonorte

Fuente: Elaboración propia

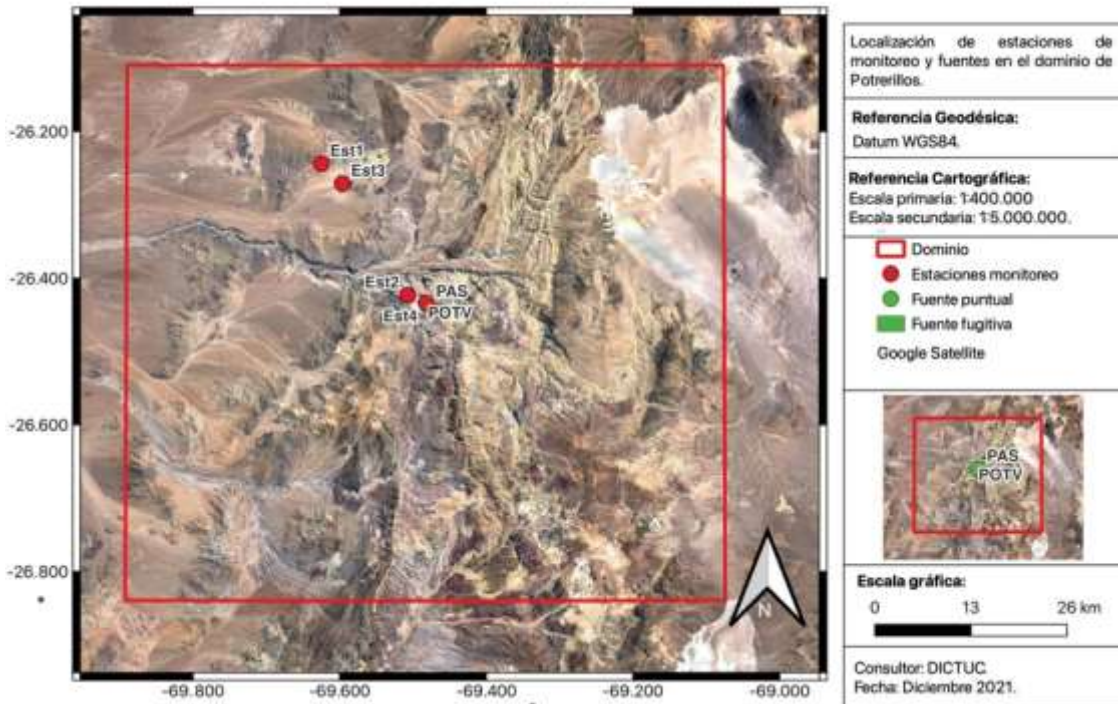


Figura 5-6 Dominio – Fundición Potrerillos

Fuente: Elaboración propia

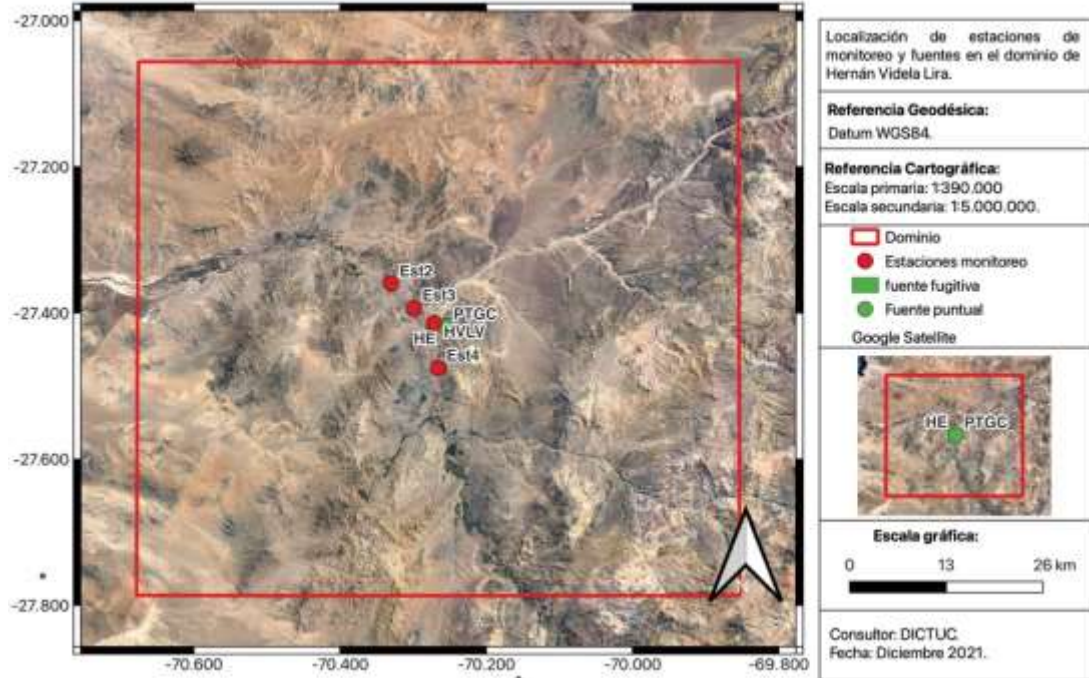


Figura 5-7 Dominio – Fundación Hernán Videla Lira

Fuente: Elaboración propia

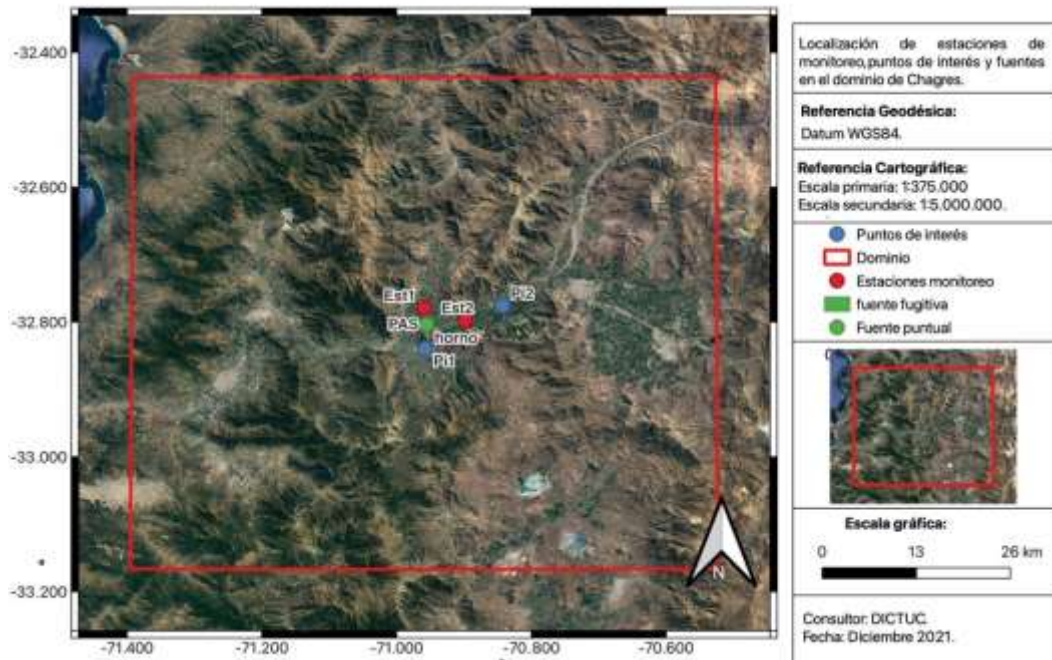


Figura 5-8 Dominio – Fundación Chagres

Nota: Los puntos de interés corresponden a los centroides de las áreas urbanas, Llayllay (Pi1) y Panquehue (Pi2), determinados según la información disponible en la Biblioteca del Congreso Nacional. Ver Sección 5.1.4.

Fuente: Elaboración propia

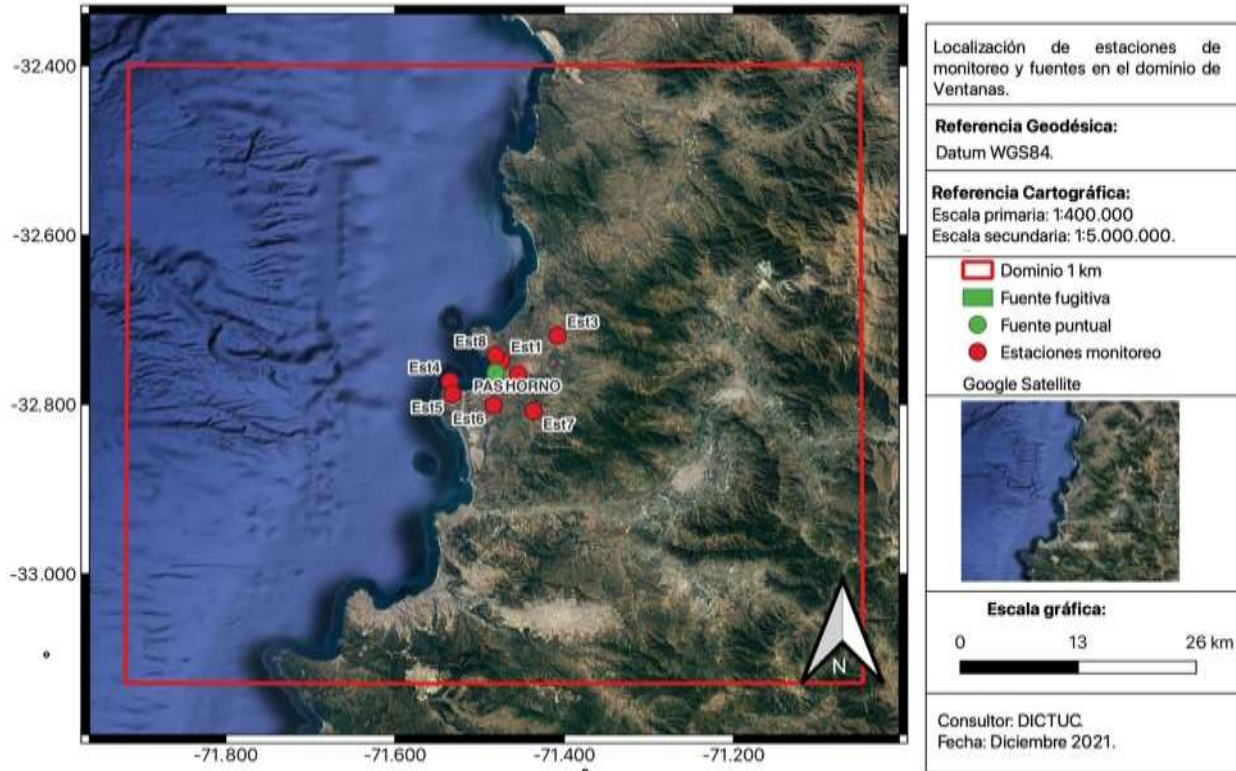


Figura 5-9 Dominio – Fundición Ventanas

Fuente: Elaboración propia

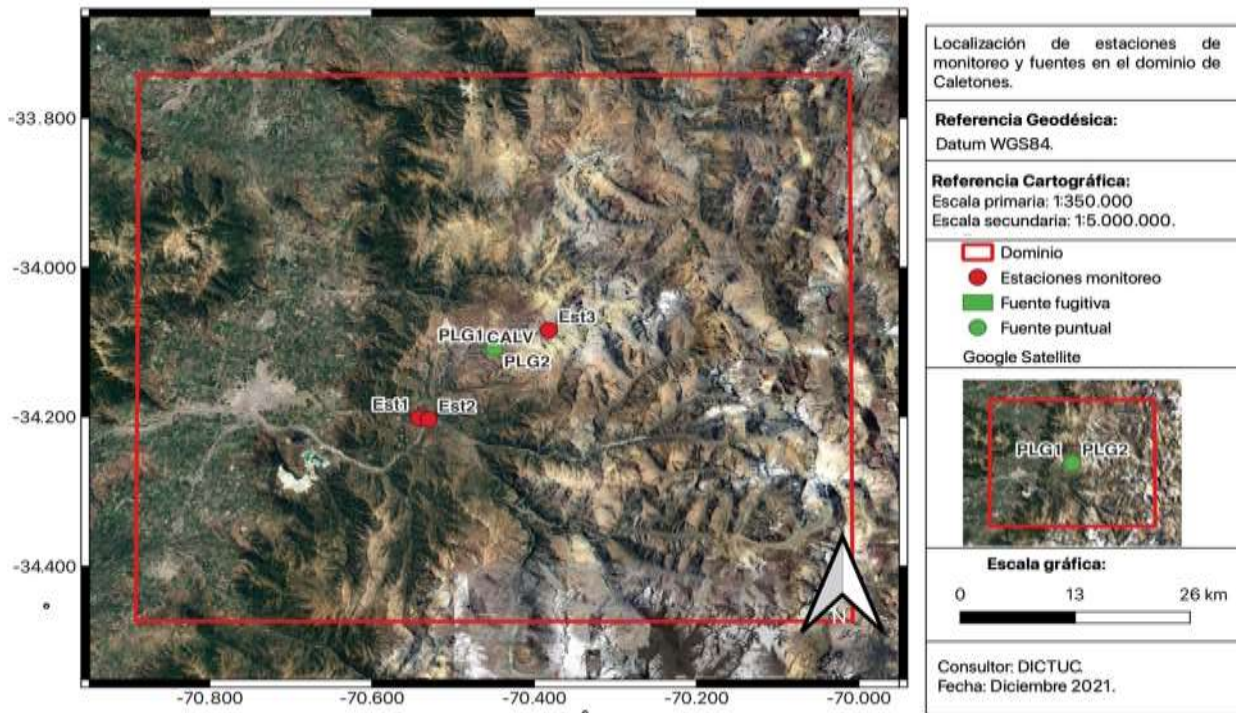


Figura 5-10 Dominio – Fundición Caletones

Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Validación de modelo meteorológico WRF con red de monitoreo nacional

La modelación de la dispersión atmosférica de arsénico se utilizará como una herramienta para establecer la relación entre la emisión procedente de las diferentes fuentes de emisión y el nivel de concentración en los receptores discretos en el entorno de las plantas.

Es por este motivo que el equipo consultor considera de alta relevancia la comprensión de las fuentes de incertidumbre, su efecto sobre los resultados y, donde sea posible, reducir dicha incertidumbre, minimizando así las posibles fuentes de error en el análisis posterior.

Para el presente estudio se considera para cada uno de los dominios de simulación donde se emplaza cada planta un año de datos meteorológicos, correspondientes al periodo de 01-01-2020 a 01-01-2021, obtenidos a partir de la aplicación del modelo de pronóstico WRF.

Con el objetivo de poder aplicar de manera fehaciente y evaluar el grado de incertidumbre asociado como únicos datos de entrada meteorológicos los proporcionados por la modelación numérica de WRF, se analizará el grado de validez de los resultados obtenidos por el modelo WRF contra las estaciones meteorológicas de observación de la red de monitoreo disponible en cada dominio. En las siguientes tablas se detallan los criterios estadísticos de bondad del comportamiento del modelo WRF, así como la descripción de cada una de las variables utilizadas.

Tabla 5-2 Criterios estadísticos para evaluar el grado de validez de los resultados obtenidos por el modelo WRF

Variable Meteorológica	Variable Estadística	Criterio de Validez
Velocidad Viento (u10)	RMSE	$\leq 2\text{m/s}$
	BIAS	$\leq \pm 0,5\text{ m/s}$
	IOA	$\geq 0,6$
Dirección Viento (°)	MAE	$\leq 30^\circ$
	BIAS	$\leq \pm 10^\circ$
Temperatura Superficial (2 m)	MAE	$\leq 2\text{K}$
	BIAS	$\leq \pm 0,5\text{K}$
	IOA	$\geq 0,8$
Humedad	BIAS	$\leq \pm 1\text{ g/kg}$
	MAE	$\leq 2\text{ g/kg}$
	IOA	$\geq 0,6$

Fuente: (Emery et al., 2017)

De la Tabla 5-2:

- RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.
- BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos. Proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, cuantifica el error sistemático del modelo.
- IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

- MAE es el error absoluto medio. Las ecuaciones de cálculo de estos índices se presentan más adelante.

Tabla 5-3 Criterios de tolerancia de diferencia absoluta de variables modeladas

Variable Meteorológica	Criterio
Velocidad del viento	2,57 m/s
Dirección del viento	20°
Temperatura de rocío	1°C en superficie.
Temperatura	1°C en superficie.

Fuente: (Yáñez-Morroni, Gironás, Caneo, Delgado, & Garreaud, 2018)

Donde,

$$\begin{aligned}
 BIAS &= \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (P_j^i - O_j^i) \\
 MAE &= \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I |P_j^i - O_j^i| \\
 NMAE &= \frac{1}{IJ} \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I |P_j^i - O_j^i|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I |O_j^i|} \\
 RMSE &= \sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (P_j^i - O_j^i)^2} \\
 NMSE &= \frac{\sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (P_j^i - O_j^i)^2}}{\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I O_j^i} \\
 IOA &= 1 - \frac{IJ \cdot RMSE^2}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I |P_j^i - M_o| + |O_j^i - M_o|}
 \end{aligned}$$

Ecuación 8

Siendo,

- j : observación en un tiempo determinado.
- i : lugar de observación.
- J : número total de observaciones temporales.
- I : número total de lugares de observación.
- O : variable observada/medida.
- P : variable predicha por el modelo WRF.
- M_o : valor promedio de las observaciones.

Por otro lado, se realizará un análisis de la variación de los parámetros estadísticos normalizados, de manera adicional, para los resultados obtenidos de la concentración de arsénico modeladas.

Este análisis permitirá evaluar el grado de bondad de la simulación de calidad del aire en función de la distancia referente a las fuentes de emisión de cada dominio. Esto se desarrolla en la sección 5.2.1.

5.1.3 Definición de las estaciones de monitoreo de calidad del aire

Para cada dominio se seleccionaron las estaciones de monitoreo del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) indicadas en la Tabla 5-4. Los criterios utilizados para esta selección fueron:

- Estaciones de monitoreo SINCA dentro del dominio de estudio, definido para cada fundición y planta descrito en la Sección 5.1.1.1
- Con datos disponibles de medición de arsénico para el año 2020.

Tabla 5-4 Estaciones de monitoreo por dominio de estudio

Dominio	ID	Nombre	Coordenadas UTM		Distancia a la fuente (m)	Altura (m.s.n.m)
			Este (m)	Norte (m)		
Chuquicamata y Ministro Hales	Est1	Estación CD 23 marzo	506.399	7.516.241	16.826	2.255
	Est2	Estación Centro Calama	507.389	7.516.053	16.710	2.267
	Est3	Estación Nueva ChiuChiu	535.952	7.529.229	24.298	2.529
	Est4	Estación Hospital El cobre	509.239	7.516.917	15.476	2.301
	Est5	Estación CPVK	506.893	7.518.227	14.739	2.266
	Est6	Estación Aukahuasi	506.480	7.531.697	5.378	2.717
Altonorte	Est1	Estación Coviefi	356.847	7.379.757	17.845	182
	Est2	Estación Inacal	366.001	7.369.267	3.680	427
	Est3	Estación Sur	366.690	7.363.604	1.106	502
Potrerillos	Est1	Estación Cine Inca	437.589	7.097.133	25.686	2.257
	Est2	Estación CAP	449.439	7.077.320	2.995	2.657
	Est3	Estación Intelec	440.479	7.094.145	21.585	2.390
	Est4	Estación Doña Inés	451.936	7.076.158	260	2.860
Hernán Videla Lira	Est1	Estación Paipote	374.322	6.967.116	1.510	448
	Est2	Estación Copiapó	368.470	6.972.981	9.673	387
	Est3	Estación San Fernando	371.592	6.969.334	4.961	421
	Est4	Estación Tierra Amarilla	374.935	6.960.255	6.395	462
Chagres	Est1	Estación Catemu	316.512	6.371.481	2.738	451
	Est2	Estación Lo Campo	322.275	6.369.529	5.440	464
Ventanas	Est1	Estación La Greda	268.185	6.373.910	1.694	16
	Est2	Estación Los Maitenes	270.073	6.372.171	2.483	41
	Est3	Estación Puchuncaví	274.317	6.377.316	8.368	45
	Est4	Estación Quintero	262.526	6.371.081	5.224	71
	Est5	Estación Quintero Centro	262.853	6.369.407	5.575	38
	Est6	Estación Sur	267.461	6.368.037	4.289	71

Dominio	ID	Nombre	Coordenadas UTM		Distancia a la fuente (m)	Altura (m.s.n.m)
			Este (m)	Norte (m)		
Caletones	Est7	Estación Valle Alegre	271.889	6.367.413	6.518	28
	Est8	Estación Ventanas	267.539	6.374.613	2.283	56
	Est1	Estación Coya Club	357.944	6.214.431	13.368	965
Caletones	Est2	Estación Coya Población	359.047	6.214.212	12.775	809
	Est3	Estación Sewell	372.504	6.227,642	6.818	2.184

Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Determinación de puntos de interés de estudio

En paralelo, se determinaron 2 puntos de interés para el dominio Chagres, correspondientes a las comunas de Llayllay y Panquehue, dado que ambas localidades a pesar de ser representativas no contaban con estaciones de monitoreo de calidad del aire.

Tabla 5-5 Puntos de interés por dominio de estudio

Dominio	ID	Nombre	Coordenadas UTM		Distancia a la fuente (m)	Altura (m.s.n.m)
			Datum WGS 84 Huso 19			
			Este (m)	Norte (m)		
Chagres	Pi1	Llayllay	316.785	6.364.770	4.015	387
	Pi2	Panquehue	327.433	6.372.066	11.101	508

Fuente: Elaboración propia

En los anexos del estudio (Sección 10.6) se presentan las Figuras con los puntos de interés y estaciones para cada uno de los dominios.

5.1.5 Determinación de la relación emisión-concentración

Según la Guía Metodológica para Para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire, existen diferentes modelos disponibles para estimar los cambios en concentración de contaminantes como consecuencia de un cambio en las emisiones. Entre estos se encuentran los modelos de aproximación que permiten determinar la relación entre emisiones de contaminantes primarios y concentraciones resultantes de contaminantes primarios, como en este caso el arsénico.

En estos modelos se puede suponer una relación lineal entre las emisiones de un contaminante y la concentración resultante ambiental que genera, lo que permite definir los factores emisión-concentración (FEC). Este se basa en la existencia de una relación lineal en emisión-concentración, como se muestra en la siguiente figura, donde la línea azul muestra la relación teórica entre emisión y concentración. Si se asume que la variación en la concentración es pequeña en comparación con la situación base, el error que se comete asumiendo la relación lineal (línea roja) es aceptable para casos en que no exista mayor información.

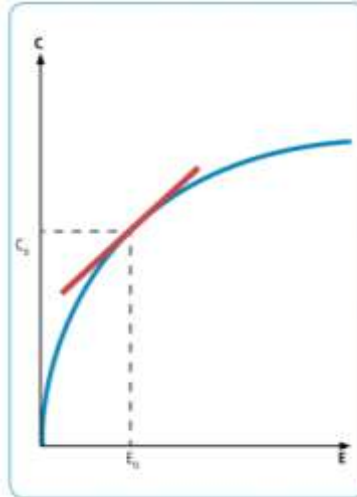


Figura 5-11 Supuesto de la relación lineal entre emisiones y concentraciones

Fuente: Guía Metodológica para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire (MMA, 2013b)

Considerando este tipo de modelos, para obtener la relación entre los niveles de emisión procedentes de una fuente de emisión atmosférica y la concentración obtenida en un punto del espacio concreto se puede recurrir a la ecuación de advección-difusión-reacción:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \vec{u} C = \nabla \vec{K} \nabla C + \vec{S}_c$$

Ecuación 9

En la ecuación anterior se formulan los diferentes fenómenos que afectan a la cantidad de materia del compuesto en un volumen de control, o concentración C : $\nabla \vec{u} C$ advección, $\nabla \vec{K} \nabla C$ difusión, \vec{S}_c emisión y/o sumidero-reacción.

La ecuación del balance de materia anterior no cuenta con una solución general, pero si se aplican algunas simplificaciones e hipótesis se puede encontrar una solución analítica particular como en el caso del modelo Calpuff⁵⁶:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot g \cdot \exp\left[\frac{-d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] \cdot \exp\left[\frac{-d_c^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

⁵⁶ http://www.src.com/CALPUFF/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf

Ecuación 10

Donde,

C : Nivel de concentración (g/m^3)

Q : Masa de contaminante (g) en el puff

σ_x : Desviación estándar (m) de la distribución gaussiana en el eje x.

σ_y : Desviación estándar (m) de la distribución gaussiana en el eje y.

σ_z : Desviación estándar (m) de la distribución gaussiana en el eje z.

d_a : Distancia del centro del puff al receptor en la dirección del viento dominante.

d_c : Distancia del centro del puff al receptor en la dirección axial.

g : Término vertical de la ecuación gaussiana.

H : Altura efectiva del centro del puff sobre el suelo.

h : Altura de la capa de mezcla.

En la expresión anterior se puede observar que el caudal másico de emisión del contaminante (Q) presenta una relación lineal sobre la concentración en cualquier lugar del espacio (C). Dado lo anterior, se puede establecer una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión del siguiente modo:

$$FEC_{ij} = \left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial E_j} \right)^{-1}$$

$$C_{ij} = \frac{E_j}{FEC_{ij}}$$

Ecuación 11

El factor de concentración indicado en la Ecuación 11 corresponde a concentración modelada (Cm_{ij}), por lo tanto, para análisis posteriores, se definirá como:

$$Cm_{ij} = \frac{E_j}{FEC_{ij}}$$

Ecuación 12

Donde,

Cm_{ij} : concentración modelada en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

E_j : caudal de emisión másico anual procedente de la fuente j (ton As/año).

FEC_{ij} : factor emisión-concentración en el receptor i debido a la emisión de la fuente j (ton As· $\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$).

i : receptor.

j : fuente de emisión.

En los datos registrados en las estaciones del SINCA se plantea la hipótesis de que pueda existir una concentración de fondo o nivel basal, por el efecto de la resuspensión de material particulado

depositado sobre el suelo (ver sección 5.2.2). Este nivel basal, denominado β , genera un aporte adicional constante en la variación de la concentración observada, como indican las siguientes relaciones.

$$Co_i = \overline{Co}_i + \beta_i$$

Ecuación 13

$$Co_i = \sum_{j=1}^N \overline{Co}_{ij} + \beta_i$$

Ecuación 14

Donde,

Co_i : concentración observada en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

\overline{Co}_i : concentración observada debida a la variación de las emisiones totales en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

β_i : concentración o nivel basal en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

\overline{Co}_{ij} : concentración observada debida a la variación de las emisiones de la fuente j en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

N : número de fuentes j

i : receptor.

j : fuente de emisión.

Por lo que, se agrega este concepto a la metodología de cálculo del FEC, por medio del factor de corrección (FC'_{ij}) el cual disminuirá el sesgo entre los resultados modelados y los medidos en cada receptor. Ante esto, se define al factor de corrección como:

$$FC'_{ij} = \frac{Cm_{ij}}{\overline{Co}_{ij}}$$

Ecuación 15

Donde,

Cm_{ij} : concentración modelada en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

\overline{Co}_{ij} : concentración observada debida a la variación de las emisiones de la fuente j en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

FC'_{ij} : factor de corrección en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$).

i : receptor.

j : fuente de emisión.

Por su parte, se asume que la variable concentración observada para cada receptor ($\overline{C_{o_i}}$) indicada en la Ecuación 14, se distribuye según el aporte de cada fuente de emisión (j) como se expresa en la siguiente relación:

$$\overline{C_{o_{ij}}} = \sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot \overline{C_{o_i}}$$

Ecuación 16

Donde,

$\overline{C_{o_{ij}}}$: concentración observada debida a la variación de las emisiones de la fuente j en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

$\overline{C_{o_i}}$: concentración observada debida a la variación de las emisiones totales en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

d_{ij} : razón de distribución de la concentración modelada receptor i debido a la emisión de la fuente j

N : número de fuentes j

i : receptor.

j : fuente de emisión

Esta razón de distribución (d_{ij}) se asume equivalente a la distribución de las concentraciones modeladas, como se indica en la Ecuación 17.

$$d_{ij} = \frac{Cm_{ij}}{Cm_i}$$

Ecuación 17

Donde,

d_{ij} : razón de la concentración modelada receptor i debido a la emisión de la fuente j

Cm_{ij} : concentración modelada en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Cm_i : concentración modelada en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

i : receptor.

j : fuente de emisión

Siguiendo la definición de Factor de Corrección en el receptor i (FC'_i), según la demostración de equivalencia indicada en el Anexo 10.5, que define:

$$FC'_{ij} = \frac{Cm_{ij}}{C_{o_{ij}}} = FC'_i = \frac{Cm_i}{C_{o_i}}$$

Ecuación 18

Donde,

FC'_{ij} : factor de corrección en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Cm_{ij} : concentración modelada en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

\overline{Co}_{ij} : concentración observada corregida en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

FC'_i : factor de corrección en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Cm_i : concentración modelada en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

\overline{Co}_i : concentración observada debida a la variación de las emisiones totales en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

i : receptor.

j : fuente de emisión

Y, reemplazando esta nueva definición del factor FC'_i en la Ecuación 12, se puede redefinir la relación emisión concentración como:

$$Co_{ij} = \frac{E_j}{FEC_{ij}} \cdot \frac{1}{FC'_i} + \beta_i$$

$$\sum_{j=1}^N Co_{ij} = \sum_{j=i}^N \frac{E_j}{FEC_{ij}} \cdot \frac{1}{FC'_i} + \beta_i$$

Ecuación 19

Donde,

Co_{ij} : concentración observada en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

E_j : caudal de emisión másico anual procedente de la fuente j (ton As/año).

FEC_{ij} : factor emisión-concentración en el receptor i debido a la emisión de la fuente j (ton As·m³/μg·año).

FC'_i : factor de corrección en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$).

β_{ij} : concentración o nivel basal en el receptor i debido a la emisión de la fuente j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

N : número de fuentes j

i : receptor.

j : fuente de emisión.

Para cada fuente, se cuenta entonces con un FEC'_{ij} corregido por el factor FC'_i que da cuenta del sesgo evaluado del modelo de dispersión atmosférica frente a los datos observados, de modo que se incluya la incertidumbre asociada a la modelización meteorológica, a la estimación de emisiones, al régimen operacional de la planta y al modelo de dispersión atmosférica. A continuación, se indica la definición del FEC'_{ij} :

$$FEC'_{ij} = FEC_{ij} \cdot FC'_i$$

Ecuación 20

Donde,

FEC'_{ij} : factor emisión-concentración corregido en el receptor i debido a la emisión de la fuente j (ton As·m³/μg·año).

FC'_i : factor de corrección en el receptor i (μg/m³ / μg/m³).

FEC_{ij} : factor emisión-concentración en el receptor i debido a la emisión de la fuente j (ton As·m³/μg·año).

i : receptor.

j : fuente de emisión.

Para cada dominio de simulación donde se emplazan las 8 plantas, se realiza la simulación del año completo de sus emisiones atmosféricas, de acuerdo con las horas de operación correspondientes al año meteorológicamente simulado con el modelo WRF (2020). Realizando una analogía con la Ecuación 9 se asume la hipótesis que el parámetro FEC recoge la información del resto de parámetros y variables involucradas en el transporte y dispersión del arsénico emitido por cada fuente, a excepción del caudal de emisión másico, presentando un comportamiento decreciente hiperbólicamente a medida que el receptor se aleja de la fuente de emisión, es decir, se incrementa la distancia fuente de emisión - receptor.

Por lo tanto, para determinar el factor FEC, se seleccionará por dominio, una estación representativa de cada localidad (receptor), eligiendo para esto la estación con mayor concentración promedio que tuviera representatividad poblacional de MP10 o (en los dominios donde no hubiera estaciones representativas) se elegirá la que tenga más población cercana. La Tabla 5-6 indica las estaciones seleccionadas por localidad para la determinación del FEC.

Tabla 5-6 Estaciones representativas por localidad y dominio

Fundición	Estación representativa	Localidad
Chuquicamata	Estación CD 23 de marzo	Calama
	Estación Nueva ChiuChiu	ChiuChiu
Altonorte	Estación Inacal	La Negra
	Estación Coviefi	Antofagasta
Potrerillos	Estación Cine Inca	Salvador
	Estación CAP	Potrerillos
Hernán Videla Lira	Estación Paipote	Copiapó
	Estación Tierra Amarilla	Tierra Amarilla
Ventanas	Estación Quintero	Quintero
	Estación Puchuncaví	Puchuncaví
	Estación Ventanas	Ventanas
Chagres	Estación Lo Campo	Catemu
	-	Panquehue
	-	Llayllay
Caletones	Estación Coya Población	Coya

Fuente: Elaboración propia

Se destaca que en el Anexo de la Sección 10.9 se presenta una evaluación de la metodología de modelación y obtención del FEC, donde se concluye que la metodología propuesta para la obtención del FEC por fuente incorpora la incertidumbre asociada a los modelos aplicados, meteorológicos y de dispersión atmosférica, así como la de estimación de emisiones en la obtención del FEC.

Se puede concluir, por lo tanto, que esta metodología resulta válida siempre y cuando se trate de un valor promedio anual y no un análisis episódico (horaria o diaria) y, por ende, este enfoque metodológico es válido en el caso del arsénico dado que los riesgos a la salud de las personas están asociados a una exposición crónica y no aguda.

5.1.6 Determinación del aporte basal

En la siguiente sección se explica cómo se determinó la concentración basal de arsénico en MP10. Entendiendo que la concentración observada está conformada por aportes de distintas fuentes, se define como concentración basal a la concentración de arsénico atmosférico que no proviene de las fundiciones. Esto puede ser por emisiones provenientes de algunas fuentes locales menores y/o de fuentes naturales.

Dado que los alcances del presente estudio no incluyen realizar un análisis químico in situ para cada estación o realizar mediciones de ubicaciones cercanas pero ajenas a la influencia de las fundiciones, se revisaron otros métodos disponibles en la literatura. Los métodos identificados en la literatura se pueden clasificar en tres grandes grupos: filtros meteorológicos; simulaciones; y análisis estadísticos.

Los filtros meteorológicos, mediante la reconstrucción de trayectorias pasadas, permiten identificar si el aire que se observó un día particular pasó por una zona de contaminación (Gao

et al., 2019). De esta manera, se filtran solo los días sin contaminación externa para obtener la concentración basal⁵⁷. El problema de este método es que requiere de una modelación meteorológica de las trayectorias pasadas y una buena delimitación de las zonas contaminadas.

Las simulaciones también son usadas para determinar concentración basal, pero requieren gran cantidad de información y detalle sobre las fuentes de emisión menores y naturales. Es por esto que es más común ver este método aplicado a contaminantes más estudiados como el material particulado (Fang et al., 2017; Liu et al., 2017).

Por último, están los métodos estadísticos que ocupan las observaciones reales para determinar la concentración basal. Existe una gran diversidad de métodos entre los cuales se encuentran por ejemplo: análisis espectrales (Tchepel et al., 2010), filtros KZ (Gao et al., 2019), algoritmos Eckhardt (Y. Wang et al., 2019), algoritmos mAGAGE (S. H. Wang et al., 2020) y *clustering* (Giostra et al., 2011), entre otros. Estos tienen en común la ventaja que solo necesitan observaciones de concentración, lo cual es más común de disponer. Las limitaciones están asociadas a el aumento de incertidumbre cuando se cuenta con bajas cantidades de datos.

Un método estadístico de *clustering* de especial interés es el de agrupación mediante cadenas markovianas ocultas (HMM por sus siglas en inglés), el cual se destaca por su flexibilidad y fácil interpretación (Gomez-Losada et al. 2015). Las HMM realizan una agrupación de las observaciones a lo largo del tiempo en regímenes de distintas concentraciones (*clusters*). A modo de ejemplo, en la Figura 5-12 se muestran las figuras explicativas de Martín-Cruz, Vera-Castellano, & Gómez-Losada (2020), donde se observa cómo la serie de tiempo se descompone en distintos regímenes de concentración (colores) que tienen una distribución gaussiana. El algoritmo encuentra la mejor combinación de regímenes gaussianos para explicar el histograma observado.

⁵⁷ Es común realizar análisis estadísticos posteriores al filtrado.

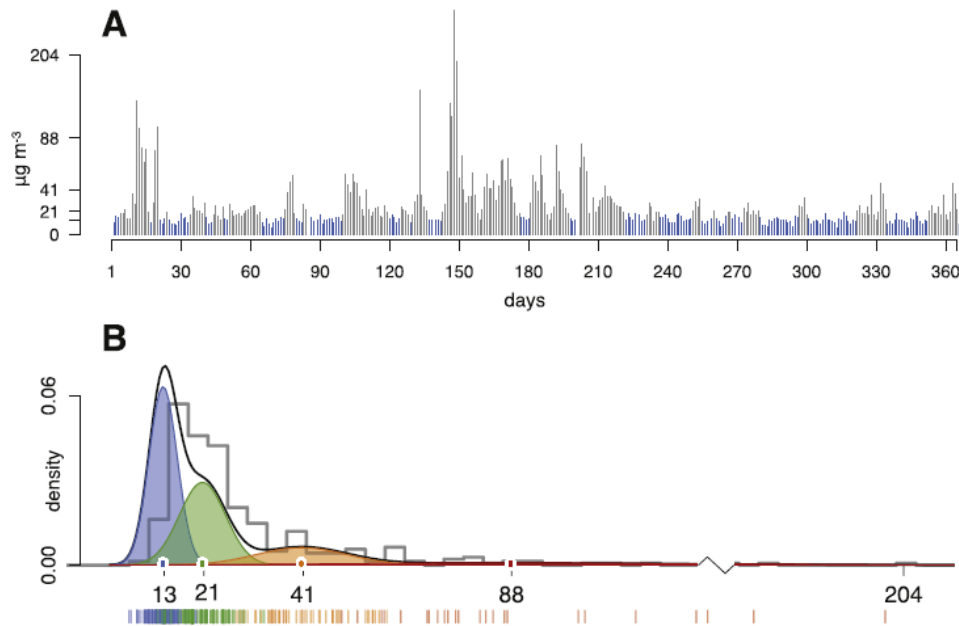


Figura 5-12 Ejemplo de cadena markoviana oculta para estimar concentración basal

Fuente: (Martín-Cruz et al., 2020)

Para la determinación de las concentraciones del presente estudio se utilizó el método de HMM de una manera similar al de Gómez-Losada, Pires, & Pino-Mejías (2015). Se corrió el modelo para 3, 4 y 5 regímenes, conservándose el mejor según BIC y consistencia para cada estación. Con esto se obtuvo el promedio y desviación estándar de cada régimen, siendo el más bajo la concentración basal. Para validar estos resultados, se compararon con la concentración observada de los días en que las plantas de ácidos de las fundiciones estaban apagadas, obteniéndose resultados similares. Luego, dado que para calibrar la modelación de este estudio solo es necesario seleccionar una estación por fundición, se eligió la estación con mayor concentración promedio con representatividad poblacional en cada una de las localidades en el área de influencia de las fundiciones⁵⁸.

En la Tabla 5-7 se muestran las concentraciones basales estimadas para cada estación seleccionada⁵⁹, en conjunto con su intervalo de confianza y el promedio de los dos últimos años. Se puede observar valores dentro de lo esperable desde 1,7 ng/m³ en la estación Paipote hasta 16,1 ng/m³ en la estación La Negra-Inacal. También se observan intervalos de confianza amplios para algunas estaciones, lo que grafica la incertidumbre asociada al método.

⁵⁸ En las fuentes donde no hubiera estaciones representativas se eligió alguna estación en la zona que cuente con datos que podrían ser considerados representativos.

⁵⁹ Mayores antecedentes como estimaciones en otras estaciones o comparación con otros antecedentes se presentan en el Anexo Sección 10.4.

Tabla 5-7 Concentración basal [ng/m3] estimada estadísticamente para calibración

Fuente	Estación para calibración	Concentración 2019	Concentración 2020	Estimación basal	P5	P95	Número de regímenes
Chuquicamata	CD 23 de Marzo	16,1	29,4	9,2	2,2	16,1	5
	Nueva Chiuchiu	7,2	5,1	3,7	0,6	6,8	3
Altonorte	La Negra-Inacal	67,1	42,0	16,1	0,0	32,3	5
	Coviefi	8,1	7,8	1,4	0,3	2,5	4
Potrerillos	Cine Inca	3,5	5,2	2,0	2,0	2,0	4
	CAP	13,7	30,3	5,5	1,3	9,7	5
HVL	Paipote	23,6	54,2	1,7	0,2	3,2	5
	Tierra Amarilla	12,6	34,4	2,8	0,1	5,5	5
Ventanas	Quintero	48,4	50,9	4,7	-2,2	11,6	4
	Puchuncaví	12,1	13,3	4,7	-0,9	10,3	3
	Ventanas	16,0	14,2	2,4	-0,1	5,0	4
Chagres	Lo Campo	36,2	14,3	9,4	4,2	14,7	5
Caletones	Coya Población	5,1	6,4	1,8	0,0	3,6	4

Nota: Se presenta el percentil 5 y 95 de la distribución gaussiana estimada.

Fuente: Elaboración propia

De los resultados se observa, en general una tendencia de que algunas estaciones tiene niveles basales más altos, lo que se explicaría por la influencia del desierto. La excepción corresponde a la concentración basal de la estación Lo Campo, lo cual se explicaría por el método de medición y reporte en base a compósitos trimestrales (hasta el primer semestre del 2018) y mensualmente desde entonces. Este método, el cual permite una correcta aproximación de los valores medios, no permite visualizar la variación de los niveles de forma más precisa. Lo anterior, resulta en que un método como el presente, no sea capaz de capturar de forma correcta los regímenes, resultando en una probable sobreestimación de la contribución basal.

Es importante resaltar que este método cuenta con distintas limitaciones y parámetros sensibles. Los intervalos confianza amplios se asocian a la variabilidad de los datos, sumado a una baja cantidad de datos. El número de regímenes es un parámetro relevante que podría resultar en una sobre o sub estimación, sin embargo, como se mencionó estos fueron comparados con las concentraciones en los días de baja actividad encontrando resultados coherentes. También vale la pena resaltar que los resultados se pueden ver afectados por la persistencia del arsénico en el aire. Se recomienda en el futuro mejorar las estimaciones con datos medidos in situ, a pesar de ser estudios costosos e intensivos en tiempo y recursos.

Como antecedente adicional, en Anexos (Sección 10.4) se encuentra una comparación de estas estimaciones con los resultados del estudio de Gidhagen, Kahelinb, Schmidt-Thome & Johansson (2002), el cual estima la concentración natural de arsénico en 7 localidades rurales de Chile.

5.2 Estimación de relación emisión - concentración

5.2.1 Análisis de incertidumbre meteorológico

5.2.1.1 Dominio Chuquicamata

Dentro del dominio representado en la Figura 5-3 se encuentran las estaciones de Nueva ChiuChiu, CD 23 de marzo y Hospital El Cobre con registro de datos horarios disponibles para las variables velocidad y dirección del viento a 10 m, temperatura y humedad relativa a 2 m. Estas series de datos se comparan con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

En las siguientes tablas se presentan los estadísticos obtenidos de acuerdo con la metodología descrita en la Sección 5.1.2:

Tabla 5-8 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶
Nueva ChiuChiu	0,81	1,85	0,51	2,37	0,65	0,79
CD 23 de marzo	-0,21	0,84	0,23	1,09	0,3	0,89
Hospital el Cobre	-0,01	1,03	0,26	1,32	0,33	0,85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-9 Variables de incertidumbre – Dirección del viento

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶
Nueva ChiuChiu	24,93	74,59	0,47	123,48	0,77	0,66
CD 23 de marzo	-14,91	33,74	0,2	58,3	0,35	0,9
Hospital el Cobre	-12,09	29,17	0,17	53,01	0,31	0,91

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-10 Variables de incertidumbre – Temperatura

Variable	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶
Nueva ChiuChiu	-4,73	5,46	0,4	6,55	0,48	0,72
CD 23 de marzo	-4,52	5,09	0,32	5,92	0,37	0,73
Hospital el Cobre	-3,82	4,68	0,3	5,5	0,35	0,75

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis de incertidumbre y los criterios de aceptación proporcionados en la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se puede concluir lo siguiente:

Velocidad del viento:

Dependiendo de la ubicación de la estación se presentan ligeras diferencias en el BIAS, obteniéndose los valores comprendidos dentro del intervalo $[-0.21, 0.81]$. Al analizar el valor absoluto de las diferencias, en todas las estaciones se cumple el criterio de validez, igualmente que, con el IOA, resultando en una buena representación de la velocidad del viento por parte del modelo WRF.

Dirección del viento:

Los sesgos, representados por el BIAS y el MAE, presentan diferencias en su validez dependiendo de la estación. En términos absolutos, solamente la estación Hospital El Cobre cumple con el criterio, resultando en el resto de las estaciones con resultados donde esta variable no se comporta dentro de los valores esperados.

Temperatura superficial:

Existe un sesgo negativo y recurrente en todas las ubicaciones, manifestando una subestimación en promedio de 4 °C entre los valores simulados y los observados en las tres estaciones que cuentan con registro. Por otro lado, la variación horaria en el ciclo anual presenta una fuerte correlación, dado el alto valor del IOA, es decir, la dirección del cambio que manifiestan en el intervalo horario en las dinámicas horarias entre ambas series de datos está dentro de los criterios de validez.

5.2.1.2 Dominio Altonorte

Dentro del dominio representado en la Figura 5-5 se encuentran las estaciones de Coviefi, Inacal y Sur, sin embargo, dichas estaciones no cuentan con registros disponibles de las variables temperatura, humedad, velocidad o dirección del viento a 10 m, por lo tanto, no es posible interpretar la bondad de los resultados obtenidos con el modelo WRF.

5.2.1.3 Dominio Potrerillos

Dentro del dominio representado en la Figura 5-6 se encuentran las estaciones de Doña Inés, Intelec, Cina Inca y CAP sin embargo, dichas estaciones no cuentan con registros disponibles de las variables temperatura, humedad, velocidad o dirección del viento a 10 m, por lo tanto, no es posible con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

5.2.1.4 Dominio Hernán Videla Lira

Dentro del dominio representado en la Figura 5-7 se encuentran las estaciones de Paipote, Copiapó, San Fernando y Tierra Amarilla, sin embargo, dichas estaciones no cuentan con registros disponibles de las variables temperatura, humedad, velocidad o dirección del viento a 10 m, por lo tanto, no es posible con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

5.2.1.5 Dominio Chagres

Dentro del dominio representado en la Figura 5-9 se encuentran las estaciones de Catemu y Lo Campo con registro de datos horarios disponibles para las variables velocidad y dirección del

viento a 10 m, temperatura y humedad relativa a 2 m. Estas series de datos se comparan con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

En las siguientes tablas se presentan los estadísticos obtenidos de acuerdo con la metodología descrita en la Sección 5.1.2:

Tabla 5-11 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶
Catemu	0,655	0,8668	0,94	1,22	1,32	0,55
Lo Campo	2,404	2,4682	2,67	3,09	3,34	0,34

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-12 Variables de incertidumbre – Dirección del viento

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶
Catemu	-11,2435	74,1628	0,49	106,56	0,71	0,51
Lo Campo	2,404	2,4682	2,67	3,09	3,34	0,34

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis de incertidumbre y los criterios de aceptación proporcionados en la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se puede concluir lo siguiente:

Velocidad del viento:

Para ambas estaciones existe un sesgo positivo en la velocidad del viento indicado por el BIAS, cuyo rango se encuentra entre [0,65 y 2,4] por lo que, se puede indicar que este viene dado por las diferentes ubicaciones. En general, los parámetros cumplen con los criterios de validez de IOA y RMSE, a excepción de la estación Lo Campo, cuyo valor de RMSE supera al criterio de validez definido en 2/ms como máximo.

Dirección del viento:

Los sesgos, representados por el BIAS y el MAE, presentan diferencias en su validez dependiendo de la estación. En general, solamente la estación Lo Campo cumple con el criterio del MAE y BIAS:

5.2.1.6 Dominio Ventanas

Dentro del dominio representado en la Figura 5-9 se encuentran las estaciones de La Greda, Los Maitenes, Quintero, Quintero Centro, Sur, Valle Alegre y Ventanas con registro de datos horarios disponibles para las variables velocidad y dirección del viento a 10 m. Estas series de datos se comparan con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

En las siguientes tablas se presentan los estadísticos obtenidos de acuerdo con la metodología descrita en la Sección 5.1.2:

Tabla 5-13 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶
La Greda	0,1359	0,7394	0,48	1	0,66	0,82
Los Maitenes	1,2582	1,3841	1,51	1,93	2,11	0,48
Quintero	1,5617	1,8556	0,86	2,43	1,13	0,71
Quintero Centro	0,7391	1,2799	0,56	1,75	0,77	0,78
4Sur	1,1113	1,3931	0,77	1,87	1,04	0,71
Valle Alegre	1,2067	1,287	1,67	1,74	2,27	0,52
Ventanas	-0,0506	0,8223	0,39	1,08	0,51	0,83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-14 Variables de incertidumbre – Dirección del viento

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶
La Greda	6,8984	79,6726	0,45	113,62	0,64	0,65
Los Maitenes	-1,6959	68,1503	0,37	98,39	0,53	0,66
Quintero	4,2202	62,2012	0,34	92,75	0,51	0,62
Quintero Centro	-9,1446	61,8238	0,32	95,06	0,48	0,6
Sur	5,806	70,3762	0,4	103,47	0,59	0,68
Valle Alegre	37,6751	89,728	0,63	122,98	0,86	0,59
Ventanas	7,2725	78,6878	0,44	117,62	0,66	0,63

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis de incertidumbre y los criterios de aceptación proporcionados en la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se puede concluir lo siguiente:

Velocidad del viento:

Dependiendo de la ubicación de la estación se presentan ligeras diferencias en el BIAS, obteniéndose los valores comprendidos dentro del intervalo [-0,05 y 1,56], sólo la estación Ventanas presenta un sesgo negativo. Al analizar el valor RMSE, en todas las estaciones se cumple el criterio de validez, y en la mayoría de las estaciones se obtienen valores aceptables de IOA.

Dirección del viento:

Los sesgos, representados por el BIAS tienden a ser sesgos positivos, y en general el MAE, se encuentra fuera del rango de validez.

5.2.1.7 Dominio Caletones

Dentro del dominio representado en la Figura 5-10 se encuentran las estaciones de Coya Club, Coya Población y Sewell, sin embargo, dichas estaciones no cuentan con registros disponibles de las variables temperatura, humedad, velocidad o dirección del viento a 10 m, por lo tanto, no es posible con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

5.2.2 Relación emisión-concentración

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de concentraciones en inmisión a partir de los inventarios de emisiones aplicados a cada una de las fuentes de emisión atmosféricas puntuales y fugitivas presentes en cada una de las 8 plantas a analizar⁶⁰. Los niveles de concentración en inmisión obtenidos siguen la metodología descrita en la Sección 5.1 y se comparan los valores modelados con los observados para cada una de las estaciones con registro de valores de arsénico para el año 2020 en los Anexos (Sección 10.8), mientras que la sección posterior presenta un análisis general por dominio.

A partir de los niveles de concentración y las emisiones anuales procedentes de cada una de las fuentes se presenta para cada dominio de simulación la propuesta de la función que relaciona en nivel de concentración con el caudal másico de emisión.

5.2.2.1 Fundición Chuquicamata

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en 4 de las 6 estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Chuquicamata, correspondientes con Centro Calama, Nueva Chiu-Chiu, Hospital El Cobre y Aukahuasi.

Esta sobrestimación es prácticamente homogénea para cada una de las estaciones dado que el valor absoluto del BIAS y el MAE presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-15), excepto en la estación Aukahuasi, lo cual indica que dicha estación presenta valores fuera de la tendencia generalizada para el resto de estaciones, de hecho, según la figura Figura 5-13 y el valor RMSE, en esta estación existe una mayor dispersión en los datos respecto al resto.

En la Tabla 5-15 el valor NMAE, que permite relativizar el error para las estaciones en estudio, indica que existen errores del mismo orden en las estaciones, excepto la estación Aukahuasi que presenta el mayor error. Por otro lado, el valor NMSE indica que las estaciones CD 23 de Marzo y Aukahuasi, presentan dispersiones similares. Por su parte, el IOA indica que para todas las estaciones existen bajas correlaciones.

⁶⁰ El detalle del inventario de emisiones modelado se presenta en los Anexos del informe (Sección 10.7)

Tabla 5-15 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Chuquicamata

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶	Distancia (m)
CD 23 de Marzo	-0,0188	0,0234	0,815	0,0637	2,2201	0,14	16.827
Centro Calama	0,0016	0,0069	0,9856	0,0124	1,7628	0,16	16.710
Nueva Chiu-Chiu	0,0013	0,0051	1,0003	0,0088	1,7319	0,38	24.299
Hospital El Cobre	0,0021	0,0067	1,0752	0,0115	1,8249	0,13	15.477
C.P.V.K	-0,0077	0,017	0,8162	0,0275	1,3216	0,28	14.740
Aukahuasi	0,079	0,1261	1,7938	0,232	3,2998	0,18	5.379

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-14) todas las estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo en la sobrestimación de la concentración en la mayoría de las estaciones.

Según estos resultados, la estación más cercana (Aukahuasi a 5 km) es la que tiende a presentar la mayor incertidumbre dentro de la zona de estudio, lo cual es esperable para puntos cercanos a las fuentes de emisión, donde pequeñas diferencias, ya sea en la modelación meteorológica o en la estimación de las emisiones, se traduce en mayores diferencias en los resultados de concentración en datos modelados. El efecto contrario sucede en la estación más alejada (Nueva Chiu-Chiu a 24 km). Por lo tanto, se aprecia que los parámetros MAE, BIAS y RMSE tienen tendencias similares según la distancia.

Por otra parte, si se analizan de forma comparativa las rosas de viento de cada estación (ver Anexo de la Sección 10.3)., se puede indicar que las ubicadas en Calama, conservan las direcciones de viento predominantes (oeste suroeste y este noreste), diferenciándose con las estaciones Aukahuasi y Nueva Chiu-Chiu ubicadas en zonas diferentes. En general, las estaciones de la zona de Calama presentan similar incertidumbre indicada por los valores de NMAE y NMSE.

Variación error concentración estaciones año 2020 Chuquicamata



Figura 5-13 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundación Chuquicamata 2020

Fuente: Elaboración propia

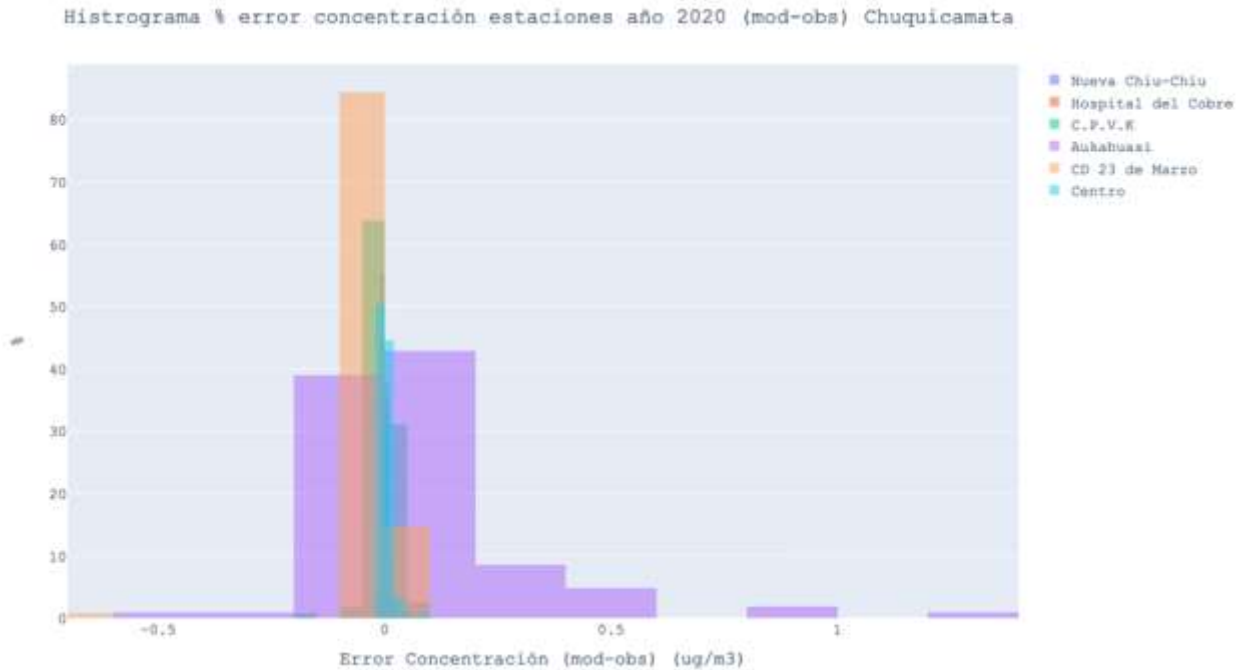


Figura 5-14 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Chuquicamata 2020

Fuente: Elaboración propia

Como se indica en los Anexos presente en la Sección 10.5 y Sección 10.7, se observa que en el mes de julio no existen emisiones en los datos modelados, tal como se indica en el inventario de emisiones, sin embargo existe una concentración de arsénico de fondo en los datos observados, una hipótesis sobre esto se puede deber al efecto de la resuspensión de material particulado depositado sobre el suelo, este fenómeno se replica para las demás estaciones de este dominio de estudio.

Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 2 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de Calama y ChiuChiu, correspondientes a las estaciones CD 23 de marzo y Nueva Chiu Chiu, respectivamente, como indica la Tabla 5-16.

Tabla 5-16 Estación representativa por localidad – Fundición Chuquicamata

Fundición	Estación representativa	Localidad
Chuquicamata	Estación CD 23 de marzo	Calama
	Estación Nueva ChiuChiu	ChiuChiu

Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\overline{C_{O_i}}$) a través de la Ecuación 13

y los datos de la Tabla 5-17. Los datos de concentración observada (C_{o_i}) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

Tabla 5-17 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Chuquicamata

Simbología	ITEM	Estación	
		CD 23 de marzo	Nueva ChiuChiu
C_{o_i}	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹	0,0294	0,0051
β_i	Concentración o nivel basal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²	0,0092	0,0037
\bar{C}_{o_i}	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0202	0,0014

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El nivel basal se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones CD 23 de marzo y Nueva ChiuChiu. Para ello, se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-18.

Tabla 5-18 Factor de corrección por receptor – Fundición Chuquicamata

Simbología	ITEM	Estación	
		CD 23 de marzo	Nueva ChiuChiu
\bar{C}_{o_i}	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0202	0,0014
C_{m_i}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0097	0,0057
FC'_i	Factor de corrección	0,4815	4,0156

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-19 y Tabla 5-24).

Tabla 5-19 Factor FEC por fuente – Estación CD 23 de marzo, Fundición Chuquicamata

Simbología	ITEM	Fuente			
		PA3	PA4	PAS	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,00002	0,00001	0,0000001	0,0097
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,3231	0,2815	0,0229	180,17
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / μg ·año)	19.914,5	19.391,19	16.5941,59	18.583,04

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-20 Factor FEC por fuente – Estación Nueva ChiuChiu, Fundición Chuquicamata

Simbología	ITEM	Fuente			
		PA3	PA4	PAS	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,00001	0,00001	0,00001	0,0056
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,3231	0,2815	0,0229	180,17
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	23.527,27	22.707,21	1.847,23	32.026,45

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Finalmente, se calcula el factor FEC' a partir de la Ecuación 20 y los valores FC y FEC indicados en la Tabla 5-18 y Tabla 5-20, respectivamente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-21 y Tabla 5-22.

Tabla 5-21 Factor FEC corregido por fuente – Estación CD 23 de marzo, Fundición Chuquicamata

Simbología	ITEM	Fuente			
		PA3	PA4	PAS	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	19.914,5	19.391,19	16.5941,59	18.583,04
FC'_i	Factor de corrección	0,4815			
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	9.588,79	9.336,84	79.900,71	8.947,71

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-22 Factor FEC corregido por fuente – Estación Nueva ChiuChiu, Fundición Chuquicamata

Simbología	ITEM	Fuente			
		PA3	PA4	PAS	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	23.527,27	22.707,21	1.847,23	32.026,45
FC'_i	Factor de corrección	4,0156			
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	94.474,99	91.181,98	7.417,65	12.8603,91

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

Tabla 5-23 Relación FEC por receptor – Fundición Chuquicamata

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación CD 23 de marzo	Calama	$C_{Calama} = \frac{E_{PA3}}{9.588,79} + \frac{E_{PA4}}{9.336,84} + \frac{E_{PAS}}{7.9900,71} + \frac{E_{FUGITIVA}}{8.947,71} + 0,009$	Ecuación 21
Estación Nueva ChiuChiu	ChiuChiu	$C_{Chiu-Chiu} = \frac{E_{PA3}}{9.4474,99} + \frac{E_{PA4}}{9.1181,98} + \frac{E_{PAS}}{7.417,65} + \frac{E_{Fugitiva}}{128.603,91} + 0,0037$	Ecuación 22

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.2 Fundición Altonorte

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en las tres estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Altonorte. Esta sobrestimación es homogénea y sistemática para cada una de las estaciones, indicado según el valor absoluto del BIAS y el MAE, que presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-24).

Los valores de IOA presentados en la Tabla 5-24 indican que existe baja correlación en todas las estaciones, pero según los órdenes de magnitud de los valores NMAE y NMSE la estación con menor incertidumbre es la estación Coviefi, además según el indicador RMSE esta estación es la que presenta menor dispersión de datos y también, corresponde a la estación más alejada de las fuentes de emisión para este dominio (17 km).

Tabla 5-24 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Altonorte

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶	Distancia (m)
Coviefi	0,0466	0,0473	6,0871	0,0584	7,5195	0,14	17.845
Inacal	1,7145	1,7145	40,8959	2,072	49,4246	0,03	4.800
Sur	5,712	5,712	56,2889	7,1283	70,245	0,02	1.106

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso anterior, se puede determinar que existe una relación decreciente entre los parámetros y la distancia, donde las estaciones más cercanas tienden a presentar mayor incertidumbre dentro de la zona de estudio.

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-15) cada una de las estaciones presenta una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático en la sobrestimación de la concentración.

Al comparar las rosas de viento obtenidas en las estaciones indicadas y presentadas en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio, se puede determinar que las estaciones Sur e Inacal conservan el vector de dirección oeste noroeste, pero existen diferencias en las distribuciones de dirección y velocidad del viento, esto dado que ambas estaciones se ubican en diferentes zonas con respecto a las fuentes de emisión en la zona de estudio. La estación Inacal se ubica en la zona

norte y la estación Sur en el sureste. A pesar de esto, ambas estaciones coinciden en que indican alta incertidumbre según los parámetros de NMAE y NMSE, además de baja correlación de datos, según el IOA.

Variación error concentración estaciones año 2020 Altonorte

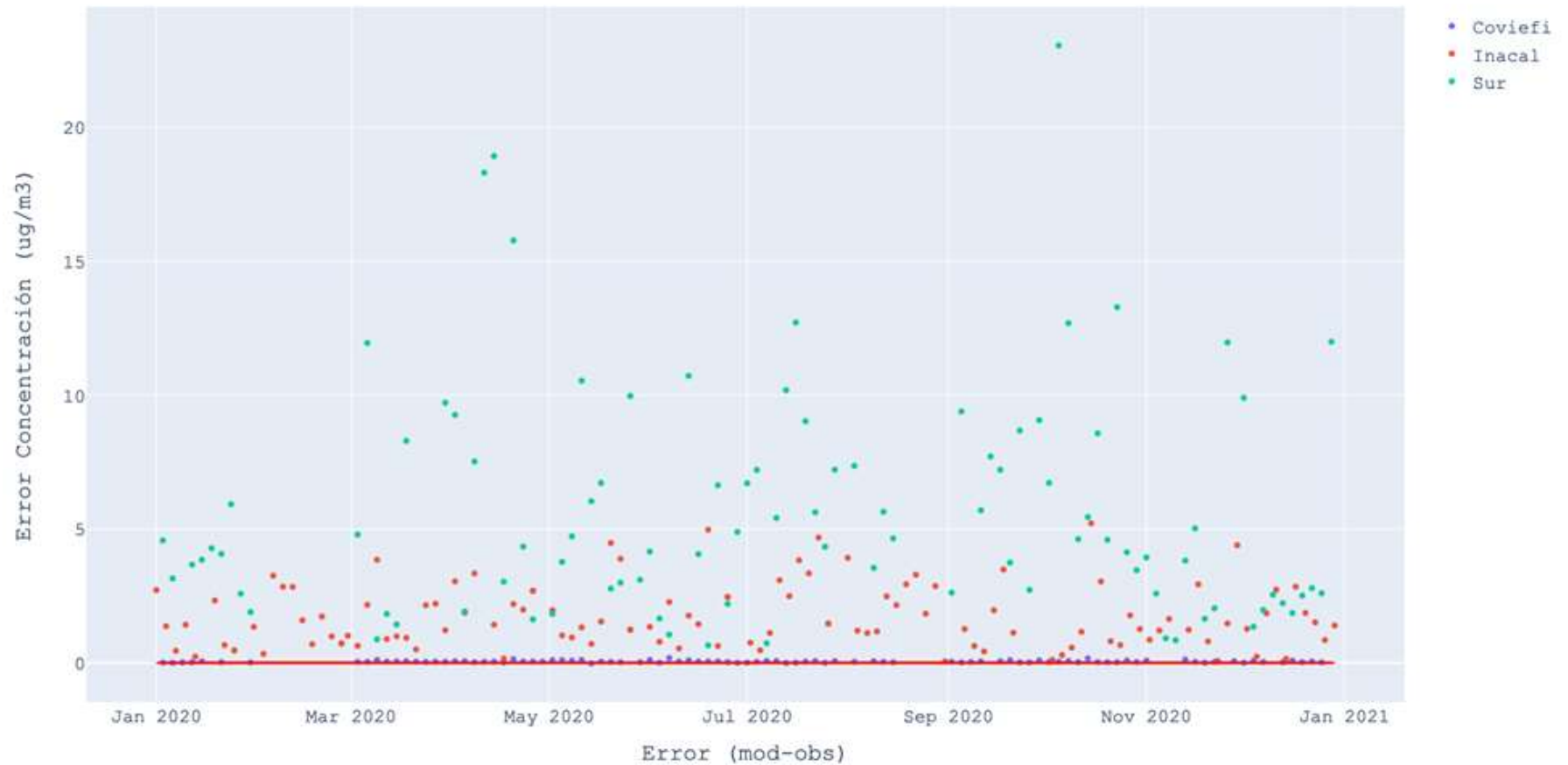


Figura 5-15 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Altonorte 2020

Fuente: Elaboración propia

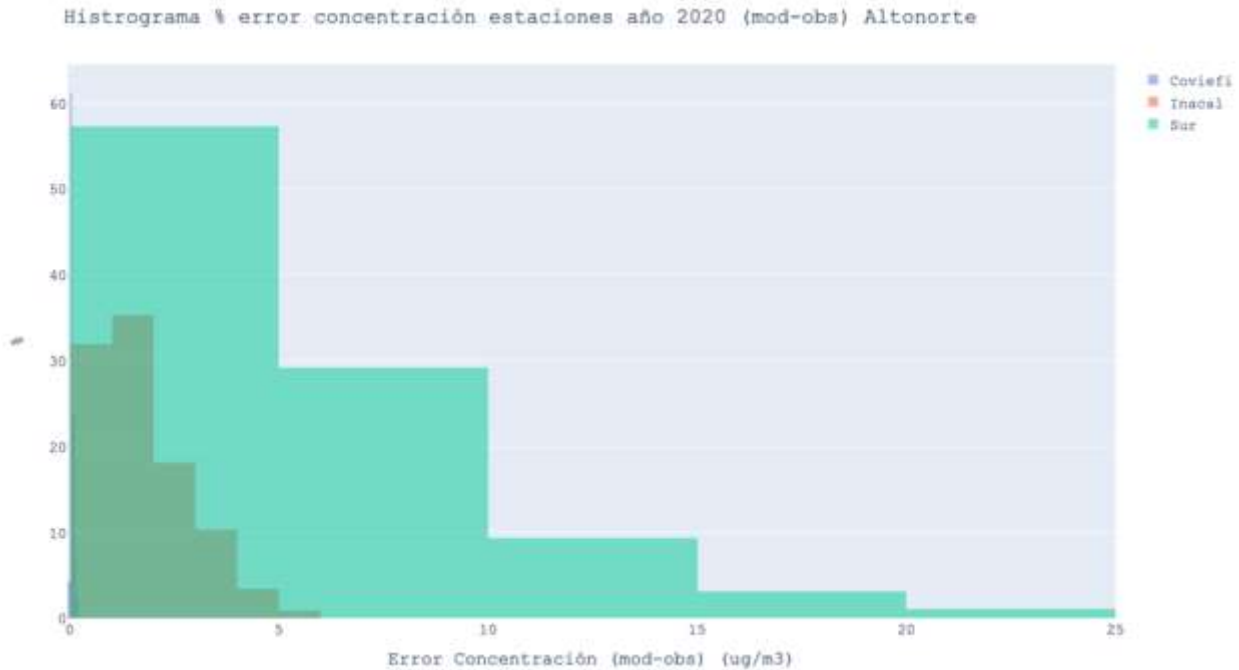


Figura 5-16 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Altonorte 2020

Fuente: Elaboración propia

Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 2 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de La Negra y Antofagasta, correspondientes a las estaciones Inacal y Antofagasta, respectivamente, como indica la Tabla 5-25

Tabla 5-25 Estación representativa por localidad – Fundición Altonorte

Fundición	Estación representativa	Localidad
Altonorte	Estación Inacal	La Negra
	Estación Coviefi	Antofagasta

Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones (\overline{CO}_i) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-26. Los datos de concentración observada (CO_i) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

Tabla 5-26 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Altonorte

Simbología	ITEM	Estación	
		Coviefi	Inacal
Co_i	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹	0,0078	0,0418
β_i	Concentración o nivel basal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²	0,0014	0,0161
\overline{Co}_i	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0064	0,0257

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El *background* se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones Coviefi e Inacal. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-27.

Tabla 5-27 Factor de corrección por receptor – Fundición Altonorte

Simbología	ITEM	Estación	
		Coviefi	Inacal
\overline{Co}_i	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0064	0,0257
Cm_i	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0543	1,7214
FC'_i	Factor de corrección	8,49	66,98

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-28 y Tabla 5-29).

Tabla 5-28 Factor FEC por fuente – Estación Coviefi, Fundición Altonorte

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS1	PAS3	Fugitiva
Cm_{ij}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,000004	0,00002	0,0543
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,0155	0,0757	117,6
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración	3.813,24	3.706,37	2.164,88

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-29 Factor FEC por fuente – Estación Inacal, Fundición Altonorte

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS1	PAS3	Fugitiva
Cm_{ij}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,00001	0,00004	1,721
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,0155	0,0757	117,6
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / μg -año)	1.699,94	1.748,47	68,32

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Finalmente, se calcula el factor FEC' a partir de la Ecuación 20. Los resultados se presentan en la Tabla 5-30 y Tabla 5-31.

Tabla 5-30 Factor FEC corregido por fuente – Estación Coviefi, Fundición Altonorte

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS1	PAS3	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ /μg·año)	3.813,24	3.706,37	2.164,88
FC'_i	Factor de corrección	8,49		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ /μg·año)	32.380,51	31.473,01	18.383,28

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-31 Factor FEC corregido por fuente – Estación Inacal, Fundición Altonorte

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS1	PAS3	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ /μg·año)	1.699,94	1.748,47	68,32
FC'_i	Factor de corrección	66,98		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ /μg·año)	113.859,95	117.110,46	4.576,01

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

Tabla 5-32 Relación FEC por receptor – Fundición Altonorte

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Coviefi	Antofagasta	$C_{Antofagasta} = \frac{E_{PAS1}}{32.380,51} + \frac{E_{PAS3}}{31.473,01} + \frac{E_{FUGITIVA}}{18.383,28} + 0,0014$	Ecuación 23
Estación Inacal	ChiuChiu	$C_{La Negra} = \frac{E_{PAS1}}{113.859,95} + \frac{E_{PAS3}}{117.110,46} + \frac{E_{FUGITIVA}}{4.576,01} + 0,0161$	Ecuación 24

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.3 Fundición Potrerillos

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que, en 2 de las 3 estaciones de estudio, correspondiente a Doña Inés y Cine Inca existe una subestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en las estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Potrerillos. Dado que no existen grandes diferencias entre los valores absolutos de BIAS y el MAE, se puede indicar que es una subestimación homogénea (Tabla 5-33).

Por otra parte, los valores de IOA presentados en la Tabla 5-33 indican que en la estación Cine Inca existe mayor correlación, en comparación con las demás estaciones. Al mismo tiempo, se puede identificar a esta como la estación con menor incertidumbre, por los valores de NMAE y NMSE.

Tabla 5-33 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Potrerillos

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶	Distancia (m)
Doña Inés	-0,9399	0,9686	0,9174	2,411	2,2835	0,25	260
Cine Inca	-0,003	0,0045	0,8744	0,0084	1,6146	0,33	25.686
CAP	0,0136	0,0349	1,1545	0,0622	2,0542	0,16	2.995

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

En este dominio se replica el comportamiento entre los parámetros y la distancia, por lo que las estaciones más cercanas (Doña Inés en este caso) muestra mayor incertidumbre que las estaciones más alejadas. Por otro lado, si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-19) cada una de las estaciones presenta una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático. Desde este gráfico destaca Doña Inés, con mayor error.

Según el análisis meteorológico, específicamente las rosas de vientos, las estaciones CAP y Doña Inés conservan similitudes, como la predominancia del vector sur este, esto dado que ambas estaciones se ubican en puntos cercanos distanciadas por 2 km. Caso similar a las estaciones Cine Inca e Intelc, que conservan la predominancia del vector este noreste (ver Anexo de la Sección 10.3).

Variación error concentración estaciones año 2020 Potrerillos

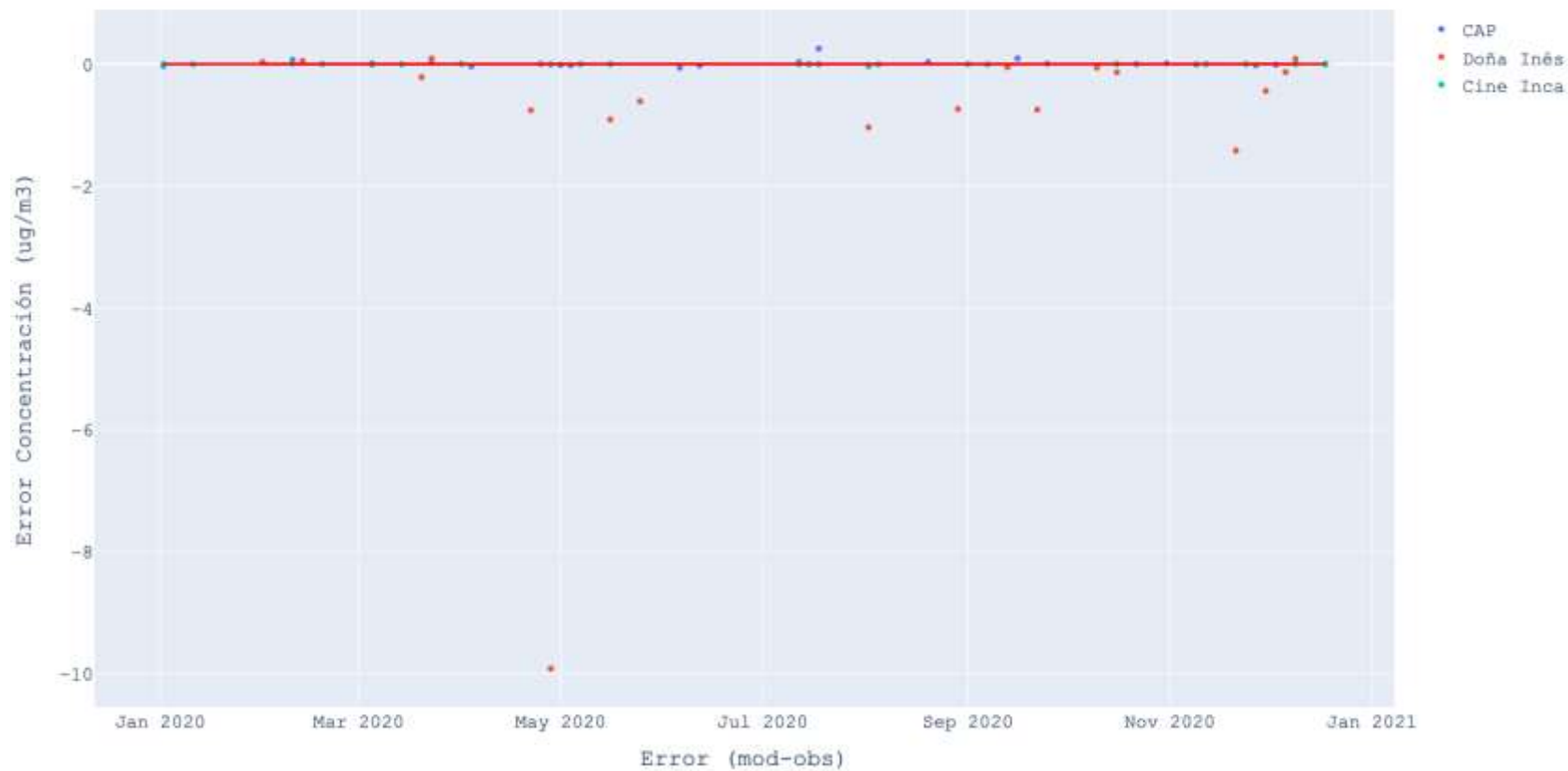


Figura 5-17 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Potrerillos 2020
Fuente: Elaboración propia

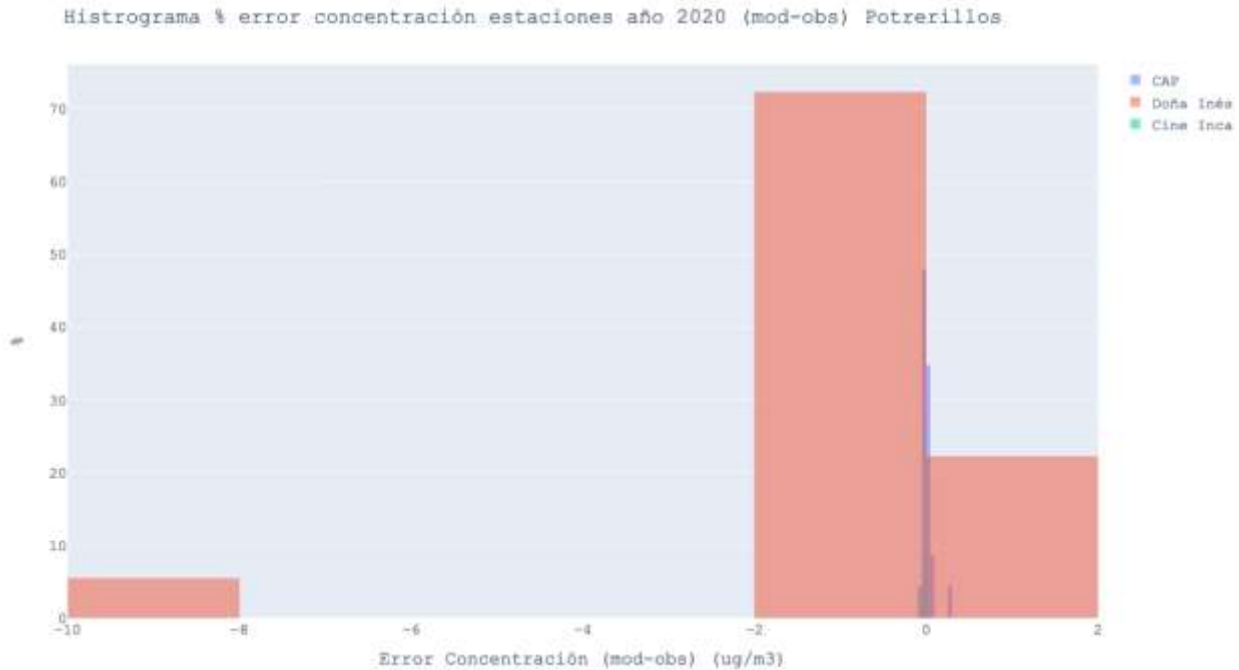


Figura 5-18 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Potrerillos 2020

Fuente: Elaboración propia

Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 2 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de Salvador y Potrerillos, correspondientes a las estaciones Cine Inca y CAP, respectivamente, como indica la Tabla 5-34.

Tabla 5-34 Estación representativa por localidad – Fundición Potrerillos

Fundición	Estación representativa	Localidad
Potrerillos	Estación Cine Inca	Salvador
	Estación CAP	Potrerillos

Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\overline{C_{O_i}}$) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-35. Los datos de concentración observada (C_{O_i}) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

Tabla 5-35 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Potrerillos

Simbología	ITEM	Estación	
		Cine Inca	CAP
Co_i	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹	0,0052	0,0303
β_i	Concentración o nivel basal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²	0,002	0,0055
\overline{Co}_i	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0032	0,0248

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El *background* se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones Coviefi e Incal. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-44.

Tabla 5-36 Factor de corrección por receptor – Fundición Potrerillos

Simbología	ITEM	Estación	
		Cine Inca	CAP
\overline{Co}_i	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0032	0,0248
Cm_i	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0012	0,0655
FC'_i	Factor de corrección	0,38	2,64

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-37 y Tabla 5-38).

Tabla 5-37 Factor FEC por fuente – Estación Cine Inca, Fundición Potrerillos

Simbología	ITEM	Fuente	
		PAS	Fugitiva
Cm_{ij}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,00001	0,00120
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,5459	50,5
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración	54.814,9	41.912,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-38 Factor FEC por fuente – Estación CAP, Fundición Potrerillos

Simbología	ITEM	Fuente	
		PAS	Fugitiva
Cm_{ij}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,00026	0,06552
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,5459	50,5
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ /μg·año)	2.109,56	770,76

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Finalmente, se calcula el factor FEC' a partir de la Ecuación 20. Los resultados se presentan en la Tabla 5-39 y Tabla 5-40.

Tabla 5-39 Factor FEC corregido por fuente – Estación Cine Inca, Fundición Potrerillos

Simbología	ITEM	Fuente	
		PAS	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ /μg·año)	54.814,9	41.912,12
FC'_i	Factor de corrección	0,38	
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ /μg·año)	20.810,15	15.911,68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-40 Factor FEC corregido por fuente – Estación CAP, Fundición Potrerillos

Simbología	ITEM	Fuente	
		PAS	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ /μg·año)	2.109,56	770,76
FC'_i	Factor de corrección	2,64	
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ /μg·año)	5.578,22	2.038,10

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (*FEC*), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

Tabla 5-41 Relación FEC por receptor – Fundición Potrerillos

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Cine Inca	Salvador	$C_{Salvador} = \frac{E_{PAS}}{20.810,15} + \frac{E_{FUGITIVA}}{15.911,68} + 0,002$	Ecuación 25
Estación CAP	Potrerillos	$C_{Potrerillos} = \frac{E_{PAS}}{5.578,22} + \frac{E_{Fugitiva}}{2.038,1} + 0,0055$	Ecuación 26

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.4 Fundición Hernán Videla Lira

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en las cuatro estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Hernán Videla Lira. Esta sobrestimación es homogénea y sistemática para cada estación, dado que el valor absoluto del BIAS y el MAE presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-42), excepto en la estación Copiapó, donde se aprecian mayores diferencias.

Los valores de NMAE y NMSE de la Tabla 5-42, indican que la estación con menor incertidumbre es la estación Copiapó. Esta además, presenta menor dispersión de datos según el valor de RMSE y corresponde a la estación más alejada a las fuentes de emisión del dominio (distancia aproximada a 9 km). Por el contrario, la estación más cercana, correspondiente a la estación Paipote (distancia de 1 km), es la que presenta la mayor incertidumbre. Los valores de IOA en la a Tabla 5-42 indican que la estación con mejor correlación de datos corresponde también a la estación Copiapó.

Tabla 5-42 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Hernán Videla Lira

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶	Distancia (m)
Copiapó	0,009	0,0251	1,3399	0,0357	1,9057	0,35	9.673
San Fernando	0,157	0,1595	6,6624	0,2425	10,1256	0,22	4.961
Tierra Amarilla	0,1101	0,1222	3,5317	0,1638	4,7329	0,14	6.396
Paipote	0,421	0,4388	8,0298	0,8893	16,2733	0,05	1.510

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-20) todas las estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático en la sobrestimación de la concentración.

Por otro lado, si se analizan las rosas de viento (ver Anexo de la Sección 10.3), se puede apreciar que se conserva el vector predominante en las estaciones Paipote, Copiapó y San Fernando, correspondiente al vector noroeste. Del grupo de estudio se diferencia la estación Tierra Amarilla, que se encuentra en el lado sur, con respecto a las fuentes de emisión y cuyo vector predominante proviene del norte noreste.

Variación error concentración estaciones año 2020 Hernán Videla Lira

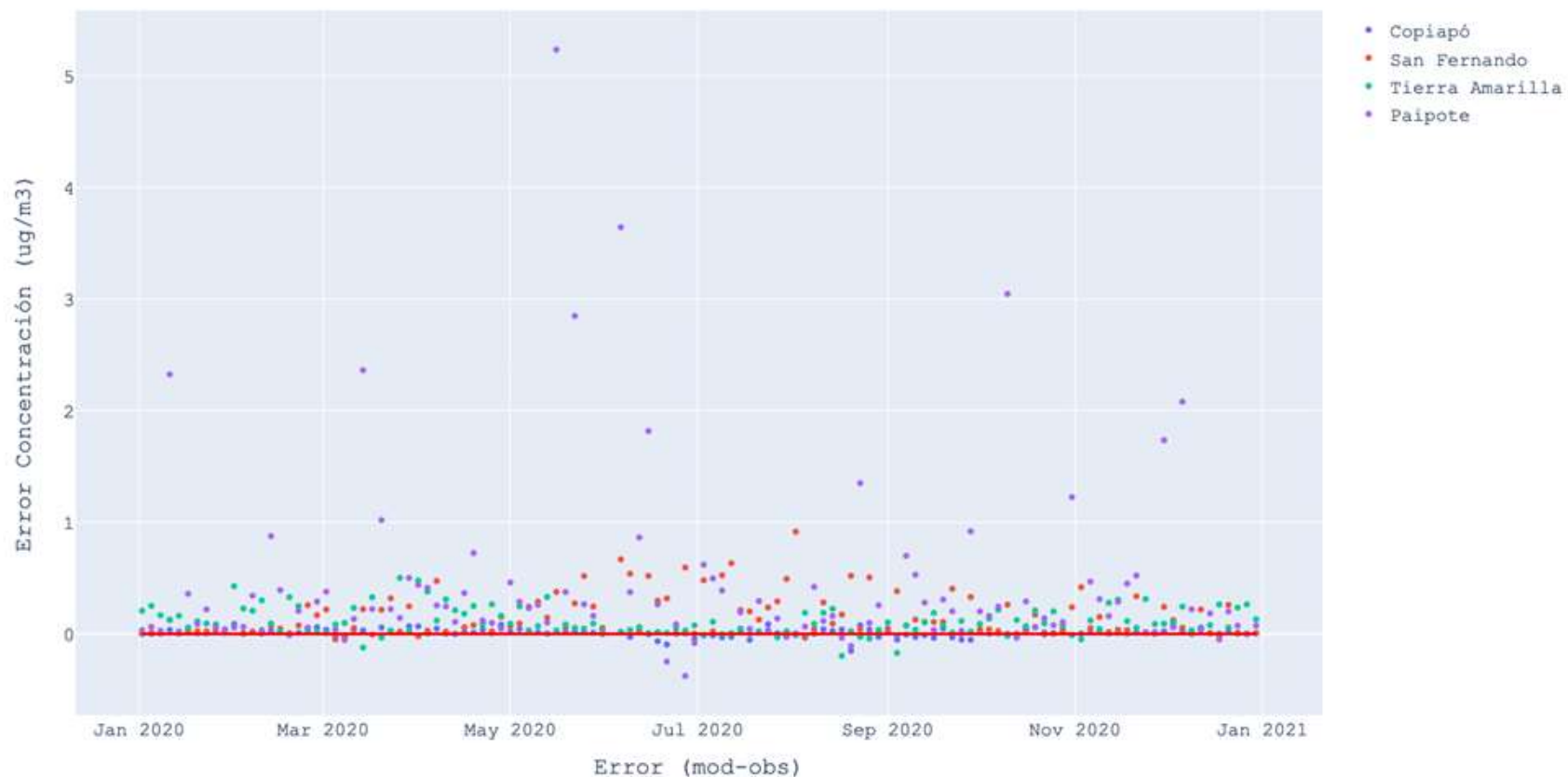


Figura 5-19 Evolución del error de la concentración modelada versus observada - Fundición Hernán Videla Lira 2020

Fuente: Elaboración propia

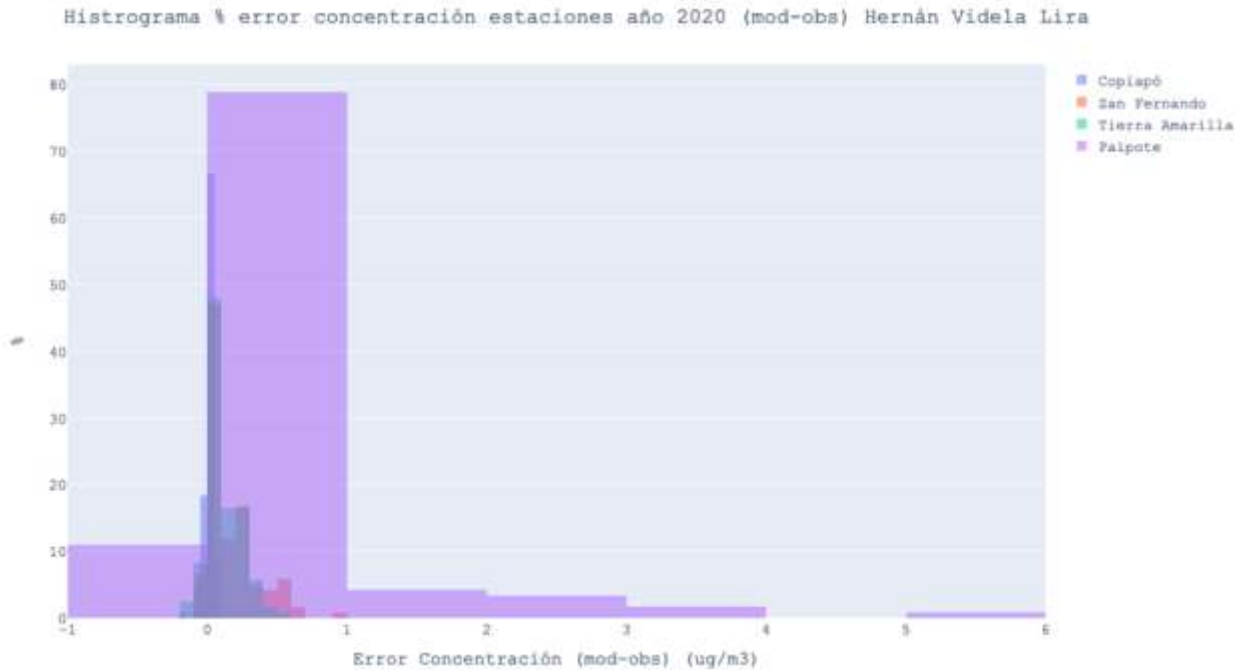


Figura 5-20 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Hernán Videla Lira 2020.

Fuente: Elaboración propia

Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 2 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de Copiapó y Tierra Amarilla, correspondientes a las estaciones Paipote y Tierra Amarilla, respectivamente, como indica la Tabla 5-43.

Tabla 5-43 Estación representativa por localidad – Fundición Hernán Videla Lira

Fundición	Estación representativa	Localidad
Hernán Videla Lira	Estación Paipote	Copiapó
	Estación Tierra Amarilla	Tierra Amarilla

Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\overline{C_{O_i}}$) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-44. Los datos de concentración observada (C_{O_i}) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

Tabla 5-44 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Hernán Videla Lira

Simbología	ITEM	Estación	
		Paipote	Tierra Amarilla
C_{o_i}	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹	0,0542	0,0344
β_i	Concentración o nivel basal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²	0,0017	0,0028
\overline{C}_{o_i}	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0525	0,0316

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El *background* se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones Paipote y Tierra Amarilla. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-45.

Tabla 5-45 Factor de corrección por receptor – Fundición Hernán Videla Lira

Simbología	ITEM	Estación	
		Paipote	Tierra Amarilla
\overline{C}_{o_i}	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0525	0,0316
C_{m_i}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,4554	0,1452
FC'_i	Factor de corrección	8,67	4,59

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Luego, se determina el factor *FEC* expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-46 y Tabla 5-47).

Tabla 5-46 Factor *FEC* por fuente – Estación Paipote, Fundición Hernán Videla Lira

Simbología	ITEM	Fuente		
		HLE	PTGC	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,001	0,0001	0,4543
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,344	0,0324	18,27
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración	342,21	309,31	40,22

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-47 Factor *FEC* por fuente – Estación Tierra Amarilla, Fundición Hernán Videla Lira

Simbología	ITEM	Fuente		
		HLE	PTGC	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0023	0,0002	0,1427
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,3440	0,0324	18,27
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / μg ·año)	151,18	168,9	128,04

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Finalmente, se calcula el factor FEC' a partir de la Ecuación 20 y los valores FC y FEC indicados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-48 y Tabla 5-49.

Tabla 5-48 Factor FEC corregido por fuente – Estación Paipote, Fundición Hernán Videla Lira

Simbología	ITEM	Fuente		
		HLE	PTGC	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ /μg·año)	342,21	309,31	40,22
FC'_i	Factor de corrección	8,67		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ /μg·año)	2.968,47	2.683,08	348,85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-49 Factor FEC corregido por fuente – Estación Tierra Amarilla, Fundición Hernán Videla Lira

Simbología	ITEM	Fuente		
		HLE	PTGC	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ /μg·año)	151,18	168,9	128,04
FC'_i	Factor de corrección	4,59		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ /μg·año)	694,44	775,84	588,16

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio

Tabla 5-50 Relación FEC por receptor – Fundición Hernán Videla Lira

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Paipote	Copiapó	$C_{Copiapó} = \frac{E_{HLE}}{2.968,47} + \frac{E_{PTGC}}{2.683,08} + \frac{E_{FUGITIVA}}{348,85} + 0,0017$	Ecuación 27
Estación Tierra Amarilla	Tierra Amarilla	$C_{Tierra Amarilla} = \frac{E_{HLE}}{694,44} + \frac{E_{PTGC}}{775,84} + \frac{E_{FUGITIVA}}{588,16} + 0,0028$	Ecuación 28

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.5 Fundición Ventanas

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 (ver Anexo de la Sección 10.8) muestran que sistemáticamente existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en 5 estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Ventanas. Sólo para la estación Quintero Centro, se presenta una subestimación. En algunos casos se aprecia que se tienen valores de BIAS y MAE similares, indicando una correlación sistemática, estas son las estaciones La Greda, Quintero y Ventanas.

Los valores de NMAE y NMSE de la Tabla 5-51 indican que la estación con mayor incertidumbre se corresponde con la estación la Greda, con un orden de magnitud mayor en comparación con las demás estaciones. Al mismo tiempo, su valor de RMSE indican una alta dispersión de datos y el IOA una baja correlación. Esta corresponde a la estación más cercana a las fuentes de emisión, ubicada a una distancia de 2 km.

Por otra parte, la estación con menor incertidumbre según los valores de NMAE y NMSE de la Tabla 5-51 es la estación Quintero Centro, está también presenta una baja dispersión de los datos.

La Tabla 5-51 muestra la variación de los parámetros normalizados según la distancia, en donde se aprecia que las estaciones más cercanas tienden a presentar mayor BIAS e incertidumbre dentro de la zona de estudio, lo cual es esperable para puntos cercanos a las fuentes de emisión, donde pequeñas diferencias, ya sea en la modelación meteorológica o en la estimación de las emisiones, se traduce en mayores diferencias en los resultados de concentración en datos modelados.

Tabla 5-51 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Ventanas

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶	Distancia (m)
La Greda	0,4368	0,4373	31,7944	0,7081	51,4812	0,03	1.694
Los Maitenes	0,0825	0,1054	3,5361	0,1554	5,2127	0,12	2.483
Puchuncaví	0,0081	0,0199	1,4759	0,0285	2,1096	0,25	8.368
Quintero	0,0062	0,067	1,3285	0,1024	2,0289	0,46	5.224
Quintero Centro	-0,013	0,063	1,1992	0,0825	1,57	0,29	5.575
Sur	0,0411	0,0675	3,0706	0,0938	4,2647	0,1	4.289
Valle Alegre	0,0159	0,026	2,2245	0,0396	3,3787	0,12	6.518
Ventanas	0,1476	0,1483	10,4879	0,2269	16,05	0,1	2.283

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-22) la mayoría las estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático de la concentración.

Con respecto a las rosas de viento (ver Anexo de la Sección 10.3), las estaciones Quintero y Quintero Centro, ubicadas a distancia de 2 km aproximadamente, conservan la predominancia del vector sur suroeste, al mismo tiempo ambas estaciones presentan valores NMAE y NMSE muy similares, por lo que tienen similar incertidumbre. Por otro lado, las estaciones La Greda y Ventanas separadas por 1 km, conservan la predominancia de los vectores suroeste y oeste suroeste, sin embargo, la estación Ventanas se ubica en una zona más abierta en comparación con la estación urbana de La Greda, por lo que difieren en algunos de sus parámetros de

incertidumbre, presentando ciertas similitudes en el orden de datos, como el valor NMAE y NMSE, con alta incertidumbre.

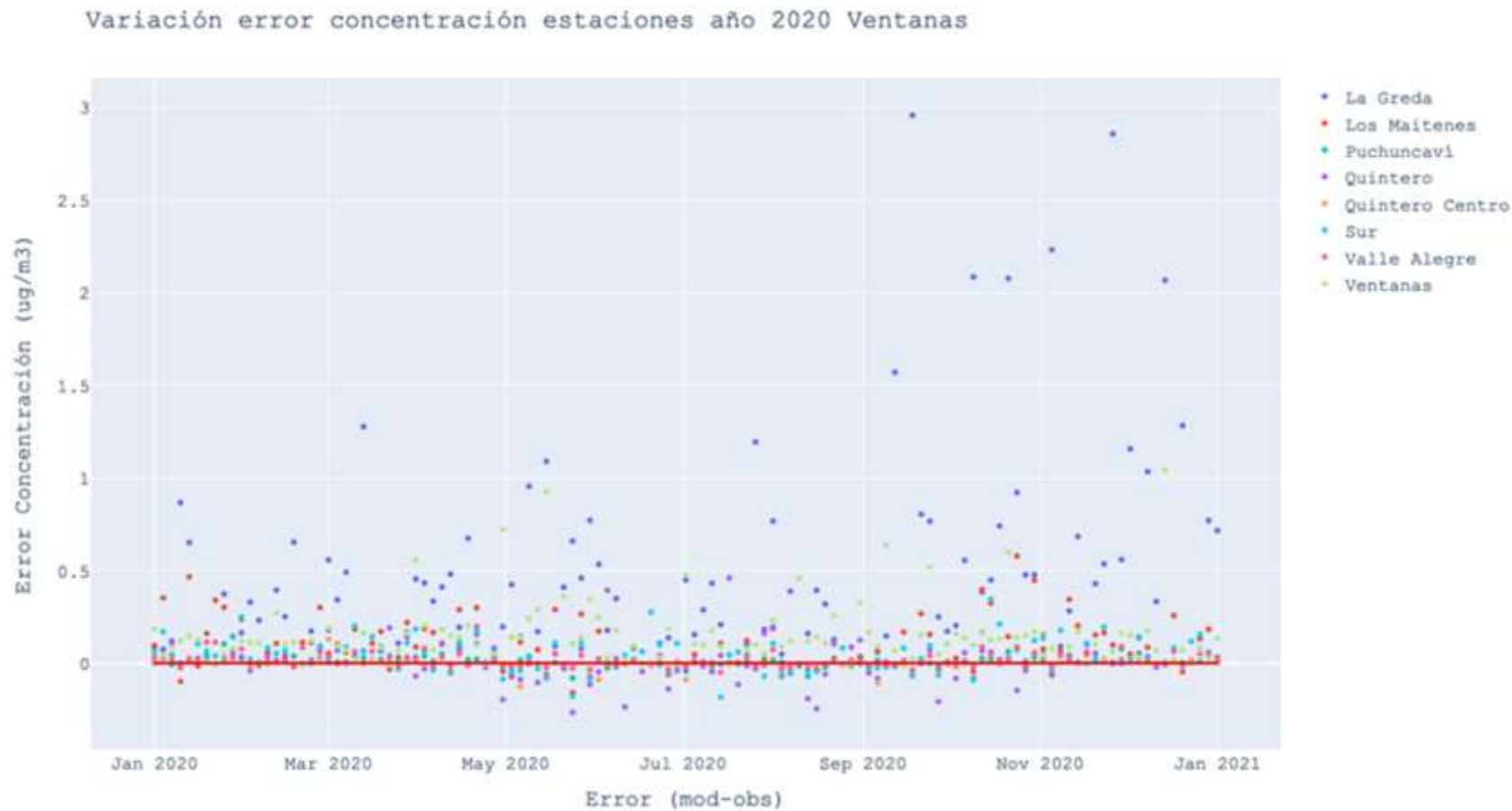


Figura 5-21 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Ventanas 2020

Fuente: Elaboración propia

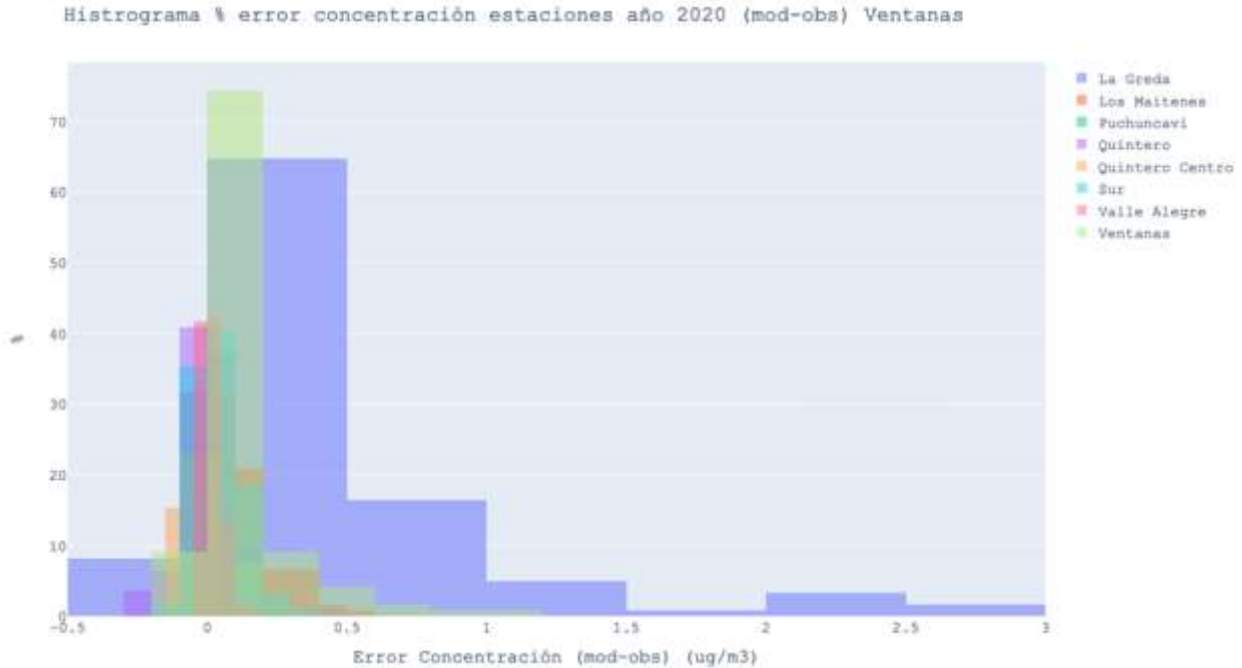


Figura 5-22 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Ventanas 2020

Fuente: Elaboración propia

Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 3 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de Quintero, Puchuncaví y Ventanas, correspondientes a las estaciones del mismo nombre, como indica la Tabla 5-52.

Tabla 5-52 Estación representativa por localidad – Fundición Ventanas

Fundición	Estación representativa	Localidad
Ventanas	Estación Quintero	Quintero
	Estación Puchuncaví	Puchuncaví
	Estación Ventanas	Ventanas

Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\overline{C_{O_i}}$) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-53. Los datos de concentración observada (C_{O_i}) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

Tabla 5-53 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Ventanas

Simbología	ITEM	Estación		
		Puchuncaví	Quintero	Ventanas
Co_i	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹	0,0136	0,0504	0,0142
β_i	Concentración o nivel basal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²	0,0047	0,0047	0,0024
\overline{Co}_i	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0089	0,0457	0,0118

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El *background* se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones Puchuncaví, Quintero y Ventanas. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-54.

Tabla 5-54 Factor de corrección por receptor – Fundición Ventanas

Simbología	ITEM	Estación		
		Puchuncaví	Quintero	Ventanas
\overline{Co}_i	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0089	0,0457	0,0118
Cm_i	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0236	0,0513	0,1610
FC'_i	Factor de corrección	2,64	1,12	13,64

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Luego, se determina el factor *FEC* expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-55, Tabla 5-56 y Tabla 5-57).

Tabla 5-55 Factor *FEC* por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Ventanas

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
Cm_{ij}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,00004	0,0001	0,0234
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,0936	0,2240	50
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración	2.115,07	1.693,54	2.139,03

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-56 Factor *FEC* por fuente – Estación Quintero, Fundición Ventanas

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
Cm_{ij}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,00004	0,0001	0,0512
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,0936	0,2240	50
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / μg ·año)	2.233,62	1.923,8	977,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-57 Factor FEC por fuente – Estación Ventanas, Fundición Ventanas

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0005	0,0015	0,1590
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,0936	0,2240	50
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / μg ·año)	196,29	148,21	314,44

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Finalmente, se calcula el factor FEC' a partir de la Ecuación 20 y los valores FC y FEC indicados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-58, Tabla 5-59 y Tabla 5-60.

Tabla 5-58 Factor FEC corregido por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Ventanas

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / μg ·año)	2.115,07	1.693,54	2.139,03
FC'_i	Factor de corrección	2,64		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ / μg ·año)	5.597	4.481,52	5.660,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-59 Factor FEC corregido por fuente – Estación Quintero, Fundición Ventanas

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / μg ·año)	2.233,62	1.923,8	977,10
FC'_i	Factor de corrección	1,12		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ / μg ·año)	2.506,6	2.158,91	1.096,52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-60 Factor FEC corregido por fuente – Estación Ventanas, Fundición Ventanas

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ / μg ·año)	196,29	148,21	314,44
FC'_i	Factor de corrección	13,64		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ / μg ·año)	2.678,19	2.022,16	4.290,27

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio

Tabla 5-61 Relación FEC por receptor – Fundición Ventanas

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Puchuncaví	Puchuncaví	$C_{Puchuncaví} = \frac{E_{HTE}}{5.597} + \frac{E_{PAS}}{4.481,52} + \frac{E_{FUGITIVA}}{5.660,4} + 0,0047$	Ecuación 29
Estación Quintero	Quintero	$C_{Quintero} = \frac{E_{HTE}}{2.506,6} + \frac{E_{PAS}}{2.158,91} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.096,52} + 0,0047$	Ecuación 30
Estación Ventanas	Ventanas	$C_{Ventanas} = \frac{E_{HTE}}{2.678,19} + \frac{E_{PAS}}{2.022,16} + \frac{E_{FUGITIVA}}{4.290,27} + 0,0024$	Ecuación 31

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.6 Fundición Chagres

A diferencia de otros dominios en esta ubicación solamente se reportaron valores mensuales de concentraciones en las estaciones, por lo tanto, solamente hay doce valores anuales de observación. Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que para la estación Lo Campo existe una subestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos mientras que para la estación Catemu existe una sobrestimación de los datos modelados.

Para la estación Lo Campo, esta subestimación es prácticamente homogénea dado que el valor absoluto del BIAS y el MAE presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-62), casi similar a la estación Catemu con sobrestimación homogénea. Según los valores de NMAE y NMSE de la Tabla 5-62, la estación con mayor incertidumbre es la estación Catemu, superando en un orden a la estación de Lo Campo. También se indica, que Catemu presenta alta dispersión de por su valor RMSE y una deficiente correlación por el valor indicado en el parámetro IOA. La estación Lo Campo, por otro lado, presenta la menor incertidumbre, baja dispersión y mejor correlación, correspondiendo a la estación más alejada de las fuentes de emisión del dominio de estudio a una distancia aproximada de 5 km.

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-24) ambas estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente un sesgo sistemático.

Ambas estaciones se ubican en zonas diferentes con respecto a las fuentes de emisión, la estación Catemu se encuentra en el lado norte, mientras que la estación Lo Campo se ubica en el este. A pesar de esto, ambas rosas de viento conservan ciertas similitudes, como la presencia de vientos de dirección este sur-este y sureste, aunque estos no son los vectores predominantes.

Tabla 5-62 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Chagres

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶	Distancia (m)
Catemu	0,1138	0,1151	11,184	0,2034	19,7552	0,04	2.738
Lo Campo	-0,0081	0,0086	0,5462	0,0119	0,7546	0,54	5.440

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

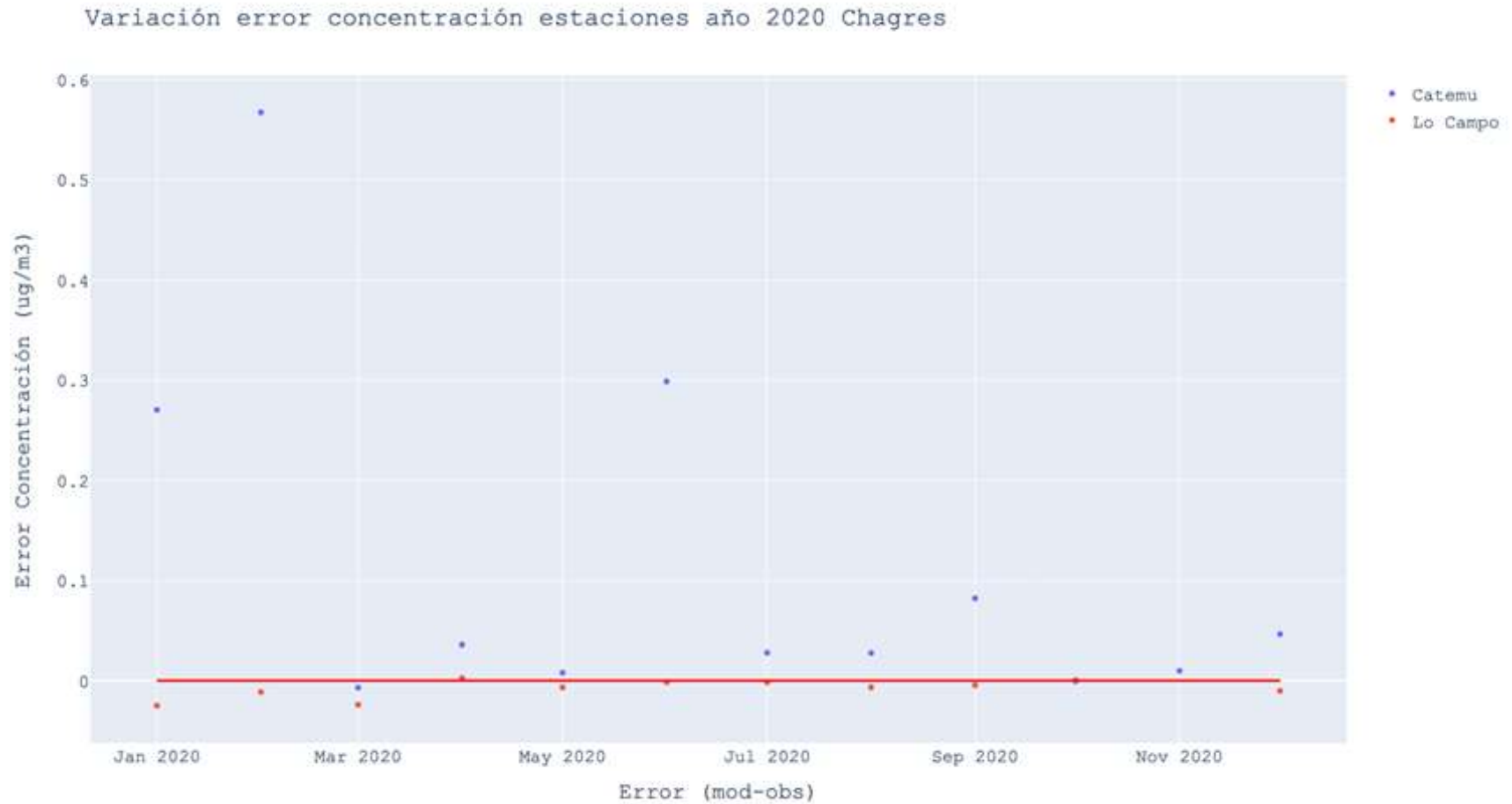


Figura 5-23 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Chagres 2020

Fuente: Elaboración propia

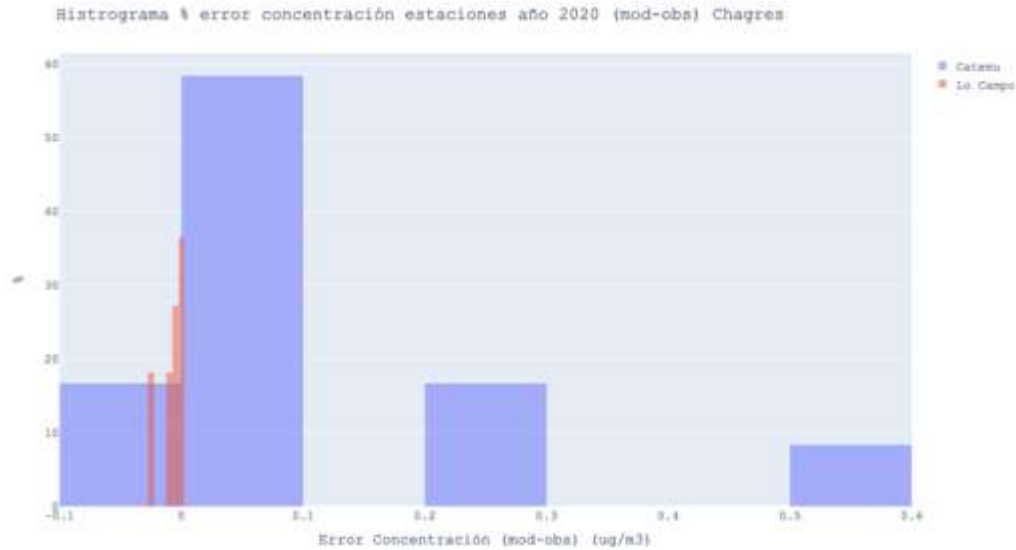


Figura 5-24 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Chagres 2020

Fuente: Elaboración propia

Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5 se determinaron 3 estaciones representativas, 2 de las cuales corresponden a puntos de interés, es decir, centros poblados sin estación de monitoreo. Para este dominio de estudio se abarcan las localidades de Catemu, Panquehue y Llayllay, , como indica la Tabla 5-63.

Tabla 5-63 Estación representativa por localidad – Fundición Chagres

Fundición	Estación representativa	Localidad
Chagres	Estación Lo Campo	Catemu
	-	Panquehue
	-	Llayllay

Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\overline{C_{O_i}}$) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-64. Los datos de concentración observada (C_{O_i}) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020. Dado que los puntos de interés no cuentan con datos de concentración observada (C_{O_i}), se considerarán un nivel basal (β_i) equivalente al de la Estación Lo Campo.

Tabla 5-64 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Chagres

Simbología	ITEM	Estación	Punto de interés	Punto de interés
		Lo Campo	Llayllay	Panquehue
C_{O_i}	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹	0,0158	-	-
β_i	Concentración o nivel basal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²	0,0094	0,0094	0,0094
$\overline{C_{O_i}}$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0064	-	-

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El nivel basal se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a la estación Lo Campo. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-65. Para los puntos de interés, se asume el factor de corrección de Lo Campo.

Tabla 5-65 Factor de corrección por receptor – Fundición Chagres

Simbología	ITEM	Estación	Punto de interés	
		Lo Campo	Llayllay	Panquehue
$\overline{C_{O_i}}$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0064	-	-
C_{m_i}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0097	0,0043	0,0077
FC'_i	Factor de corrección	1,52	1,52	1,52

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-66, Tabla 5-67 y Tabla 5-68).

Tabla 5-66 Factor FEC por fuente – Estación Lo Campo, Fundición Chagres

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0001	0,0008	0,0089
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,0607	0,3636	8,22
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración	829,64	477,01	926,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-67 Factor FEC por fuente – Punto de interés Llayllay, Fundición Chagres

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,00003	0,0003	0,004
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,0607	0,3636	8,22
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración	1.779,16	1.202,59	2.074,19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-68 Factor FEC por fuente – Punto de interés Panquehue, Fundición Chagres

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
Cm_{ij}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0002	0,0010	0,0065
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,0607	0,3636	8,22
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración	394,18	346,53	1.266,32

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Finalmente, se calcula el factor FEC' a partir de la Ecuación 20 y los valores FC y FEC indicados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-69.

Tabla 5-69 Factor FEC corregido por fuente – Estación Lo Campo, Fundición Chagres

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	829,64	477,01	926,41
FC'_i	Factor de corrección	1,52		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	1.258,51	723,59	1.405,30

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-70 Factor FEC corregido por fuente – Punto de interés Llayllay, Fundición Chagres

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	1.779,16	1.202,59	2.074,19
FC'_i	Factor de corrección	1,52		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	2.698,86	1.824,25	3.146,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-71 Factor FEC corregido por fuente – Punto de interés Panquehue, Fundición Chagres

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	394,18	346,53	1.266,32
FC'_i	Factor de corrección	1,52		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$)	597,94	525,66	1.920,92

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo, donde además se considera el mismo nivel basal (β_i) para los puntos de interés. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

Tabla 5-72 Relación FEC por receptor – Fundición Chagres

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Lo Campo	Lo Campo	$C_{Lo\ Campo} = \frac{E_{PAS}}{1.258,51} + \frac{E_{HORNO}}{723,59} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.405,3} + 0,0094$	Ecuación 32
Punto de interés Llayllay	Llayllay	$C_{Llayllay} = \frac{E_{PAS}}{2.698,86} + \frac{E_{HORNO}}{1.824,25} + \frac{E_{FUGITIVA}}{3.146,41} + 0,0094$	Ecuación 33
Punto de interés Panquehue	Panquehue	$C_{Panquehue} = \frac{E_{PAS}}{597,94} + \frac{E_{HORNO}}{525,66} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.920,92} + 0,0094$	Ecuación 34

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.7 Fundición Caletones

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en 2 estaciones de las 3 disponibles dentro del dominio de Caletones. Sólo la estación Sewell presenta subestimación en los resultados.

Esta sobrestimación es prácticamente homogénea para cada una de las estaciones dado que el valor absoluto del BIAS y el MAE presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-73).

Según los parámetros indicados en la Tabla 5-73 la estación con menor incertidumbre es la estación Sewell (con referencia en los valores de NMAE y NMSE). Además, presenta menos dispersión de datos (según el valor RMSE) y una mayor correlación (según valor IOA). A diferencia de casos anteriores, esta estación corresponde a la más cercana a las fuentes de emisión, sin embargo, esta distancia es de aproximadamente 7 kilómetros, por lo tanto, se puede definir como un punto de referencia alejado.

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-26) todas las estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático de la concentración.

A pesar de que las estaciones Coya Club y Población tengan ubicaciones cercanas, separadas por 1 km, la configuración de las rosas de vientos difiere, coincidiendo solamente en la presencia de vientos de dirección oeste. Esto podría deberse a que la estación Coya Población corresponde a una estación urbana. La rosa de vientos de la estación Sewell en cambio, coincide en la presencia del vector norte con la estación Coya Club, a pesar de que esta estación se ubica en un punto más alejado con respecto a las demás estaciones. En general, las estaciones de Coya son las que indican mayor incertidumbre según los valores de NMAE y NMSE.

Tabla 5-73 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Caletones

Estación	BIAS ¹	MAE ²	NMAE ³	RMSE ⁴	NMSE ⁵	IOA ⁶	Distancia (m)
Coya Club	0,1389	0,1393	13,447	0,1728	16,6787	0,08	13.368
Coya Población	0,056	0,0569	8,9427	0,0796	12,5183	0,06	12.776
Sewell	-0,0411	0,0543	0,8104	0,0701	1,0468	0,47	6.819

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Variación error concentración estaciones año 2020 Caletones



Figura 5-25 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Caletones 2020

Fuente: Elaboración propia

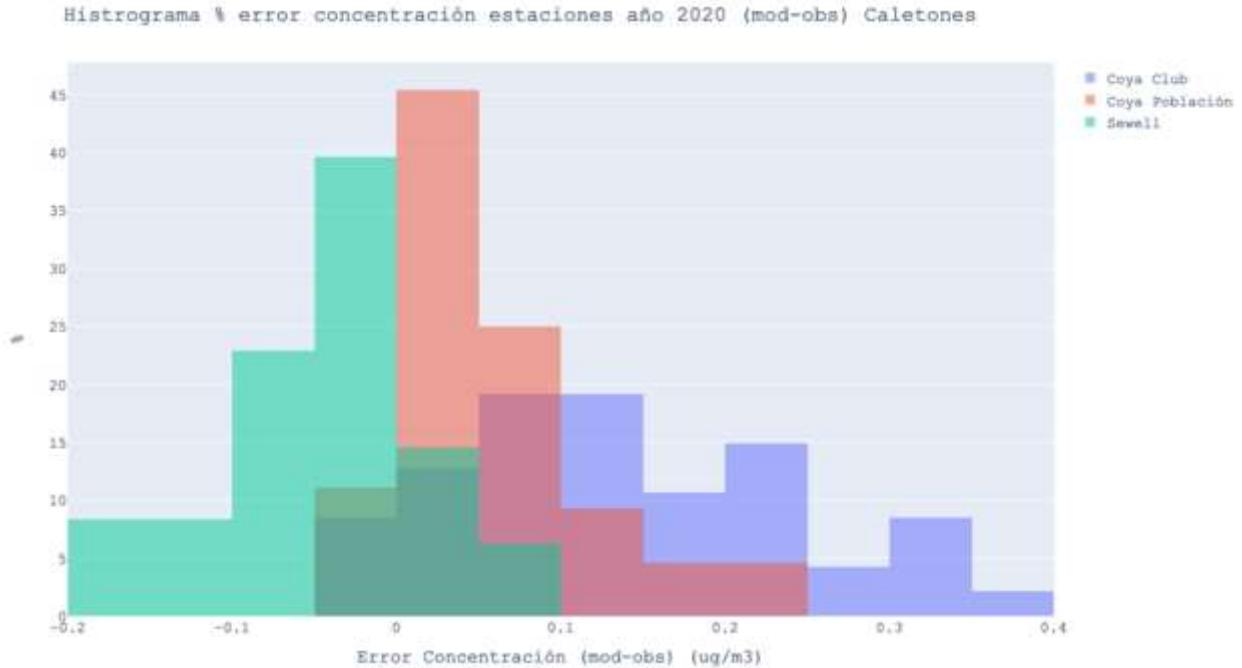


Figura 5-26 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Caletones 2020

Fuente: Elaboración propia

Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinó una estación representativa para este dominio de estudio en la localidad de Coya, como indica la Tabla 5-74.

Tabla 5-74 Estación representativa por localidad – Fundición Caletones

Fundición	Estación representativa	Localidad
Caletones	Estación Coya Población	Coya

Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\overline{C_{O_i}}$) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-75. Los datos de concentración observada (C_{O_i}) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

Tabla 5-75 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Caletones

Simbología	ITEM	Estación
		Coya Población
Co_i	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹	0,0064
β_i	Concentración o nivel basal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²	0,0018
\overline{Co}_i	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0046

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El nivel basal se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a la estación Coya Población. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-76.

Tabla 5-76 Factor de corrección por receptor – Fundición Caletones

Simbología	ITEM	Estación
		Coya Población
\overline{Co}_i	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0046
Cm_i	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0643
FC'_i	Factor de corrección	14,09

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-77).

Tabla 5-77 Factor FEC por fuente – Estación Coya Población, Fundición Caletones

Simbología	ITEM	Fuente		
		PLG1	PLG2	Fugitiva
Cm_{ij}	Concentración modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,0001	0,0001	0,0640
E_j	Emisiones (ton As/año)	0,4017	0,3636	66,27
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración	2.933	4.120,45	1.034,77

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Finalmente, se calcula el factor FEC' a partir de la Ecuación 20 y los valores FC y FEC indicados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-78.

Tabla 5-78 Factor FEC corregido por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Caletones

Simbología	ITEM	Fuente		
		PLG1	PLG2	Fugitiva
FEC_{ij}	Factor emisión-concentración (ton As·m ³ /μg·año)	2.933	4.120,45	1.034,77
FC'_i	Factor de corrección	14,09		
FEC'_{ij}	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m ³ /μg·año)	41.337,77	58.073,75	14.584

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

Tabla 5-79 Relación FEC por fuente – Fundición Caletones

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Coya Población	Coya	$C_{Coya} = \frac{E_{PLG1}}{41337,77} + \frac{E_{PLG2}}{58073,75} + \frac{E_{FUGITIVA}}{14584} + 0,0018$	Ecuación 35

Fuente: Elaboración propia

6. Propuestas regulatorias para la elaboración de una norma primaria de calidad del aire para arsénico

En el presente Capítulo se realiza una revisión de antecedentes internacionales (Sección 6.1 y Sección 6.2), así como de los riesgos asociados al arsénico (Sección 6.3 y Sección 6.4) para proponer tres alternativas regulatorias.

6.1 Escenario regulatorio internacional

En esta Sección se realiza una comparación de los diferentes niveles de concentración límite encontrados para arsénico. Dentro de estas concentraciones límites se incluyen tanto símiles de NPCA, pero también valores de referencia que no son normados como una NPCA, sino que operan como valores objetivos. En la mayor parte de los casos los límites son planteados considerando sus riesgos en salud, expresados como el riesgo individual incremental asociado a la exposición (ver Sección 6.3), pero también consideran las limitaciones técnicas y la diversidad territorial de los niveles de arsénico.

En la Tabla 6-1, se presentan los valores límites y tipos de denominaciones de estos límites recopilados en las normas internacionales revisadas⁶¹, donde se observa que todos ellos corresponden a estándares anuales cuyo enfoque es la protección de la salud a través del establecimiento de concentraciones límites de contaminantes en el aire como el As. Salvo en el caso de Massachusetts, EEUU, la mayoría de estos valores son iguales o cercanos a 6 ng/Nm³, lo que corresponde al “valor objetivo” establecido por la Directiva 2004/107/EC de la UE desde el año 2004 (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004). Al usar el término “valor objetivo”, esta directiva no lo define de manera específica pero deja claro que corresponde a un nivel de contaminante que, “con el fin de reducir al mínimo los efectos perjudiciales para la salud humana, prestando particular atención a los sectores vulnerables de la población, y el medio ambiente en su conjunto, del arsénico atmosférico, del cadmio, del níquel y de los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en el aire, [...] deberá alcanzarse en la medida de lo posible”, en un periodo determinado (Apartado 4 de esta directiva). Además, en el caso de esta norma europea, el valor límite que se fija⁶² para As corresponde al contenido promedio de este elemento como fracción de MP10 durante un año. Adicionalmente, esta directiva define

⁶¹ De las normas revisadas, se seleccionó a un subconjunto de regulaciones de interés, priorizando regulaciones aplicables en territorios con fundiciones de cobre, así como de países con mayor nivel de desarrollo en la gestión ambiental. En particular, se profundizan los casos de los siguientes países/regiones donde existen estándares de calidad de aire para arsénico: Canadá, China, Estados Unidos, y la UE. Para complementar este análisis sobre estándares de calidad del aire para As, se agregaron los casos de India, Israel y Nueva Zelanda (estos países no se consideran en el análisis de normas de emisiones internacionales porque, de acuerdo con las estadísticas analizadas, no cuentan con fundiciones de cobre).

⁶² Este valor aplica para todos los Estados Miembros de la UE, como Alemania, país que está entre los 15 mayores fundidores de cobre primario en el mundo y que está incluido en el análisis de la normativa internacional sobre emisión en el marco de este estudio.

métodos y criterios comunes de evaluación de las concentraciones de arsénico en el ambiente. Este mismo valor ha sido posteriormente establecido como estándar de calidad de aire para As por otros países en sus normativas respectivas (e.g. Israel, India). La diferencia entre los valores considerados dan cuenta de diferentes niveles de riesgos *aceptables* lo cual se profundiza con mayor detalle en la Sección 6.5.

Además, cabe destacar que estos estándares corresponden a valores de referencia, donde, en la mayoría de estas, se indica posibles exenciones o flexibilidad para las zonas o casos donde no se logran cumplir dichos estándares. Por ejemplo, en el caso de la regulación china (MEP, 2012) el valor se presenta de forma referencial y permite cierta flexibilidad para las ciudades que no pueden cumplir el estándar de calidad del aire para As, mediante la elaboración de un plan específico de gestión. De forma análoga, en la norma europea (2004) se establece que se informe toda superación anual del “valor objetivo” fijado para el As en esta, sin no obstante fijar ningún tipo de sanción en caso de no cumplimiento, dejando esta tarea a los Estados Miembros de la UE⁶³. La normativa exige que para las zonas donde se supere el valor objetivo, los Estados miembros deberán detallar las zonas e identificar las fuentes que contribuyen, además de “demostrar que aplican todas las medidas necesarias que no generen costos desproporcionados, dirigidas en partículas a las fuentes de emisión principales, para alcanzar los valores objetivos” (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004 Art.3).

Tabla 6-1 Tipos y valores límites anuales de concentración de As en el aire de fuentes internacionales [ng/Nm³]

País/Región	Valor límite [ng/Nm³]	Tipo de límite	Fuente
UE	6,0	<i>Target Value (TV)</i>	(Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004)
China	6,0	<i>Concentration Limit</i>	(MEP, 2012)
EEUU, Massachusetts	0,3	<i>Allowable Ambient Limit (AAL)</i>	(Massachusetts, 2011)
India	6,0	<i>Time-Weighted Average Concentration (TWA)</i>	(MOEF & CC & Government of India, 2019)
Israel	6,0	<i>Maximum Allowable Concentration (MAC)</i>	(Government of Israel, 2011)
Nueva Zelanda	5,5	<i>Ambient Air Quality Guideline</i>	(Ministry for the Environment & Government of New Zealand, 2002)

Nota: Dado que la mayoría de las regulaciones recopiladas se analizaron en idioma inglés, los tipos de límites presentados en esta tabla se proporcionan en este idioma, estos corresponden en la mayoría de los casos a su denominación original.

Fuente: Elaboración propia

⁶³ El artículo 9 de la regulación europea establece que “los Estados miembros establecerán las sanciones aplicables en caso de infracción de las disposiciones nacionales adoptadas con arreglo a la presente Directiva, y adoptarán todas las medidas necesarias para garantizar su cumplimiento. Las sanciones previstas deberán ser eficaces, proporcionadas y disuasorias” (2004).

En la Tabla 6-2 se presentan mayores detalles respecto de las normas para los países seleccionados. De ellas se destaca que sólo dos estados canadienses cuentan con valores límites para el arsénico en un periodo diferente al anual: de 24 horas. La justificación para la selección de este horizonte más corto sería por riesgos asociados a efectos no cancerígenos. En la Tabla 6-2, se profundizan los casos de los países/regiones seleccionados para este análisis sobre estándares de calidad del aire para As, a saber, Canadá, China, EEUU, la UE, y la India, Israel y Nueva Zelanda.

Tabla 6-2 Estándares de calidad del aire primarios de normativas internacionales para arsénico, según periodo de evaluación [ng/Nm³]

Período	Territorio	Valor límite [ng/Nm ³]	Información sobre el límite	Nombre y referencia de la regulación
24 h	Canadá, Manitoba	300,0	<i>Ambient Air Quality Guideline</i> que corresponde a la concentración de As en el aire que protege contra los efectos adversos para la salud, el medio ambiente o la estética (límite similar al límite de Ontario descrito a continuación pero no hizo el objeto de una revisión posteriormente al año 2005).	(Government of Manitoba, 2005)
	Canadá, Ontario	300,0	<i>Ambient Air Quality Criteria</i> (AAQC) que corresponde a la concentración de As en el aire que protege contra los efectos adversos para la salud, el medio ambiente o la estética. Este tipo de límite se utiliza para evaluar la calidad general del aire resultante de todas las fuentes de un contaminante del aire, más comúnmente en evaluaciones ambientales, estudios especiales que utilizan datos de monitoreo del aire ambiental, evaluación de la calidad general del aire en una comunidad e informes anuales sobre la calidad del aire en toda la provincia. Nota: Dado que los AAQC se basan en una revisión de información científica sobre los efectos de los contaminantes en la salud y el medio ambiente, pueden modificarse ocasionalmente en función de información científica nueva o relevante.	(MECP-Ontario, 2020)
Anual	UE	6,0	Valor objetivo de aire ambiental en contenido total en la fracción MP ₁₀ . La misma ley indica que se debe informar toda superación anual del valor objetivo del arsénico fijado por esta, indicando las causas de la superación y la zona afectada así como una breve evaluación en relación con el valor objetivo, y datos pertinentes sobre los efectos en la salud y sobre el impacto en el medio ambiente.	Directive 2004/107/EC (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004)
	China	6,0	Esta norma es de carácter obligatorio, sin embargo, se indica que <u>las ciudades clave para la prevención y el control de la contaminación del aire</u> que no cumplan con este estándar podrán obtener ciertas flexibilidades (ver nota). El valor límite establecido aplica para todo tipo de área, y corresponde a la media aritmética de la concentración media de cada día en un año natural. Nota: En caso de no poder cumplir, se deberá formular un plan para alcanzar el estándar dentro de un límite de tiempo, en el que se podrá adoptar medidas más estrictas de conformidad con la autorización o reglamentos aplicables para alcanzar la norma a tiempo.	Tabla A.1 Límites de concentración de referencia de cadmio, mercurio, arsénico, cromo hexavalente y fluoruro en el aire ambiente. (MEP, 2012)

Período	Territorio	Valor límite [ng/Nm ³]	Información sobre el límite	Nombre y referencia de la regulación
	EEUU, Massachusetts	0,3	<p><i>Allowable Ambient Limit</i> (AAL, por sus siglas en inglés) establecido en base a fuentes oficiales como valor referencial para proteger a la población en general, incluidas las poblaciones sensibles, de los efectos adversos para la salud de la inhalación del As en el aire.</p> <p>Nota: No se encontraron casos de exenciones asociados a la aplicación de este estándar.</p>	(Massachusetts, 2011)
	India	6,0	Media aritmética anual de un mínimo de 104 mediciones en un año en un sitio particular tomadas dos veces por semana, durante 24 horas a intervalos uniformes. No queda claro cómo se manejan los casos de no cumplimiento.	(MOEF & CC & Government of India, 2019)
	Israel	6,0	“Valor ambiental” de concentración máxima permitida de As en material particulado de menos de 10 micrómetros suspendido en el aire. Esta se debe calcular promediando valores de concentraciones promedio diarias (al menos 18 valores de concentraciones máximas diarias promedio). En este caso se permite una serie de anomalías por año. Este reglamento tiene vigencia hasta el 22 de marzo de 2027.	(Government of Israel, 2011)
	Nueva Zelanda	5,5	Valor referencial ambiental basado en un valor de riesgo aceptable de 1 en 100.000 para un carcinógeno de alto nivel. Valor de referencia que debe usarse para dirigir la gestión de cuencas atmosféricas y evaluar los resultados del monitoreo de la calidad del aire ambiental. En general, cuando los niveles de contaminantes excedan los valores de referencia, se deben realizar evaluaciones más detalladas de los riesgos para la salud y tenerlas en cuenta en la planificación de actividades.	(Ministry for the Environment & Government of New Zealand, 2002)

(*) Los umbrales presentados en esta tabla determinan el uso exclusivo de técnicas de modelización o estimación objetiva para evaluar la calidad del aire ambiente.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-3, se presentan países/regiones donde existen límites de concentración anuales de arsénico en el aire que contribuyen a regular la calidad del aire a través de condiciones que aplican para la construcción, modificación y/o operación de fuentes emisoras de contaminantes como el As. En esta comparación se incorporó al caso de como país latinoamericano y limítrofe con Chile, a pesar de no ser un actor mundial relevante de la fundición de cobre.

Se destaca que los valores límites recopilados son variables de un país al otro; el rango de estos valores se sitúa entre 0,20 ng/Nm³ (Michigan, y Rhode Island, EEUU) y 50 ng/Nm³ (Bolivia). En particular, se destaca un grupo de valores límites bajos que se sitúan entre 0,20 ng/Nm³ y 0,30 ng/Nm³ que aplican en estados de EEUU (Michigan, Rhode Island, Vermont, Washington), donde 0,20 ng/Nm³ corresponde al mayor nivel de exigencia existente a la fecha en materia de arsénico en el aire en los países estudiados. A su vez, el caso de Bolivia corresponde al menos exigente en la materia. Asimismo, es interesante notar que Alberta, Canadá, y New Hampshire, EEUU, poseen estándares de As en el aire que son de un orden de magnitud comparable al de Bolivia (10 y 24 ng/Nm³ respectivamente). Estos valores se relacionan directamente con los coeficientes de riesgo de inhalación (IUR – ver Sección 6.3) considerados y el nivel de riesgo *aceptable* (mayor detalle en la Sección 6.5).

También, como ejemplo interesante, se recopiló el caso de Michigan, EEUU donde las *Michigan's Air Toxic Rules* del *Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy* (EGLE, por sus siglas en inglés) establecen que, cualquier unidad o unidades de emisión nuevas o modificadas, para las que se requiere una solicitud de permiso de instalación y que emiten algún contaminante tóxico del aire⁶⁴ como el As, están sujetas a los requisitos de la regulación sobre sustancias tóxicas del aire. Esta incluye dos requisitos básicos, primero, cada fuente debe aplicar la mejor tecnología de control disponible para tóxicos (abreviada T-BACT en dicha norma), y luego de la aplicación de la T-BACT, las emisiones del contaminante tóxico del aire no pueden resultar en una concentración ambiental máxima que exceda el nivel de detección basado en la salud aplicable.

Para el As, existen dos tipos de límites establecidos en Michigan, que son el Nivel de detección de riesgo inicial (*Initial Risk Screening Level*, IRSL, por sus siglas en inglés) y el Nivel de detección de riesgo secundario (*Secondary Risk Screening Level*, SRSL, por sus siglas en inglés). El IRSL corresponde al nivel de detección basado en la salud para los efectos cancerígenos que se define como un aumento del riesgo de cáncer de uno en un millón (10⁻⁶), mientras que el SRSL corresponde al nivel de detección basado en la salud para los efectos cancerígenos que se define como un aumento del riesgo de cáncer de uno en cien mil (10⁻⁵). El IRSL aplica solo para fuentes nuevas o modificadas sujetas a la solicitud del permiso. Si el solicitante no puede demostrar que las emisiones de As cumplen con el IRSL, puede optar por demostrar el cumplimiento del límite

⁶⁴ Estos se definen como cualquier contaminante del aire para el cual no existe un estándar nacional de calidad del aire ambiental y que es o puede llegar a ser dañino para la salud pública o el ambiente cuando está presente en la atmósfera exterior en cantidades y duración suficientes.

SRSL, sin embargo, en este caso debe incluir todas las fuentes de ese contaminante tóxico del aire emitido por la planta, no solo la unidad de emisión en cuestión.

Adicionalmente, es interesante observar que Carolina del Norte, EEUU, posee también un enfoque en torno al cumplimiento de los límites de concentración de contaminantes del aire por las fuentes emisoras. Sin embargo, en dicho caso, si bien el estándar de calidad del aire para arsénico es un nivel ambiental aceptable (AAL, por sus siglas en inglés), hay instalaciones, fundiciones de cobre incluidas, que no están afectas al estándar de calidad de arsénico en el aire establecido.

Tabla 6-3 Valores límites de contribución a la concentración anual de As en el aire con enfoque entorno a las fuentes emisoras de contaminantes [ng/Nm³]

País, Región	Valor límite [ng/Nm ³]	Tipo de Límite	Información sobre el límite	Nombre y fuente de la regulación
EEUU, Carolina del Norte	2,10	Allowable Ambient Limit (AAL)	Nivel ambiental aceptable. Si existe una evidencia por escrito de que una fuente que emite As presenta un riesgo inaceptable para la salud humana según los AAL de la norma o estudios epidemiológicos, se requiere que el propietario u operador de la fuente presente una solicitud de permiso operar. En el caso contrario las fuentes emisoras no requieren realizar dicho trámite.	(Government of North Carolina, 2018)
EEUU, Michigan	0,20	Initial Risk Screening Level (IRSL)	Nivel de detección basado en la salud para los efectos cancerígenos que se define como un aumento del riesgo de cáncer de uno en un millón (10 ⁻⁶). El solicitante de unidades emisoras debe demostrar el cumplimiento de este límite ante las autoridades.	(EGLE, 2004)
EEUU, Michigan	2,00	Secondary Risk Screening Level (SRSL)	Nivel de detección basado en la salud para los efectos cancerígenos que se define como un aumento del riesgo de cáncer de uno en cien mil (10 ⁻⁵). El solicitante de unidades emisoras puede optar por demostrar el cumplimiento del límite SRSL cuando no puede demostrar que las emisiones del contaminante tóxico del aire cumplen con el IRSL. En este caso, el solicitante debe incluir todas las fuentes de As emitido al aire por la planta, y no solo la unidad de emisión permitida.	(EGLE, 2004)
EEUU, Luisiana	20,00	Ambient Air Standard (AAS)	Valor con base en factores de riesgo unitarios y un riesgo residual de uno en diez mil, u otros datos que la autoridad administrativa determine superiores. En casos particulares, los dueños/operadores de instalaciones pueden obtener autorizaciones de exceder el estándar de aire, cuando logren demostrar alternativamente que: <ul style="list-style-type: none"> - El cumplimiento de un estándar de aire ambiente sería económicamente inviable; - No se puede esperar razonablemente que las emisiones de la fuente supongan una amenaza para la salud pública o el medio ambiente; - Las emisiones de la fuente serían controladas a un nivel que sea la tecnología de control máxima alcanzable (norma LAC 33 :III.5109.B). Nota: La autoridad administrativa deberá publicar un aviso público y celebrar una audiencia pública sobre cualquier posible autorización asociada, la cual estará sujeta a revisión cada cinco años o en cualquier otro momento que la autoridad administrativa considere apropiado.	(Government of Luisiana, 2004)

País, Región	Valor límite [ng/Nm ³]	Tipo de Límite	Información sobre el límite	Nombre y fuente de la regulación
EEUU, New Hampshire	24,00	Allowable Ambient Limit (AAL)	Límite de aire ambiente. Si el propietario u operador de un proceso o dispositivo existente no puede demostrar el cumplimiento de los AAL, entonces el propietario u operador deberá cumplir con otras regulaciones (Env-A 1405.04 y Env-A 1406.02). En particular, esta regulaciones indica que quedan exentas las emisiones de un contaminante atmosférico peligroso (HAP), de un proceso o dispositivo, siempre y cuando dicho proceso o dispositivo use el equipo de control de contaminación necesario para cumplir con una norma nacional de emisión para HAP según lo codificado en 40 CFR 61 (esta norma incluye las funciones de cobre).	(Government of New Hampshire, 2004)
EEUU, Rhode Island	0,20	Allowable Ambient Limit (AAL)	El Nivel Ambiental Aceptable es la concentración máxima en el aire ambiente de As que puede ser aportado por una fuente estacionaria, en o más allá de la línea de propiedad de esa instalación, promediada durante un año. Nota: En Rhode Island existe además un Nivel Ambiental Aceptable horario igual a 200 ng/m ³ .	<i>Rhode Island Air Toxics. Guideline</i> (DEM-RI, 2008)
EEUU, Vermont	0,23	Hazardous Ambient Air Standard (HAAS)	Límite basado en un nivel estimado para corresponder a un riesgo carcinogénico adicional durante la vida de uno en un millón, suponiendo una exposición continua por inhalación. Es un “Estándar de impacto de aire peligroso de fuente estacionaria”, correspondiente a una concentración en el aire de As atribuible a los impactos en la calidad del aire de una fuente estacionaria, junto con los impactos de otras fuentes estacionarias. Se establece que no se podrá causar, ni permitir la descarga de ningún contaminante peligroso del aire de una fuente estacionaria que cause o contribuya a concentraciones en el aire ambiente que excedan dicho estándar. Nota: Las autoridades pueden requerir que el propietario u operador de una fuente fija presente una evaluación de impacto en la calidad del aire. Si se determina, a través del monitoreo de la calidad del aire, que la concentración anual de As ha excedido su estándar de aire ambiente peligroso, se deberá adoptar un Plan de Acción Tóxica (TAP) para el contaminante. Cada TAP deberá contener una estrategia para reducir las concentraciones del contaminante en el aire.	(Government of Vermont, 2018)

País, Región	Valor límite [ng/Nm ³]	Tipo de Límite	Información sobre el límite	Nombre y fuente de la regulación
EEUU, Washington	0,30	Acceptable source impact analysis (ASIL)	<p>Concentración de detección de As emitido por fuentes en el aire. Esta norma (capítulo WAC 173-460-010) exige el control sistemático de fuentes nuevas o modificadas que emiten contaminantes atmosféricos tóxicos (TAP) como el As, con el fin de prevenir la contaminación del aire, reducir las emisiones en la medida de lo razonablemente posible y mantener tales niveles de calidad del aire con el fin de proteger la salud humana y la seguridad.</p> <p>Se establece la necesidad de cumplir con tres requisitos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Utilizar la mejor tecnología disponible para el control de sustancias tóxicas (BAT, por sus siglas en inglés); - Cuantificación de las emisiones de contaminantes atmosféricos tóxicos; - Demostración de protección de la salud y seguridad humana. 	(Government of Washington, 2004)
Canadá, Alberta	10,00	Ambient Air Quality Objectives (AQOs)	<p>Valor objetivo de calidad del aire adoptado de Texas, con el propósito de ser utilizado para determinar la adecuación del diseño de las instalaciones industriales, para establecer las alturas requeridas de las chimeneas y otras condiciones de liberación, y para evaluar el cumplimiento y evaluar el desempeño de las instalaciones.</p> <p>Nota: Este valor objetivo fue establecido en base a una evaluación de factores científicos, sociales, técnicos y económicos.</p>	(Government of Alberta, 2005)
Canadá, Quebec	2,00	Initial Concentration (Ci)	<p>Valor de concentración inicial (Ci) establecido por defecto.</p> <p>Nota: Este valor se usa como Ci de As en la atmósfera en el caso de la construcción o modificación de una fuente estacionaria de contaminación, o de un aumento de producción, solo si no se dispone de resultados de muestreos realizados o validados por las autoridades para la totalidad o parte de los 3 años previos a la construcción o modificación de dicha fuente estacionaria, y tomados en el lugar de la fuente o en un entorno comparable.</p>	<i>Schedule K, Air Quality Standards and Schedule G, Metals and Metalloids in Air</i> (Government of Quebec, 1979)

País, Región	Valor límite [ng/Nm ³]	Tipo de Límite	Información sobre el límite	Nombre y fuente de la regulación
	3,00	Limit Value (LV)	<p>Concentración límite (promedio en 1 año), calculada de la base del Ci calculada o por defecto.</p> <p>En el caso de la construcción o modificación de una fuente estacionaria de contaminación o un aumento en la producción de un bien o servicio, la concentración de As en el aire debe respetar este límite. Si se determina que es probable que este límite se sobrepase, entonces se prohíbe la construcción, modificación de una fuente estacionaria, o aumento en la producción.</p> <p>Nota: Dicha concentración de As en la atmósfera se calcula sobre la base de la concentración inicial (ver Ci), para un punto fuera de los límites del predio ocupado por la fuente de contaminación y fuera de un sector zonificado para fines industriales, o en una zona de amortiguamiento adyacente a dicho sector, según lo establecido por las autoridades municipales competentes.</p>	(Government of Quebec, 1979)
Bolivia	50,00	Maximum Allowable Concentration (MAC)	<p>Valor referencial durante cinco años, a partir de lo cual entrará en vigor como valor límite permisible de calidad del aire para contaminante específico. En las zonas donde se dicho límite, las fuentes fijas deben elaborar un programa calendarizado de medidas para lograr niveles de emisión compatibles con los objetivos de calidad de aire. Se admite una variación del valor de hasta +10%.</p>	(Gobierno de Bolivia, 1995)

Fuente: Elaboración propia

Como producto de las comparaciones anteriores, cabe destacar que EEUU no cuenta con un estándar de calidad del aire para arsénico a nivel federal, aunque en ciertos estados del país si existen normas de este tipo. Se destaca, sin embargo, en las regiones donde se ubican las fundiciones de cobre, no se encontraron regulaciones de este tipo. Entre los estados que sí tienen valores límites de calidad del aire para arsénico, con enfoque en torno a las fuentes emisoras contaminantes de As, se destaca por ejemplo Rhode Island donde el valor establecido como estándar de As en el aire al año corresponde a 0,20 ng/m³. Tal como mencionado anteriormente, se observa el mismo valor en el estado de Michigan, y un valor parecido en Vermont (0,23 ng/m³), o de un orden de magnitud muy cercano como en Washington (0,30 ng/m³).

También hay menos un caso donde el estándar de arsénico en el aire es sustancialmente mayor a los valores descritos anteriormente como en Luisiana (20 ng/m³) y New Hampshire (24 ng/m³). Además, en EEUU, se destaca el caso de Massachusetts cuyo estándar tiene un orden de magnitud parecido a los estados que establecen estándares exigentes para el As en el aire pero que no posee un enfoque entorno a fuentes emisoras de contaminantes, sino que está solo orientado a la obtención de un aire ambiente limpio para proteger la salud de las personas.

6.2 Comparación de beneficios estimados en evaluaciones internacionales

En cuanto a evaluaciones internacionales de regulaciones de la concentración ambiental de arsénico, en la propuesta de la Directiva 2004/107/CE⁶⁵ relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente, se realizó una evaluación económica de los límites propuestos. Para realizar este análisis, la Comisión Europea pidió a una empresa consultora que realizara el estudio *“Economic evaluation of air quality targets for heavy metals”* (Entec UK Limited, 2001). En este documento se evalúa específicamente la posible definición de valores límite para las concentraciones de arsénico, cadmio y níquel en el aire⁶⁶. A continuación, se detalla la metodología utilizada para la estimación de los beneficios.

⁶⁵ En esta sección se revisa la propuesta y el reporte final de la evaluación económica realizado por Entec UK Limited, dado que los antecedentes que justifican la directiva definitiva no se detallan en la Directiva final, pero sí en la propuesta.

⁶⁶ Cabe destacar la propuesta desarrollada por la CE consideraba múltiples contaminantes atmosféricos asociados a la operación de diversas fuentes emisoras, no solo aquellas relacionadas con la producción de cobre. Específicamente, respecto a las emisiones de arsénico, en la propuesta de la Directiva 2004/107/CE se indica que para 1990 se calcularon 575 toneladas de arsénico emitidas, de las cuales 86% serían de fuentes fijas, sin embargo, estas emisiones no afectarían de manera relevante las concentraciones en el aire ambiente, por ser liberadas mediante chimeneas suficientemente altas. Por el contrario, las emisiones fugitivas de arsénico, provenientes principalmente de la industria del hierro y acero, del cobre y del plomo, son las más importantes para la calidad del aire ambiente, aun cuando representan el 9% de las emisiones.

En el documento mencionado se afirma que los efectos negativos más importantes de la exposición prolongada al arsénico son cánceres de pulmón y piel, donde se afirma que tienen mayor importancia los efectos cancerígenos por inhalación que aquellos asociados a la ingesta. Por lo anterior, los efectos cancerígenos por inhalación son los principales considerados en la estimación de los beneficios en salud de los límites definidos por la regulación.

Bajo el supuesto de que el arsénico es un cancerígeno genotóxico para los humanos —es decir, que puede dañar el ADN—, la evaluación del riesgo para la salud humana debiera realizarse según el enfoque de riesgo unitario, dado que no existiría un nivel umbral por debajo del cual no existirían efectos. Considerando el valor de riesgo unitario propuesto por la OMS para el arsénico, $1,5 \times 10^{-3} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ el riesgo adicional de contraer cáncer de pulmón si se está expuesto de forma continuada a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante toda la vida⁶⁷, este se traduce en una concentración media anual de $0,66 \text{ ng}/\text{m}^3$ (para mayor profundización sobre los riesgos unitarios, ver la Sección 6.3). Sin embargo, dada la probable existencia de un umbral, el grupo de trabajo consideró que el enfoque del riesgo unitario sobrestimaría el verdadero riesgo, y la mayoría de los miembros apoyaron el uso de un enfoque de "pseudoumbral" y concluyeron que concentraciones medias anuales totales de arsénico inferiores a una franja de 4 a $13 \text{ ng}/\text{m}^3$ reducirían al mínimo los efectos perjudiciales para la salud humana.

En el análisis realizado, se calcularon los costes y beneficios para lograr cinco niveles de concentración posibles: $20 \text{ ng}/\text{m}^3$, $13 \text{ ng}/\text{m}^3$, $5 \text{ ng}/\text{m}^3$, $4 \text{ ng}/\text{m}^3$, y $1 \text{ ng}/\text{m}^3$. Para el menor nivel se consideró técnicamente imposible en casi todos los emplazamientos para el año objetivo 2010. En dos casos, una instalación de producción de cobre y una de producción de plomo, el cierre de las plantas se consideró la única forma de lograr incluso el más elevado de estos valores, $20 \text{ ng}/\text{m}^3$. Como referencia en la Tabla 6-4 se muestran los costos estimados para cada caso, específicamente para la industria de producción de cobre.

⁶⁷ Se asume una longevidad promedio de 70 años.

Tabla 6-4 Costos estimados del cumplimiento de los valores límite de arsénico propuestos, para la industria de producción de cobre, y cantidad de sitios en que se espera que se pueda cumplir el límite indicado [millones EUR/año]

Escenario	20 ng/m ³	13 ng/m ³	5 ng/m ³	4 ng/m ³	1 ng/m ³
BAU	Se espera que este límite lo cumplan 2 sitios de los 4 para los cuales se tienen antecedentes (1 de Suecia o Finlandia, y uno de Alemania, no especificados).	Se espera que este límite lo cumpla 1 sitio de los 4 para los cuales se tienen antecedentes (1 de Bélgica).	S/I	S/I	S/I
Con inversión adicional a BAU	Es poco probable que se pueda lograr para al menos 1 de 9 instalaciones (no especificada).	16 (tasa descuento 2%) 17 (tasa descuento 4%) 19 (tasa descuento 6%) Se espera que este límite lo cumplan 3 sitios de los 4 para los cuales se tienen antecedentes (no especificados).	Para todas las instalaciones es poco probable que se pueda lograr este límite.	Para todas las instalaciones es poco probable que se pueda lograr este límite.	Para todas las instalaciones es poco probable que se pueda lograr este límite.

Nota 1: Las cifras son las mejores estimaciones. Las estimaciones superiores son +50%; las estimaciones más bajas son -50%.

Nota 2: Las cifras se estiman como totales para los 9 sitios identificados, a partir de antecedentes disponibles para 3 de ellos.

Nota 3: En la evaluación se toma el supuesto de que hay 150 mil personas en el área de influencia de cada sitio.

Fuente: (Entec UK Limited, 2001)

Para valorizar los beneficios asociados a los efectos cancerígenos, en el documento de Entec UK Limited (2001) se estimó el beneficio de prevenir una fatalidad estadística (VPF, por su sigla en inglés). Para esto, se parte del resultado de una valoración contingente de prevenir un fallecimiento estadístico por accidente de tránsito, 1 millón de euros, con rango de valores entre 0,65 millones de euros y 2,5 millones de euros. Este valor se debe ajustar según si la población afectada incluye todas las edades (que se ajustaría con un factor de 1,43) o si corresponde a adultos mayores. Adicionalmente, se agrega un 50% extra al valor, asociado a que las personas pueden estar dispuestas a pagar más para reducir el riesgo de morir de cáncer que para reducir el riesgo de sufrir un ataque cardíaco fatal, porque la muerte por cáncer puede estar precedida por un largo período de enfermedad grave. También se realiza un ajuste, asumiendo que habría una espera de 10 años para empezar a observar estos impactos. El resultado obtenido se trae al presente con una tasa de descuento de 4%, realizando un análisis de sensibilidad con 2%. De este modo, obtienen valores de VPF de 1,8 millones de euros, entre un rango desde 0,9 millones de euros a 4,4 millones de euros. Respecto a la aplicabilidad de este método, los autores indican que, dado que este método se basa en pequeños cambios en el riesgo en grandes poblaciones, se reducirá su aplicabilidad a este estudio, por no tratarse de poblaciones tan grandes. Adicionalmente, destacan que la disposición a pagar por parte de una población más pequeña para reducir el riesgo de fatalidad puede superar las cifras de VPF obtenidas en esta estimación.

En la evaluación económica de la Directiva 2004/107/CE, junto con los beneficios en salud por cáncer, también se consideran los efectos no cancerígenos del arsénico debido a la absorción oral y por inhalación. En particular, para definir niveles límite de concentración atmosférica para prevenir los efectos no cancerígenos, se utilizan tres valores:

1. LOAEL (nivel más bajo de efectos adversos observados, por su sigla en inglés): Es la concentración más baja a la que se ha observado un efecto adverso.
2. NOAEL (nivel sin efecto adverso observado, por su sigla en inglés): Es una concentración teórica a la que no se producirá ningún efecto adverso. El valor en sí no se puede medir en realidad, por lo que se calcula a partir del LOAEL utilizando factores de seguridad basados en la experiencia y el juicio.
3. Valor límite: El valor límite en sí se deriva del NOAEL, nuevamente utilizando factores de seguridad basados en la experiencia y el juicio.

De este modo, si bien los valores límite de efectos no cancerígenos se han establecido para proteger la salud humana, es el NOAEL el que se considera más apropiado para cuantificar los efectos reales sobre la salud humana, y es probable que sea considerablemente más cercano al nivel umbral de los efectos. El valor límite incorpora un factor de incertidumbre adicional para proteger a la población general por un margen.

Para los efectos no cancerígenos asociados a las concentraciones atmosféricas de arsénico se define un LOAEL igual a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, basado en efectos cardiovasculares y neuropatía periférica en trabajadores. Luego, el NOAEL se estima en $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, basado en el promedio de LOAEL para la población general (factor de 5) y la consideración de los efectos vasculares del arsénico (factor de 10). Finalmente, el valor límite resultante es $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, basado en un factor de seguridad para tener en cuenta la variación intraespecie (factor de 10).

Sin embargo, las concentraciones ambientales en las proximidades de los sitios de interés se consideran, en casi todos los casos, por debajo de los umbrales críticos de efectos no carcinogénicos para la salud, por lo que estos beneficios no se percibirían en la población afectada según los autores.

Otros posibles beneficios asociados al cumplimiento de los valores límites identificados, pero no cuantificados ni valorizados, incluyen los siguientes:

- reducción de los efectos adversos para la salud debido a la reducción de la exposición a otros metales (como plomo, mercurio, entre otros);
- efectos reducidos de mortalidad y morbilidad debido a reducciones en la exposición a MP10;
- reducción de impactos adversos en ecosistemas y cultivos; y
- exposición ocupacional reducida a contaminantes metálicos cancerígenos (potencialmente importante donde se logra un mejor control sobre las emisiones fugitivas).

Por lo tanto, sobre la base de las consideraciones anteriores, los beneficios cuantificados presentados pueden ser subestimaciones significativas de los beneficios totales. De esto modo, si bien los costos superan los beneficios cuantificables específicos de la reducción de cánceres debido a la exposición al arsénico, cadmio y níquel, habrá otros importantes beneficios ambientales secundarios al mejorar la calidad del aire de estos metales, aunque estos no se hayan podido valorizar.

En la siguiente Tabla 6-5 se resumen los beneficios considerados en la evaluación económica de la propuesta de la Directiva 2004/107/CE. Se observa que en el documento revisado se cuantifica y valoriza el beneficio en reducción de cáncer por inhalación de arsénico, pero no los beneficios por reducción de cáncer u otras enfermedades asociadas a la exposición a otros metales u MP10, donde el impacto en cáncer se valoriza para la población residente cercana a las fundiciones, pero no en los trabajadores de estas; estos últimos beneficios mencionados solo se identifican. Se destaca que, si bien se cuantifica e incluso da un valor monetario a los efectos no cancerígenos por exposición a crónica a arsénico en los residentes, por considerarse que la población beneficiada es muy pequeña para utilizar el método encontrado, no se estima un beneficio total asociado a este efecto. Junto con lo anterior, cabe destacar que no fueron identificados beneficios por reducción de efectos agudos en salud por exposición a arsénico, ni tampoco por reducir la exposición a MP2,5.

Tabla 6-5 Síntesis de estado de cuantificación y valorización de cada beneficio identificado en la evaluación económica de la Directiva 2004/107/CE

Motivo	Efecto	Identificación	Cuantificación	Valorización
Exposición crónica a arsénico	Cáncer de pulmón por inhalación en población residente	✓	✓	✓
	Efectos no cancerígenos en población residente	✓	✓	x
	Exposición ocupacional, principalmente por emisiones fugitivas	✓	x	x
Exposición aguda a arsénico	Enfermedades varias	x	x	x
Exposición a otros metales	Enfermedades varias por exposición a plomo, mercurio, entre otros metales	✓	x	x
Exposición a MP10	Enfermedad y morbilidad	✓	x	x
Exposición a MP2,5	Enfermedad y morbilidad	x	x	x
Exposición a arsénico en ecosistemas	Impactos adversos en ecosistemas y cultivos	✓	x	x

Fuente: Elaboración propia

La evaluación económica total se realizó bajo la hipótesis de que la aplicación de las mejores técnicas disponibles (BAT, por su sigla en inglés) en las nueve refinерías de cobre más importantes

de la Europa de los 15⁶⁸ podía lograr concentraciones máximas en el aire ambiente de entre 10 y 20 ng/m³. Por una parte, se estimó en 19 millones de euros anuales el coste de alcanzar el nivel de la franja en el sector del cobre. Por otra parte, los beneficios resultantes del descenso de la mortalidad debido al logro de un nivel de concentración entre 4 y 13 ng/m³ se calculó equivalente a 0,1 millones de euros al año. Por lo anterior, el estudio concluyó que “en los lugares donde podrían aplicarse técnicas para lograr el cumplimiento, los costes contrarrestaban claramente los beneficios específicos cuantificables”. De hecho, la propuesta estipula en sus objetivos que “no existen medidas rentables para lograr en todo lugar los niveles de concentración que no causen efectos perjudiciales para la salud humana”.

6.3 Coeficientes de riesgo unitario para concentración de arsénico en el aire

El efecto crítico a la salud por la exposición al arsénico en el aire es el cáncer de pulmón, y su caracterización se realiza mediante la estimación del riesgo incremental de cáncer que corresponde al incremento en la probabilidad de un individuo de desarrollar cáncer por la exposición a un compuesto cancerígeno. El riesgo de cáncer individual estimado se expresa como el límite superior de la probabilidad de que una persona pueda desarrollar cáncer a lo largo de su vida como resultado de exposición.

Este riesgo pronosticado es el **riesgo incremental de cáncer**⁶⁹ a partir de la exposición que se estima está por encima del riesgo base (asociado a problemas no relacionados con los tóxicos del aire) que ya tienen los individuos de la población (US-EPA, 2004). El valor de dosis-respuesta del cáncer por inhalación es obtenido por extrapolación lineal y corresponde al riesgo unitario de cáncer (IUR por su sigla en inglés *inhalation unit risk*). Este se presenta como una estimación del límite superior del exceso de riesgo de cáncer resultante de toda una vida de exposición continua a un agente en una concentración de 1 µg/m³ en el aire.

Debido a la naturaleza de las suposiciones en su derivación, los riesgos de IUR generalmente se consideran estimaciones de potencia de "límite superior plausible". Como tal, los riesgos calculados suelen ser una estimación conservadora (US-EPA, 2004).

En la Sección 4.3, tras presentar la evidencia existente de los efectos en salud del arsénico, se presentan coeficientes de riesgo recomendados por diferentes instituciones. Los valores recomendados van entre 0,2e-6 a 4,3e-6 por cada ng/m³ adicional de arsénico.

⁶⁸ La Europa de los 15 incluye Francia, Alemania, Italia, Bélgica, Holanda y Luxemburgo, Dinamarca, Reino Unido, Irlanda, Grecia, España, Portugal, Suecia, Finlandia y Austria.

⁶⁹ El Riesgo incremental de cáncer (*incremental lifetime cancer risk*) se define como el nivel de riesgo para compuestos cancerígenos y corresponde al incremento en la probabilidad de un individuo de desarrollar cáncer por la exposición a un compuesto cancerígeno.

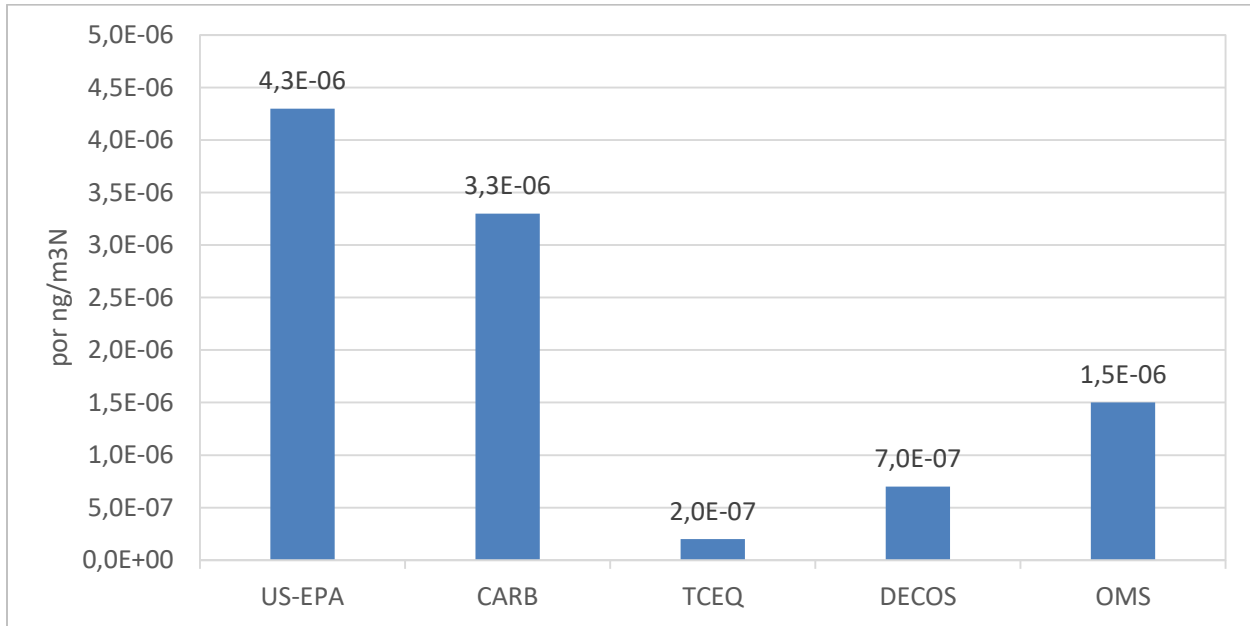


Figura 6-1 Coeficientes de riesgos para cáncer identificados

Fuente: Elaboración propia en base a fuentes especificadas en Tabla 4-25

Para los coeficientes considerados esta relación es lineal y se ilustra en la Figura 6-2 para los coeficientes de riesgo de la EPA y de la OMS. De esta forma se observa que para un riesgo dado el coeficiente recomendado por la OMS permite estimar un nivel de concentración ~3 veces mayor ($4,3/1,5=2,87$) que el valor estimado considerando el coeficiente de riesgo de la US-EPA.

Es relevante destacar que para el arsénico ninguno de los antecedentes presentados recomienda un umbral sobre el cual no existe riesgo, sino que la relación entre riesgo y concentraciones de arsénico se considera lineal para cualquier concentración de arsénico en el aire.

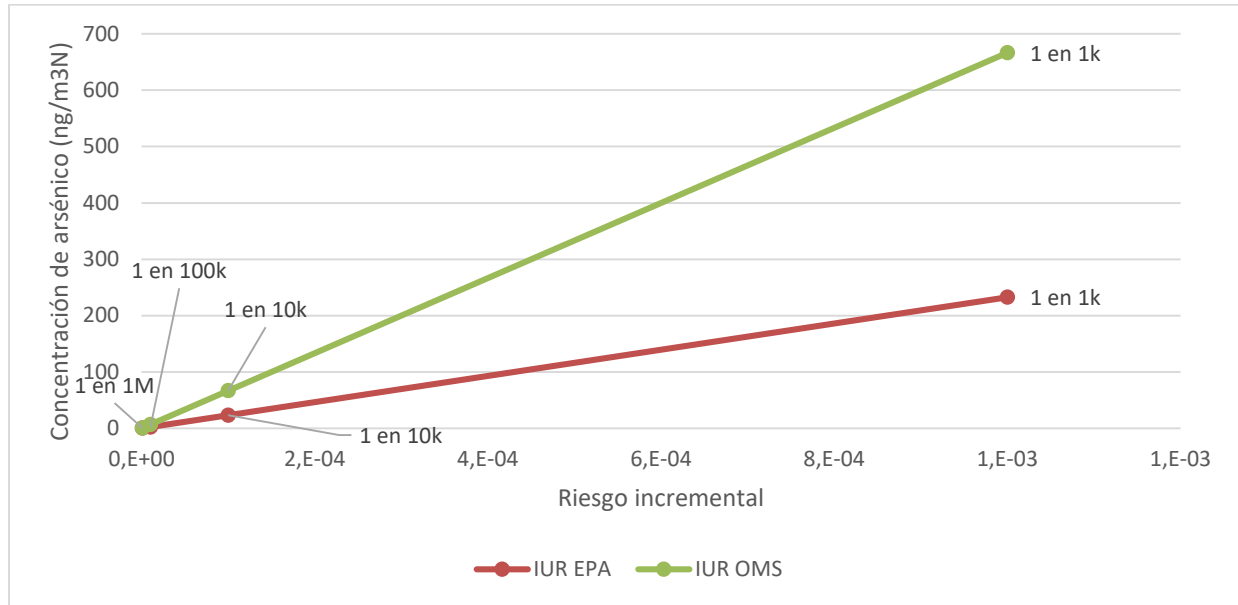


Figura 6-2 Relación entre riesgo incremental y concentraciones de arsénico para coeficientes de riesgo de US-EPA y de la OMS

Fuente: Elaboración propia

Respecto a cuál valor utilizar para la evaluación a nivel local, se preseleccionan previamente los valores recomendados por la US-EPA y la OMS, pues son presentados por instituciones con amplia reputación cuyas estimaciones se derivan del metanálisis de múltiples estudios. De ellos se selecciona el valor recomendado por la US-EPA por las siguientes razones:

- El valor se deriva de un metanálisis de artículos científicos desarrollados en dos fundiciones de cobres en EE.UU. (US-EPA, 1988). En una de las fundiciones se cuenta con dos estudios que tienen una media geométrica de $7,2e-6$ por ng/m^3N , mientras que en la segunda fundición la media geométrica fue de $2,6e-6$ por ng/m^3N .
- La actual norma de fundición plantea límites de emisión de arsénico equivalentes a los límites de arsénico establecidos en la normativa de Estados Unidos, los cuales fueron evaluados con dicho valor.
- Los coeficientes de riesgos utilizados para la evaluación de otros riesgos en salud en Chile se han basado tradicionalmente en los valores utilizados por la US-EPA (MMA, 2013b)
- Al tratarse de un valor más alto que el coeficiente de la OMS, es también un valor más conservador evita subestimar el riesgo asociado a un elemento tóxico como el arsénico.

El coeficiente de la OMS también se basa en estudios en fundiciones, actualizando los valores de los estudios utilizados por la US-EPA y complementando con valores desarrollados en una fundición en Suecia (World Health Organisation, 2000). Por esta razón se propone sensibilizar los resultados con este coeficiente de forma de complementar el entendimiento de los resultados del presente estudio.

6.4 Metodología para calcular los efectos en salud por la reducción en concentración marginal

La Ecuación 36 presenta la ecuación con que se estima el riesgo de cáncer por inhalación el cual depende del nivel de exposición y el coeficiente de riesgo (IUR). Cabe destacar, que la concentración de arsénico en el aire es considerada como la dosis de exposición inhalatoria. De esta forma, la exposición corresponde directamente al nivel concentración promedio durante toda la vida al que se expone una población. Por su parte, el IUR considerado corresponde a 4,3e-6 (por ng/m³N) equivalente al recomendado por la US-EPA (ver Sección 6.3).

$$\text{Riesgo de cáncer} = \text{Concentración promedio de exposición durante la vida} * \text{IUR}$$

Ecuación 36 Estimación del riesgo de cáncer por inhalación

Si bien la Ecuación 36 permite estimar el riesgo de cáncer incremental individual durante toda la vida frente a una concentración promedio, para la estimación de los efectos en salud en el contexto de la evaluación de la norma de calidad es necesario aproximar al riesgo de cáncer incremental anual. Este riesgo se estima según lo presentado en la Ecuación 37, y es equivalente a dividir el riesgo de cáncer de una persona que durante toda su vida tiene una exposición promedio igual a la concentración anual promedio, por su esperanza de vida. Como antecedente de este último parámetro cabe destacar que el INE estimaba que para el año 1992 la esperanza de vida al nacer era de un hombre era de 71 años, mientras que para una mujer era de 77. De la misma forma para el año 2016 la esperanza de vida al nacer de un hombre era de 77, mientras que para una mujer es de 83 años. Como supuesto se toma una esperanza de vida promedio de 75 años.

$$\text{Riesgo de cáncer de un año} = \frac{\text{Riesgo de cancer (concentración anual promedio)}}{\text{Esperanza de vida}}$$

Ecuación 37 Estimación de riesgo anual de cáncer por inhalación

Dado que tanto la Ecuación 36 como Ecuación 37 son lineales, y dado que en el caso del arsénico no hay un umbral donde no se observen efectos cancerígenos, se puede estimar la variación del riesgo anual de cáncer a partir de la variación de la concentración anual según la Ecuación 38. En esta ecuación se observa que la variación del riesgo anual de cáncer es proporcional a la variación de la concentración de arsénico en el aire, donde las variaciones son respecto de un escenario contrafactual, usualmente un escenario donde se considera la proyección de las concentraciones anuales promedios sin nuevas medidas de gestión de la calidad del aire.

$$\Delta \text{Riesgo anual de cáncer} = \frac{\Delta \text{Concentración promedio anual} * \text{IUR}}{\text{Esperanza de vida}}$$

Ecuación 38 Estimación de cambio de riesgo anual de cáncer por cambio en concentraciones

La variación del riesgo anual de cáncer estimado en la Ecuación 38 corresponde a la variación individual, es decir, es la variación en el riesgo para cada una de las personas expuestas. Para estimar los beneficios anuales en términos de variación en el número esperado de casos anuales, es necesario multiplicar el resultado de la Ecuación 38 por la población expuesta. Al respecto se destaca que dada la forma en que se estima el IUR, el cual se estima por una exposición media durante toda la vida, y por la forma en que se aproxima al riesgo anual (ver Ecuación 37), se considera que el riesgo se distribuye uniformemente en toda la población sin hacer distinciones por edad, sexo u otros parámetros.

$$\Delta \text{Casos anuales} = \Delta \text{Riesgo anual de cáncer} (\Delta \text{Concentración}) * \text{Población}$$

Ecuación 39 Estimación de cambio en casos anuales por cambios en concentración

De la Ecuación 22 se desprende una consideración relevante a la hora de interpretar los resultados, al momento de evaluar los beneficios de la norma, a pesar de que las poblaciones tengan un riesgo individual equivalente, los resultados van a estar ponderados por la población expuesta. De esta forma, dos zonas con mismo riesgo individual final pueden tener asociado beneficios diferentes dependiendo tanto del cambio en las concentraciones, y por lo tanto en cambio del riesgo individual, como también del tamaño de la población expuesta.

Para estimar los beneficios anuales de la reducción de la concentración anual, se deben definir el valor unitario de cada uno de los casos evitados. Al respecto, se considera una aproximación a partir del Valor de la Vida Estadística (VVE), estimado a partir de la disposición a pago, ponderado por la esperanza de supervivencia de cáncer pulmonar⁷⁰. Vale destacar que el VVE representa el valor que se asocia a un bien público que en el margen evita un a muerte estadística, de esta forma no implica la valoración de la vida humana, sino que la valoración de riesgos pequeños de muerte (Ministerio de Desarrollo Social, 2017). La forma de cálculo mediante la agregación de riesgos pequeños coincide con la aproximación necesaria para la valoración de la reducción de pequeños riesgos individuales, los cuales se agregan a nivel poblacional.

En línea con los últimos Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) desarrollados por el MMA, el VVE considerado para el año 2022 corresponde a 18.837 UF basado en la mediana del valor estimado por Iragüen & Ortúzar (2004). Por su parte, la esperanza de supervivencia se considera 10,6%, en línea con los presentado por el MINSAL (2018) (ver nota al pie 70). Con estos parámetros se puede estimar el valor unitario de cada caso, por lo que, multiplicándolo por la variación esperada en los casos anuales, se puede obtener el beneficio anual según lo indicado en la Ecuación 40.

⁷⁰ El efecto crítico para el cual se calcula el IUR corresponde a cáncer pulmonar. Para la esperanza de supervivencia se considera la supervivencia relativa de tumores en órganos respiratorios e intratorácicos (CIE10: C30-C38) reportada en el Plan Nacional de Cáncer 2018-2028 (MINSAL, 2018).

Beneficio anual

$$= \Delta \text{Casos anuales } (\Delta \text{Concentración}) * (1 - \text{Esperanza Sobrevida}) * VVE$$

Ecuación 40 Estimación beneficios por reducción en concentración de arsénico

6.5 Escenarios regulatorios propuestos y sus beneficios

De acuerdo a la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300), una Norma Primaria de Calidad Ambiental (NPCA) “establece los valores de las concentraciones y periodos, máximos o mínimos permisibles de elementos ... cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población” (artículo 2° de la Ley 19.300). De esta forma la NPCA se debe fijar enfocado en el riesgo a la salud de la población del contaminante a normar.

En el caso del arsénico y sus efectos en la salud humana, es necesario tener en cuenta dos consideraciones especiales:

1. El riesgo para los niveles observados de arsénico atmosférico observado (ver Sección 2.3), se asocia a riesgos crónicos de largo plazo.
2. No existe un umbral de concentraciones de arsénico donde no haya riesgo para la salud humana.

La primera consideración tiene como efecto de que la NPCA debe responder a concentraciones de largo plazo, en este sentido y considerando otras normativas chilenas, la NPCA debiera regular concentraciones promedio anuales⁷¹. De esta forma, dado los riesgos de salud identificados y asociados a los niveles de arsénico atmosféricos (ver Sección 4.3), la NPCA a considerar en los escenarios regulatorios es una norma que regula el promedio de las concentraciones anuales.

Los efectos de la segunda consideración es que los niveles de la NPCA no pueden ser tal que anulen completamente el riesgo para la salud humana. De esta forma, la NPCA para arsénico en lugar de buscar eliminar el riesgo para la salud de la población, establece un nivel tal que su riesgo asociado sea *aceptable*. La definición de *riesgo aceptable* no es única y puede responder a diferentes criterios, aunque una definición usualmente utilizada corresponde a un riesgo que cae bajo una probabilidad definida, por ejemplo, $1e-6$ ⁷².

A nivel nacional no existe una definición del riesgo de cáncer aceptado. Como una referencia se considera el nivel de riesgo asociado a las concentraciones de arsénico permitidas en las normas de agua potable. En la norma actual se permite una concentración de arsénico máxima de 10 ug/L, lo cual considerando el *Drinking Water Unit Risk*⁷³ recomendado por la US-EPA ($5e-5$ per

⁷¹ Eventualmente podrían ser concentraciones promedios en períodos más largos, los beneficios se estiman de forma análoga.

⁷² En la literatura de riesgo en cancerígenos usualmente se usa notación científica para presentar los niveles de riesgo, de esta forma $1e-6$ corresponde a un riesgo equivalente a 1/1.000.000, es decir, 1 en un millón.

⁷³ Análogo al IUR en el caso de la exposición atmosférica

ug/L) y supuestos tradicionales de exposición, se traduce en un riesgo de $2e-4$. Es decir, en el caso del arsénico en agua potable, el riesgo *aceptado* corresponde a 2 en 10 mil.

En comparación, en Estados Unidos se suele usar como riesgo cancerígeno aceptado entre $1e-4$ y $1e-6$. Considerando el IUR recomendado por la EPA, estos niveles de riesgos *aceptables* son equivalente a un rango de concentraciones de arsénico entre 0,2 y 23,6 ng/m³N, lo cual se refleja en los valores que han adoptado los diferentes estados (ver Tabla 6-6). Análogamente, el valor objetivo europeo corresponde a 6 ng/m³N, el cual considerando el IUR recomendado por la OMS - más permisivo que el de EPA - representa un nivel de riesgo *aceptable* equivalente cercano a $1e-5$ o 1 en 100 mil.

Tabla 6-6 Normas de calidad anual en EEUU y nivel de riesgo equivalente

País	Estado	Límite (ng/m ³)	Nivel de riesgo equivalente
Estados Unidos	Carolina del Norte	2,1	$1e-5$
	Luisiana	20	$1e-4$
	Massachusetts	0,2	$1e-6$
	Michigan	2	$1e-5$
	New Hampshire	24	$1e-4$
	Rhode Island	0,2	$1e-6$
	Texas	10	$5e-4$
	Vermont	0,23	$1e-6$
	Washington	0,23	$1e-6$

Fuente: Elaboración propia

Tal como se presenta en la Sección 6.1 actualmente existen normas que se relacionan con la calidad del aire que se mueven en el rango de entre 0,2 ng/m³ hasta los 50 ng/m³. Este rango considera las características propias de cada zona, sus fuentes de emisión y el riesgo considerado aceptable. Se observa que, si bien el grueso de las normativas internacionales se asocia al valor objetivo europeo, 6 ng/m³, en general estas normativas no funcionan como una NPCA absoluta, pues en general presentan condiciones de flexibilidad. En particular, la directiva europea que da pie a los valores objetivos utilizados como referencia en gran parte del resto de las regulaciones, explícita en su considerando número 5 que:

“Los valores objetivos no exigirán medidas que supongan costos desproporcionados. En lo que respecta a las instalaciones industriales, dichos valores no implicarán la adopción de medidas que vayan más allá de la aplicación de las mejores técnicas disponibles (BAT), tal como establece la Directiva 96/6/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación y, en particular, o conducirán al cierre de ninguna instalación. Ahora bien, exigirán que los Estados miembros adopten todas las medidas de reducción rentables necesarias en los sectores afectados” - Directiva 2004/107/CE (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004).

De la misma forma el Considerando siguiente de la misma norma (Considerando n°6) explícita que los *“los valores objetivos de la presenta Directiva no se consideran normas de calidad medioambiental ... (las cuales) requieren condiciones más estrictas que las alcanzables mediante*

la aplicación de las BAT” (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004). Flexibilidades como la recién mencionada son parte de las diferentes regulaciones internacionales, observándose también en lugares como China que, al igual que Europa, también tienen fundiciones de Cobre. Se observa que otros lugares con fundiciones de cobre, notablemente en Estados Unidos, se ha optado por establecer normas de emisiones y exigencias tecnológicas a las fundiciones de cobre observándose NPCA sólo en estados que no cuentan con este tipo de industrias.

Con estos antecedentes conviene volver a observar la situación base, correspondiente a la concentración proyectada en un escenario con la misma regulación vigente. Esta proyección considera el aumento de emisiones proyectado en la Sección 3.4, y la relación emisión concentración estimada en la Sección 5.1.6. La proyección presentada en la Figura 6-3 corresponde a los niveles esperados para el 2035 y distingue el aporte basal estimado estadísticamente según lo descrito en la Sección 5.1.6. A cada localidad presentada se le asigna una estación, privilegiando las estaciones con representatividad de MP10, y aquellas que tengan los valores más altos de concentración de arsénico el año 2020.

Se observa que la situación es variada en las diferentes localidades presentadas, tanto en términos de concentración total proyectada y a la contribución basal. De esta forma se observa localidades, como ChiuChiu, El Salvador o Coya con niveles de concentración de arsénico similares al valor objetivo de la UE. En el caso contrario, Calama, La Negra, Copiapó y Quintero superan en 6 veces el valor objetivo de la UE. Más aún hay localidades donde sólo el aporte basal estimado supera los niveles de valor objetivo, por lo que incluso sin el efecto de las fuentes emisoras no se alcanzaría el nivel de calidad atmosférica objetivo de la UE.

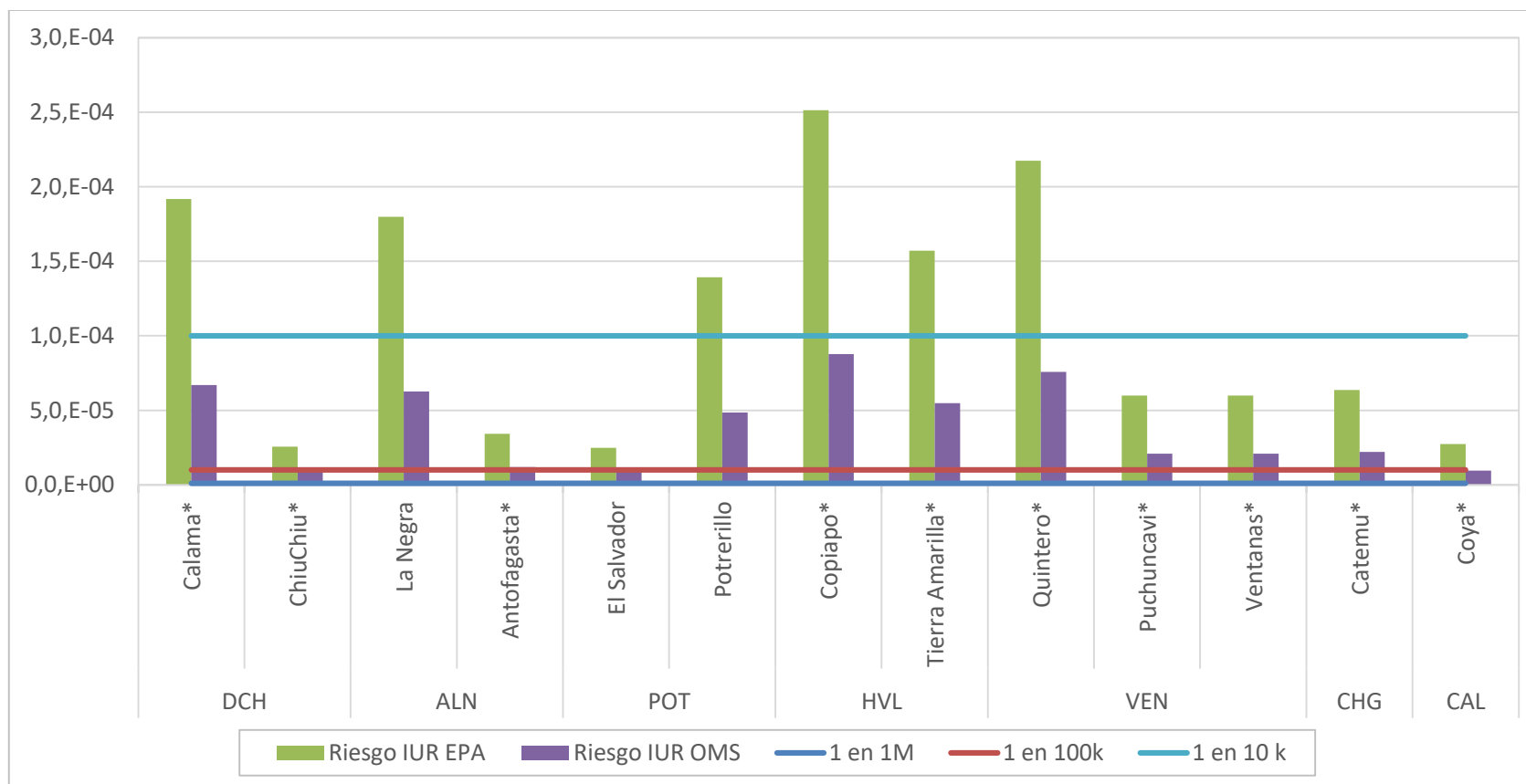


* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

Figura 6-3 Proyección base de concentración de Arsénico en MP10 [ng/m3N] al 2035

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-4 se presenta la equivalencia en término de riesgo de las concentración proyectadas presentadas en la Figura 6-3. Se observan los riesgos estimados con el IUR de la US-EPA y de la OMS, comparando contra estándares de $1e-6$ (1 en 1M), $1e-5$ (1 en 100k) y $1e-4$ (1 en 10k). Se observa que para el IUR recomendado por la EPA los valores de riesgos esperados oscilan entre $2,5e-5$ (2,5 en 100 mil) y $2,5e-4$ (2,5 en 10 mil), mientras que con el IUR de la OMS el riesgo oscila entre $1e-5$ y $1e-4$. Cabe destacar que una parte relevante del riesgo proyectado responde al riesgo asociado a la contribución basal, pero que según lo observado en la Figura anterior varía de forma relevante entre las diferentes localidades.



* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

Figura 6-4 Riesgo incremental individual de cáncer para proyección base 2035

Fuente: Elaboración propia

6.5.1 Escenarios regulatorios

En vista de los antecedentes de los niveles proyectados de riesgo base, los niveles y riesgos asociados en normas y valores objetivos internacionales, así como los antecedentes nacionales se proponen tres escenarios normativos, que regulan la concentración anual promedio de arsénico como una forma de controlar efectos crónicos sobre la salud de la población. De las regulaciones internacionales, se destaca la regulación europea, que tal como se ha presentado anteriormente no establece una NPCA, sino que un valor objetivo el cual entrega cierta flexibilidad basado en la capacidad de alcanzar el valor objetivo sin “costes desproporcionados” o que “conduzcan al cierre de ninguna instalación” (Directiva 2004/107/CE).

La amplia variedad de las concentraciones observadas en las diferentes zonas del país, así como de la contribución basal estimada en cada localidad, dificulta el establecimiento de niveles límites homogéneos para todo el territorio. De esta forma, un nivel de exigencia alto, comparable con los valores objetivos europeos, sólo podrían alcanzarse con esfuerzos muy significativos de las fundiciones de cobre de las zonas, incluyendo posibles reducciones de operación. Este tipo de esfuerzos, incluso podría ser insuficiente considerando que, en la estimación estadística de la contribución basal, se estimaron aportes basales superior al valor objetivo europeo. Lo mismo sucede con valores aún más ambiciosos como los observados en algunas de las regulaciones de estados de los Estados Unidos, donde su cumplimiento se ve beneficiado por tratarse de zonas sin fundiciones y con niveles basales de arsénico más bajos que los chilenos.

Adicionalmente a lo anterior, los valores límites a establecer en una NPCA se asocian a los efectos del contaminante en la salud de la población expuesta. Dado que el arsénico no cuenta con un umbral de concentración en el que no tenga efecto en la salud, la definición del valor límite guarda relación con cuál es el nivel de riesgo aceptado. De esta forma un valor límite más exigente se refleja en una mayor protección de la salud de la población expuesta.

De esta forma, los escenarios normativos se diferencian sólo por el límite establecido, los cuales se relacionan con un determinado riesgo incremental *aceptable*. En particular los escenarios son:

- Escenario 2 en 10k (46,6): Escenario donde el riesgo incremental aceptado es equivalente a $2e-4$, es decir, 2 casos en 10k durante toda la vida. Este escenario implica un riesgo incremental de cáncer similar al aceptado en las concentraciones de arsénico permitidas en el agua potable. Este riesgo incremental es equivalente a una concentración promedio anual de 46,6 ng/m³N de arsénico en MP10, considerando el IUR de la US-EPA.
- Escenario 1 en 10k (23,3): Escenario donde el riesgo incremental aceptado es equivalente a $1e-4$, es decir, 1 caso en 10k durante toda la vida. Este escenario implica un nivel de riesgo incremental similar a la parte alta del rango del riesgo aceptado normalmente en EE.UU. Este riesgo incremental es equivalente a una concentración promedio anual de 23,3 ng/m³N de arsénico en MP10, considerando el IUR de la US-EPA.
- Escenario contribución limitada (15,0): Escenario de mayor ambición donde la contribución de las fundiciones es limitada. Para estimar el valor límite homogéneo se

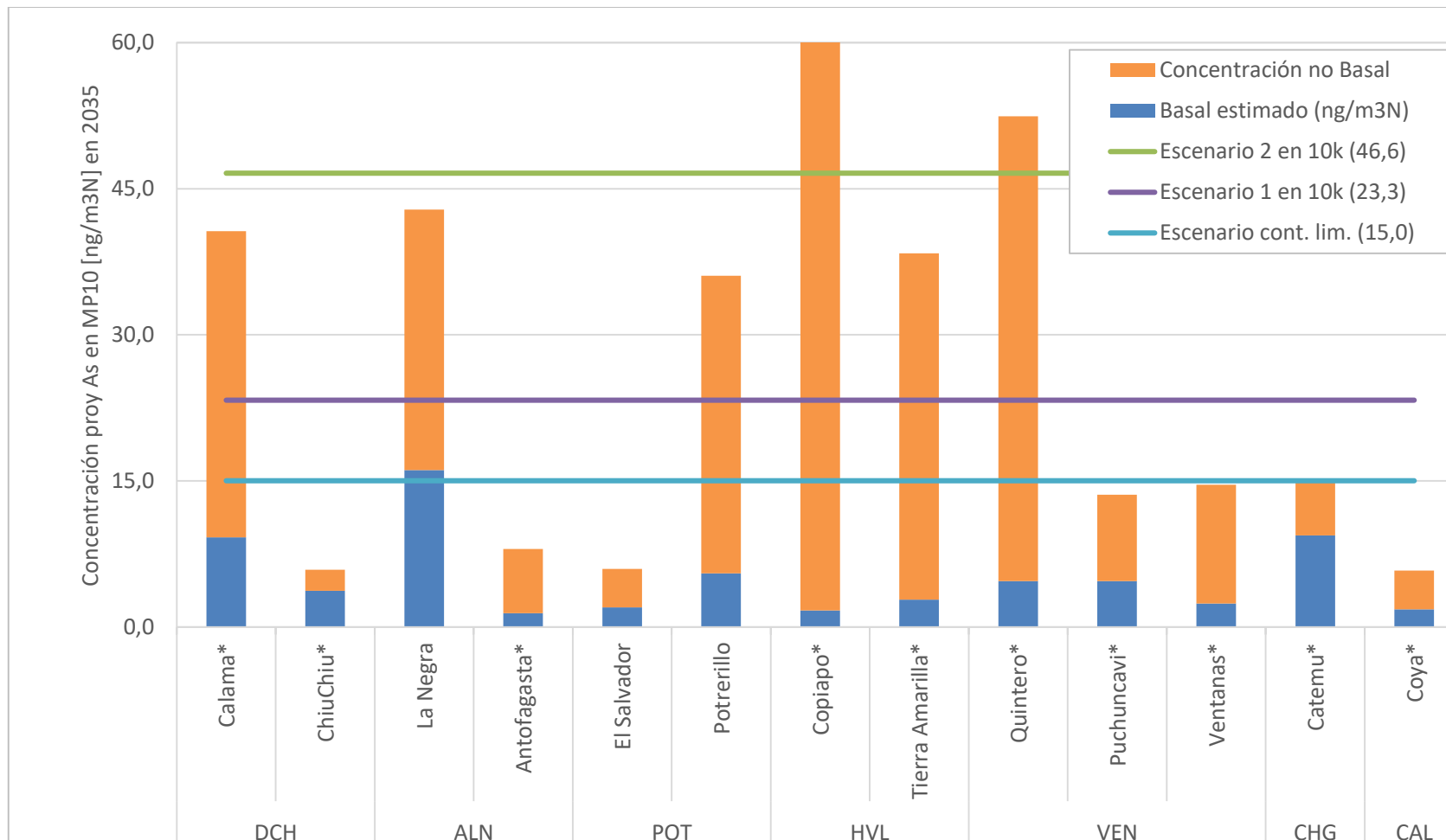
consideró que las contribuciones basales más altas están en torno a 9 ng/m³, sobre lo cual se consideró el valor objetivo de la normativa europea, alcanzando una concentración promedio anual permitida de 15 ng/m³. El resultado de esta norma, es que en aquellas zonas cuya contribución basal sea de 9 ng/m³, el aporte de las fuentes de emisión no pueda superar el valor objetivo europeo. Los 15 ng/m³ representan un riesgo incremental aceptado equivalente a 6,7e-5, es decir, 0,67 casos en 10k durante toda la vida

Se destaca que el diseño del modelo de evaluación de los diferentes escenarios normativos fue creado, para facilitar la exploración de otras alternativas, incluyendo alternativas actualmente no disponibles en la regulación chilena, como considerando flexibilidad y/o valores diferenciados según localidad.

Los escenarios regulatorios propuestos pueden ser observados gráficamente en la Figura 6-5. En ella se observa que para el escenario 2 en 10k, sólo dos localidades superarían la norma: Copiapó y Quintero. Por su parte, para el escenario 1 en 10k, se suman las localidades de Calama, La Negra, Potrerillo y Tierra Amarilla. De estas, cabe destacar que Potrerillo, representada por las concentraciones medida en la estación CAP, y La Negra, por su estación Inacal, no tienen representatividad poblacional de MP10. En el último escenario, se suman las localidades de Catemu, además de ser más exigente en los cambios requeridos en términos de concentraciones de As en MP10.

Respecto a la evaluación de la superación de la norma se recomienda mantener los objetivos de calidad de los datos y requisitos de los mismos establecidos en el Anexo IV de la Directiva 2004/107/CE (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004). En ella se plantea que los valores de arsénico se deben desprender desde el análisis de la fracción de MP10⁷⁴, con una normalización de los valores para un volumen de muestreo a condiciones ambientales. Asimismo, las mediciones deben ser tal que se cumpla con un 95% de la incertidumbre expandida para la media anual, conforme a la norma "ISO 11222:2002 – *Determinación de la incertidumbre en medias temporales para mediciones de calidad del aire*", proponiéndose un valor objetivo de 50% de mediciones, distribuidas equilibradamente durante el año para evitar el sesgo de los datos. Lo anterior es equivalente a toma de muestras cada dos días. Sin perjuicio del valor objetivo, se da la posibilidad de que las muestras sean menos, en la medida que se cumple el objetivo de incertidumbre del valor medio, y el número sea mayor a 14% equilibradas durante el año, es decir, cerca de 1 medición semanal. Asimismo, se solicita que la recogida de datos válidos sea superior al 90% de las muestras.

⁷⁴ La metodología utilizada para la medición de arsénico en MP10 corresponde a la espectroscopía de absorción atómica, normada por el método estándar 3050B de la US-EPA código 3114B, o el método estándar TMECC 04.14, 2001 y TMECC 04.12-B del US Composting Council.



* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

Figura 6-5 Escenarios regulatorios propuestos

Fuente: Elaboración propia

Considerando la forma de medición anterior, así como el efecto de largo plazo de la exposición del contaminante, se propone que se entienda la norma como sobrepasada cuando el promedio trianual de las concentraciones anuales sea mayor que el valor límite anual propuesto, en cualquiera de las estaciones calificada como EMRP para MP10 y/o MP2,5. De la misma forma, respecto a los sitios de medición se sugiere mantener los mismos criterios utilizados para el MP10 y/o MP2,5, bajo la lógica que el As atmosférico es parte de ellos.

Respecto a posibles valores críticos que deriven en situaciones de emergencia ambiental, se destaca que el arsénico es una sustancia la cual, en el orden de magnitud que se encuentra normalmente en Chile, tiene efectos crónicos sin observarse episodios agudos. Si bien, es posible que niveles anormalmente altos puedan tener consecuencias agudas, estos debieran ser controlados por los episodios críticos de MP10 y/o MP2,5, de los cuales el arsénico forma parte. Cabe destacar que alcanzar niveles de arsénico tan altos, requeriría no sólo de condiciones meteorológicas particularmente adversas, sino que también de alguna falla o una eventualidad puntual en las fuentes emisoras que resultará en una emisión anormal, lo cual por su naturaleza no es posible de pronosticar con la exactitud requerida para prever situaciones de emergencia ambiental. Aun así, como un valor de referencia para considerar una eventual situación crítica, se propone como referencia un valor de 300 ng/m³, utilizado como referencia de norma diaria en dos estados en Canadá, basado en posibles efectos no cancerígenos del arsénico sobre la salud humana.

6.5.2 Evaluación de beneficios

La evaluación de los beneficios de una NCPA en general se realiza a partir de la comparación entre un caso contrafactual y un escenario regulatorio, donde las concentraciones del contaminante que superan los niveles alcanzan el nivel precisado por el escenario regulatorio. Este diferencial en las concentraciones implica cambios en (ver Sección 6.4):

- (1) Niveles de riesgos individuales
- (2) Riesgo poblacional (casos evitados esperados)
- (3) Beneficios valorizados

En línea con los análisis de impacto regulatorio (RIA) desarrollados a nivel internacional⁷⁵, se realiza un enfoque temporal asado en un año de evaluación. Con este enfoque se comparan los beneficios de un año con los costos anualizados asociados a la implementación del escenario regulatorio, donde el año a seleccionar corresponde a un año donde se haya alcanzado los niveles descritos en la normativa.

⁷⁵ En el “Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica” (GreenLab, 2018) desarrollado para el MMA, se estudian 11 análisis internacionales, de los cuales 9 utilizan un año de referencia donde la norma ya este implementada en lugar de un horizonte de evaluación continuo.

Al respecto, si bien el método de flujos y valor presente es más informativo en la medida que plantea un cronograma de implementación de las medidas, es también más intensivo en el uso de recursos, e incorpora incertidumbres adicionales asociadas a supuestos de modelación, tales como la definición del horizonte de evaluación y tiempos de implementación de las medidas necesarias. En contraste un enfoque como el propuesto, permite obtener resultados igualmente válidos, pero con menor dependencia de los supuestos de modelación. En la evaluación de las NPCA este enfoque tiene aún más sentido en la medida que no se conocen a priori las medidas y cronograma de implementación, a diferencia de, por ejemplo, un plan de descontaminación.

En particular, para el presente estudio se considera como año de referencia para la evaluación el 2035, que corresponde al último año con una proyección de inventario. Asimismo, considerando los tiempos regulatorios y de implementación de las medidas, parece un horizonte razonable para que se hayan establecidos los límites, impulsados los instrumentos que apunten al cumplimiento de los niveles, diseñado el detalle e implementado las medidas necesarias para dar cumplimiento a los escenarios regulatorios.

De esta forma los beneficios presentados a continuación corresponden a los beneficios anuales para un año de referencia donde las exigencias de los diferentes escenarios normativos ya fueron alcanzadas, que se representa como el año 2035. En la Tabla 6-7 se presentan las proyecciones para el año de referencia de los diferentes escenarios regulatorios, incluyendo la proyección base.

Se observa que el hecho de que una localidad supere la norma propuesta, tiene efecto sobre otras localidades que se ven influenciadas por la misma fuente. Por ejemplo, la localidad de Calama en el escenario 1 en 10k, supera el nivel propuesto por la norma de 23,3 ng/m³N. Alcanzar este nivel implica una reducción de la concentración de 17,4 ng/m³N, lo cual se lograría reduciendo las emisiones en la zona las cuales también tienen efecto en la calidad del aire de otra localidad en la zona: ChiuChiu. De esta forma, ChiuChiu también tiene una reducción en sus concentraciones proyectadas (1,2 ng/m³N), a pesar de que cumplía con los niveles de arsénico exigidos en el escenario regulatorio. Esta situación se repite en Copiapó-Tierra Amarilla, en Quintero-Puchuncaví/Ventanas y en Catemu-Panquehue/Llayllay. Otros casos de interés corresponden a aquellos casos donde se supera la norma en localidades sin estación con representatividad, como en La Negra y Potrerillo. Ante la falta de representatividad se considera que estas zonas no se verían afectadas por la NPCA. Sin perjuicio de esto, la modelación anexa trae como posibilidad considerar estas estaciones en futuros análisis.

Tabla 6-7 Concentraciones [ng/m³N] de arsénico en MP10 proyectadas en el año de referencia para escenarios normativos

Localidades	Proyección			
	Base	Esc 2 en 10k	Esc 1 en 10k	Esc Cont lim
Valor límite	n/a	46,6	23,3	15,0
Calama*	40,7	40,7 (-)	23,3 (-17,4)	15,0 (-25,7)
ChiuChiu*	5,9	5,9 (-)	4,7 (-1,2)	4,1 (-1,8)
La Negra	42,9	42,9 (-)	42,9 (-)	42,9 (-)
Antofagasta*	8,0	8,0 (-)	8,0 (-)	8,0 (-)
El Salvador	5,9	5,9 (-)	5,9 (-)	5,9 (-)
Potreriillo	36,1	36,1 (-)	36,1 (-)	36,1 (-)
Copiapó*	60,8	46,6 (-14,2)	23,3 (-37,5)	15,0 (-45,8)
Tierra Amarilla*	38,4	30,0 (-8,4)	16,1 (-22,2)	11,2 (-27,2)
Quintero*	52,4	46,6 (-5,8)	23,3 (-29,1)	15,0 (-37,4)
Puchuncaví*	13,6	12,5 (-1,1)	8,2 (-5,4)	6,6 (-6,9)
Ventanas*	14,6	13,1 (-1,5)	7,2 (-7,4)	5,1 (-9,5)
Catemu*	15,0	15,0 (-)	15,0 (-)	15,0 (0,0)
Panquehue**	5,8	5,8 (-)	5,8 (-)	5,8 (0,0)
Llayllay**	3,2	3,2 (-)	3,2 (-)	3,2 (0,0)
Coya*	6,6	6,6 (-)	6,6 (-)	6,6 (-)

Nota: En paréntesis se muestra la reducción alcanzada respecto del escenario base

* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

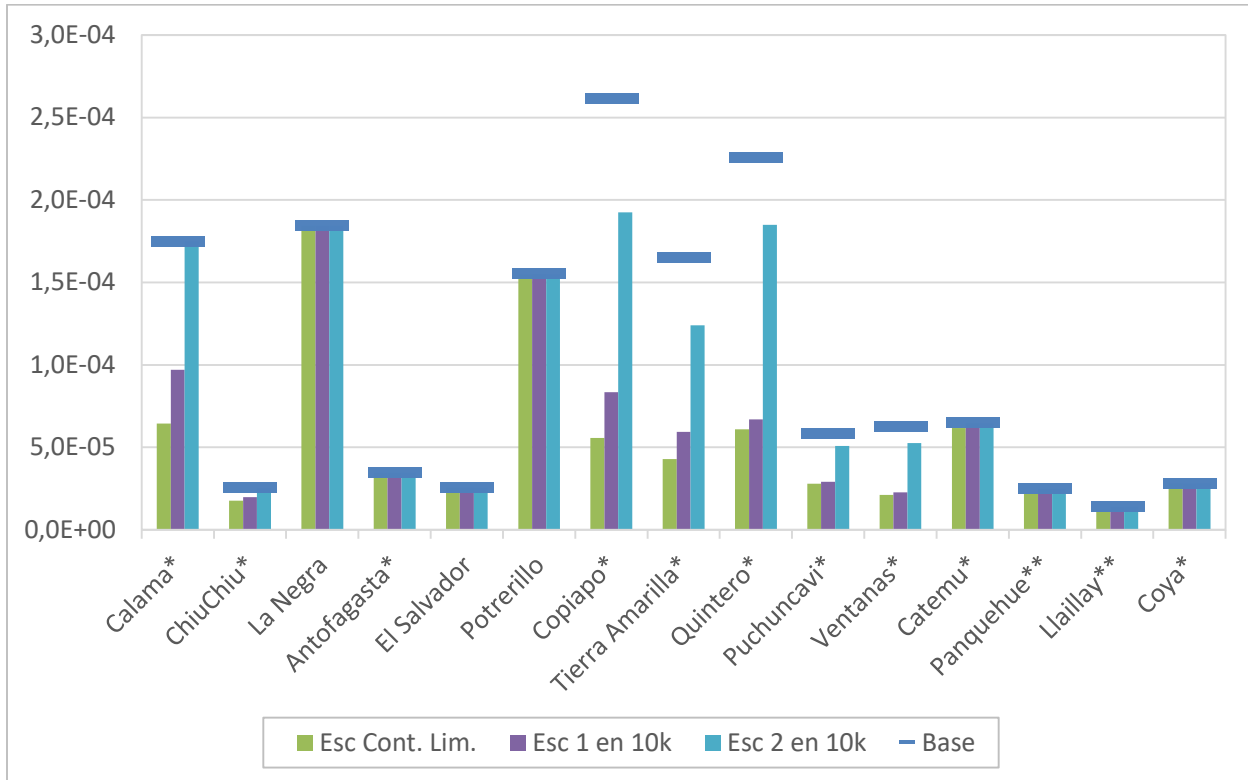
** Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

Fuente: Elaboración propia

Cambios en riesgos individuales

La variación en los niveles de arsénico se pueden asociar a una variación en los riesgos incrementales individuales de cáncer, de acuerdo a lo planteado en la Ecuación 36. En la Figura 6-6 se presentan los riesgos estimados para cada uno de los escenarios en comparación con los niveles de riesgo asociados a la proyección base presentados como una línea horizontal para cada localidad, y que son los mismos a los presentados en la Figura 6-4 calculados considerando el IUR recomendado por la US-EPA.

Se observa que los principales cambios de riesgo se observan en la zona de Copiapó/Tierra Amarilla, seguido por Quintero/Puchuncaví/Ventanas. En la Tabla 6-8 se puede observar que la variación en el riesgo en los escenarios más ambiciosos pueden ser del orden de $1e-4$. Asimismo, se observa que algunas zonas no tendrían variaciones en sus niveles de riesgo individuales, al respecto cabe destacar que mientras Coya está por debajo de los niveles propuesto, las localidades de La Negra y Potrerillos no tienen variaciones por no contar con representatividad poblacional. De contar con representatividad poblacional, la reducción del riesgo individual se daría también en las otras localidades afectadas por las fuentes de emisión, es decir, en Antofagasta y El Salvador. Se destaca, que estas dos últimas localidades cumplen con los límites propuestos en todos los escenarios normativos.



* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

** Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

Figura 6-6 Riesgo individual incremental por escenario y comparación con proyección base, para años referencial

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-8 Variación en los niveles de riesgo para escenarios normativos, para año referencial

Localidad	Escenario 2 en 10k (46,6)	Escenario 1 en 10k (23,3)	Escenario cont. lim. (15,0)
Calama*	-	7,8E-05	1,1E-04
ChiuChiu*	-	5,4E-06	7,6E-06
La Negra	-	-	-
Antofagasta*	-	-	-
El Salvador	-	-	-
Potreriillo	-	-	-
Copiapó*	6,9E-05	1,8E-04	2,1E-04
Tierra Amarilla*	4,1E-05	1,1E-04	1,2E-04
Quintero*	4,1E-05	1,6E-04	1,6E-04
Puchuncavi*	7,5E-06	2,9E-05	3,0E-05
Ventanas*	1,0E-05	4,0E-05	4,2E-05
Catemu*	-	-	2,9E-06
Panquehue**	-	-	3,0E-06
Llaylay**	-	-	1,7E-06
Coya*	-	-	-

* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

** Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

Fuente: Elaboración propia

Cambios en riesgo poblacional

En la Tabla 6-9 se presenta el riesgo poblacional de cada uno de los escenarios, el cual se expresa en el número de casos estadísticos esperados de cáncer por exposición de la población a los niveles de concentración de arsénico proyectados. Estos valores se estiman de forma análoga a la Ecuación 39, donde se relacionan los niveles observados de arsénico, el IUR, la esperanza de vida y la población expuesta.

Para estimar la población se consideró el reporte del INE respecto a la población censada en 2017 en las “Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos” (INE, 2019a). Esta población fue proyectada hasta el año 2035 considerando la tasa de crecimiento poblacional comunal implícita en las proyecciones oficiales del INE (2019b) las cuales proyectan la población comunal hasta el año 2035. Se destaca que de las localidades identificadas, Potrerillo no tendría población asociada (INE, 2019a).

De los resultados presentados en la Tabla 6-9 se observa que la diferencia entre los distintos resultados se explica más por la variación en la población expuesta que por el delta de concentraciones. Por ejemplo, se observa que Antofagasta pese a tener una variación comparativamente menor en los niveles de arsénico (ver Tabla 6-7) representa una fracción relevante de los beneficios en términos de casos esperados evitados.

Tabla 6-9 Riesgo poblacional proyectado por escenario para año referencial, en casos esperados por año

Localidad	Población proy 2035 (hab)	Base 2035	Escenario 2 en 10k (46,6)	Escenario 1 en 10k (23,3)	Escenario cont. lim. (15,0)
Calama*	184.185	0,43	0,43	0,25	0,16
ChiuChiu*	376	0,00	0,00	0,00	0,00
La Negra	405	0,00	0,00	0,00	0,00
Antofagasta*	430.521	0,20	0,20	0,08	0,03
El Salvador	5.397	0,00	0,00	0,00	0,00
Potrerrillo	0	-	0,00	0,00	0,00
Copiapó*	166.759	0,58	0,45	0,22	0,14
Tierra Amarilla*	10.167	0,02	0,02	0,01	0,01
Quintero*	34.078	0,10	0,09	0,05	0,03
Puchuncaví*	6.645	0,01	0,00	0,00	0,00
Ventanas*	10.482	0,01	0,01	0,00	0,00
Catemu*	8.897	0,01	0,01	0,01	0,01
Panquehue**	4.311	0,00	0,00	0,00	0,00
Llaylay**	20.124	0,00	0,00	0,00	0,00
Coya*	3.386	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	885.735	1,36	1,21	0,63	0,39

* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

** Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-7 se presenta la distribución de los beneficios entre las diferentes zonas, observándose que la mayor parte de los casos evitados se asocia a la zona afectada por la fundición HVL en todos los escenarios regulatorios. En los escenarios más ambiciosos el aporte de Chuquicamata también es relevante, fundamentalmente por el tamaño de la población expuestas en estas zonas.

Se destaca que en los alrededores de la fundición Ventanas, a pesar de representar una de las zonas con los principales cambios en términos de concentraciones y riesgo individual, los casos evitados son una fracción menor del total, lo cual se asocia a una población expuesta menor. Bajo esta lógica, si La Negra contará con representatividad poblacional, es esperable que se observen beneficios relevantes como consecuencia del efecto en una población comparativamente importante como Antofagasta, la cual representa cerca de la mitad de la población total expuesta. El caso contrario ocurre con Potrerillo-El Salvador, donde la baja población expuesta (menos del 1% de la población expuesta) resultaría en una cantidad comparativamente baja de casos evitados.

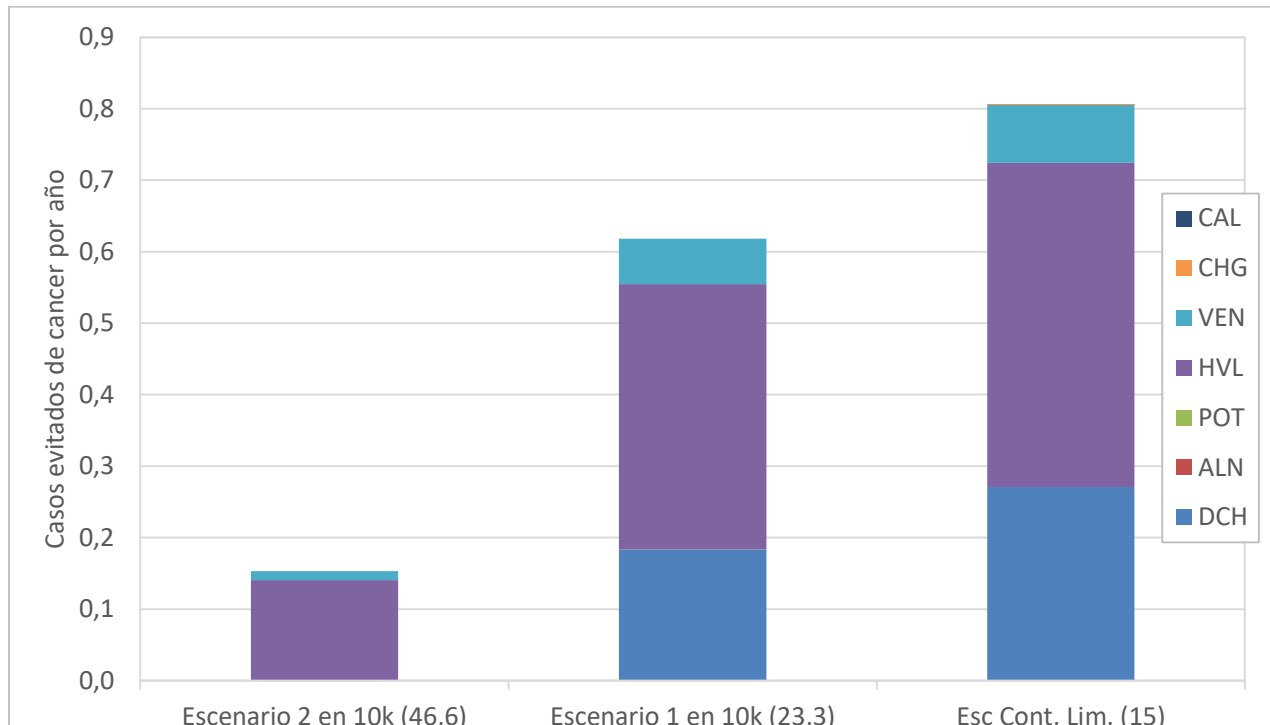


Figura 6-7 Distribución de la reducción del riesgo poblacional por escenario para año referencial, en casos anuales esperados

Fuente: Elaboración propia

Beneficios valorizados

En la Tabla 6-10 se presenta la valorización de los beneficios anuales para cada uno de los tres escenarios regulatorios con el detalle para cada una de las localidades analizadas. Se observa que el escenario 1 en 10k tiene 4 veces más beneficios que el escenario 2 en 10k, mientras que el tercer escenario presenta beneficios aún mayores en torno a las 13,5 mil UF/año. Al observar el efecto distributivo entre las localidades, se observa que los principales beneficios se darían en Copiapó, que en el escenario 2 en 10k representa el 88% de los beneficios, mientras Quintero tendría un 7% de los beneficios. En el escenario 1 en 10k los beneficios estimados se reparten principalmente entre Copiapó (58%) Calama (30%) y Quintero (9%), mientras que en el tercer escenario la mayor parte de los beneficios se distribuyen en las mismas localidades: Copiapó (54%), Calama (34%) y Quintero (9%).

Tabla 6-10 Valorización de los beneficios anuales [UF/año] asociados a los escenarios de NPCA para el año de referencia

Localidad	Esc. 2 en 10k (46,6)	Esc. 1 en 10k(23,3)	Esc Cont. Lim. (15)
Calama*	-	3.087	4.563
ChiuChiu*	-	0	1
La Negra	-	-	-
Antofagasta*	-	-	-
El Salvador	-	-	-
Potrерillo	-	-	-
Copiapó*	2.283	6.034	7.371
Tierra Amarilla*	83	218	267
Quintero*	192	959	1.232
Puchuncaví*	7	35	45
Ventanas*	15	75	96
Catemu*	-	-	0
Panquehue**	-	-	0
Llayllay**	-	-	0
Coya*	-	-	-
Total	2.580	10.408	13.573

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-11 se presentan los resultados del beneficios de haber considerado el IUR de la OMS en lugar del IUR recomendado por la US-EPA. Se observa que son 2,87 veces menores, manteniendo su distribución entre escenarios y localidades. El factor 2,87 viene de la relación entre ambos IUR donde el valor recomendado por la US-EPA es 2,87 veces mayor que el valor recomendado por la OMS (ver Sección 6.3).

Tabla 6-11 Sensibilización de los beneficios anuales [UF/año] para el año de referencia al parámetro IUR

Localidad	Esc. 2 en 10k (46,6)	Esc. 1 en 10k(23,3)	Esc Cont. Lim. (15)
Calama*	-	1.077	1.592
ChiuChiu*	-	0	0
La Negra	-	-	-
Antofagasta*	-	-	-
El Salvador	-	-	-
Potrерillo	-	-	-
Copiapó*	796	2.105	2.571
Tierra Amarilla*	29	76	93
Quintero*	67	335	430
Puchuncaví*	2	12	16
Ventanas*	5	26	33
Catemu*	-	-	0
Panquehue**	-	-	0
Llayllay**	-	-	0
Coya*	-	-	-
Total	900	3.631	4.735

Fuente: Elaboración propia

7. Evaluación de costos de propuestas regulatorias

En esta Sección se presenta la evaluación de costos de las tres alternativas de propuesta regulatorias analizadas. En particular, en la Sección 7.1 se detallan los costos unitarios de las tecnologías de mitigación que se podrían implementar para el cumplimiento de la norma, en la Sección 7.2 se detallan las principales variables operacionales con incidencia en las emisiones, para luego en la Sección 7.3 presentar la estimación de costos y beneficios de las tres alternativas regulatorias propuestas.

7.1 Costos de tecnologías para la reducción de emisión

A continuación se detalla el procedimiento seguido para la identificación y selección de las tecnologías de abatimiento a ser analizadas (ver Sección 7.1.1), y luego se presenta la metodología y resultados de la estimación de costos unitarios para cuatro tipos de costos identificados: inversión, operación y mantenimiento, detención por implementación de medidas de abatimiento, y por reducción del nivel de producción para dar cumplimiento a la NPCA propuesta para el arsénico, en la Sección 7.1.2.

7.1.1 Identificación y selección de tecnologías

Para la identificación y selección de tecnologías de mitigación disponibles para ser implementadas, se tienen en consideración los tipos de fuentes emisoras a ser abordadas. Las emisiones de las fundiciones pueden clasificarse en dos grandes grupos: fuentes puntuales; y fuentes fugitivas, cada una de estas son asociadas a diferentes procesos unitarios detallados en la Sección 5.1 del Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico⁷⁶.

Considerando dichos procesos unitarios, se realizó una revisión en la literatura nacional e internacional de las medidas de abatimiento de emisiones disponibles para ser implementadas en las fundiciones, tanto para fuentes puntuales como fugitivas. En particular se dio prioridad a los antecedentes locales, por estar mejor ajustados a la realidad nacional, las características de los concentrados y también de las fundiciones en sí.

Siguiendo los lineamientos de la US-EPA⁷⁷, se compararon las siete fundiciones entre sí, para identificar medidas y tecnologías que las mismas fundiciones hayan implementado, que no necesariamente se hayan aplicado en todas ellas. La ventaja de este primer enfoque es que se identifican acciones que ya se han tomado en Chile, es decir que bajo ciertas condiciones son factibles, a la vez que ya existe un aprendizaje de su implementación, que puede ser utilizado si se deciden replicar en otras fundiciones. De la misma forma, es esperable que haya antecedentes

⁷⁶ Los resultados de la distribución de emisiones de las fundiciones por proceso unitario se presentan en el Anexo Digital D - Inventarios y Complementos.

⁷⁷ Siguiendo lineamientos para la identificación de *Best Available Technologies* (BAT)

de costos disponibles localmente, pudiendo contar con mejores estimaciones de los costos. En el Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, en la Sección 4.2, se presenta el detalle de los proyectos y medidas implementadas para dar cumplimiento al D.S. 28/2013 del MMA por cada fundición, según la etapa en la que tienen incidencia.

Entre los diferentes antecedentes complementarios revisados se destacan los documentos asociados a la nueva propuesta de norma de emisión para fundiciones de cobre en desarrollo por la US-EPA (US-EPA, 2022). En este proceso, aún en desarrollo⁷⁸, se han disponibilizado los antecedentes revisados los cuales han permitido identificar distintos aspectos relevantes de la norma incluyendo antecedentes respecto a nuevas medidas de implementación. Se enfocó la revisión de los antecedentes en identificar las medidas consideradas para la elaboración del escenario regulatorio propuesto. Dentro de los antecedentes se destaca un caso de estudio (US-EPA & French, 2020) en que se evaluó qué tecnologías tendrían que ser aplicadas en las fundiciones existentes si las normas tuvieran un alto nivel de exigencia en reducción de emisiones. La revisión de este caso permitió tanto identificar medidas de abatimiento posibles, así como sus costos y su eficiencia teórica.

A partir de los antecedentes nacionales e internacionales se seleccionaron medidas con potencial de ser implementadas en Chile (ver Tabla 7-1). Una vez identificadas las medidas de mitigación de emisiones disponibles, se realizó una compilación de sus costos y eficiencias, como se describe en la siguiente subsección.

7.1.2 Metodología para estimar costos unitarios

A partir de la identificación de medidas de abatimiento factibles de ser implementadas en las fundiciones, se realizó una compilación de sus costos y eficiencias de captura, así como consideraciones relevantes para su evaluación y aplicación. Se realizó una revisión de la literatura nacional, la cual fue complementada con las entrevistas a las fundiciones realizada en la presente consultoría, así como con cualquier antecedente relevante compartido por ellas. Del mismo modo también se buscaron antecedentes en referencias internacionales, para completar y contrastar la información disponible a nivel nacional. El detalle de los antecedentes encontrados por tipo de medida se encuentra en la Sección 4.3 del Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, de la presente consultoría, donde se incluye cada una de las referencias para su consulta.

A continuación, se sintetizan los costos considerados para la evaluación de las alternativas regulatorias de normas de calidad analizadas.

⁷⁸ A la fecha se encuentran disponible 93 documentos disponibles en el repositorio digital de la norma: <https://www.regulations.gov/docket/EPA-HQ-OAR-2020-0430/document> (disponible en abril 2022).

En primer lugar, en cuanto a los costos de inversión, estos suelen representar una fracción principal de los costos totales en instrumentos que regulan la calidad del aire. Los costos de inversión requieren estudios de ingeniería detallada que escapan de los alcances de la presente consultoría, por lo que se opta por un foco basado en la experiencia comparada con costos reportados en otras experiencias. De estas experiencias se privilegian los antecedentes nacionales entre los que destacan los antecedentes provistos por los titulares en el marco de la revisión de la norma de emisión (AngloAmerican, 2021; CODELCO, 2021), así como antecedentes levantados durante las entrevistas con los mismos⁷⁹.

Para estimar los costos unitarios se consideraron diversos factores, seleccionando uno o dos factores con información disponible para todas las fundiciones, que mejor podrían representar el proceso de escalamiento de las tecnologías. Se consideraron hasta dos componentes diferentes en algunas de las medidas, que representan las diferentes componentes de los costos, de forma que la suma de cada una de las componentes da el costo de inversión total. Los costos unitarios de inversión obtenidos en la revisión de antecedentes y utilizados para el presente análisis se presentan en la Tabla 7-1, con sus valores ajustados a UF según la moneda y año de estos.

⁷⁹ Minutas de estas reuniones disponibles en el Anexo A Digital E – Minutas

Tabla 7-1 Costo de inversión unitaria [UF según unidad indicada]

Medida de mitigación	Componente 1		Componente 2		Fuente principal de información
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	
Planta tostación	39,6	UF/t Calc/año	-		Experiencia de Planta Tostación en Antecedentes SEIA de RCA240/2010 y RCA335/2017
Captura y tratamiento gases secundarios CPS	227.600,1	UF/nCPS	0,3	UF/nProc/año	Experiencia Fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
Flotación de escorias	4,4	UF/t Proc/año	-		Experiencia en fundición Potrerillos en Antecedentes SEIA RCA 227/2011 y experiencia en fundición Caletones (CODELCO, 2021)
PTGC	0,7	UF/t Proc/año	-		Antecedentes provisto por HVL y en fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
Captura y tratamiento sangrado reactor	237.495,8	UF/nReactor	0,3	UF/t Proc/año	Experiencia Fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
Captura y tratamiento hornos escoria	237.495,8	UF/nHE o HLE	0,3	UF/t Proc/año	Experiencia Fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
Captura secundaria en boca del reactor	470.043,8	UF/nReactor	0,3	UF/t Proc/año	Experiencia Fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
Alimentación carga fría CPS	75.154,6	UF/nCPS	-		Antecedentes provistos por HVL
Captura techo y filtro de manga reactor	0,6	UF/t Proc/año	-		(US-EPA & French, 2020)
Captura techo en reactor	0,1	UF/t Proc/año	-		(US-EPA & French, 2020)
Captura terciaria en CPS	0,1	UF/t Proc/año	-		(US-EPA & French, 2020)
ESP húmedo en horno anodico	1,5	UF/t Proc/año	-		(US-EPA & Jones, 2019)

T Calc/año: Capacidad de procesamiento de calcinas medida en ton/año; nCPS: cantidad de convertidores CPS; tonProc: toneladas de mineral procesado; nReactor: cantidad de reactores; nHE/HLE: cantidad de hornos de escoria.

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, respecto a los costos de operación y mantención, los valores obtenidos se presentan en la Tabla 7-2, en UF por tonelada de concentrado procesado. En los casos en que no se presenta un costo de operación esto se debe a que el costo obtenido de los antecedentes no diferencia un costo de operación, por lo que su valor estaría contenido en el costo de capital.

Tabla 7-2 Costo operación y mantención unitaria [UF/ton concentrado procesado]

Medida de mitigación	Costo [UF/t]	Fuente principal de información
Planta tostación	11,13	(Lagos, Peters, Salas, Parra, & Pérez, 2021)
Captura y tratamiento gases secundarios CPS	-	
Flotación de escorias	-	
PTGC	0,10	Antecedentes provisto por HVL
Captura y tratamiento sangrado reactor	-	
Captura y tratamiento hornos escoria	-	
Captura secundaria en boca del reactor	-	
Alimentación carga fría CPS	-	
Captura techo y filtro de manga reactor	0,10	(US-EPA & French, 2020)
Captura techo en reactor	-1	(US-EPA & French, 2020)
Captura terciaria en CPS	-1	(US-EPA & French, 2020)
ESP húmedo en horno anodico	-	
ESP húmedo en sistemas de capturas actuales	-	

Fuente: Elaboración propia

En tercer lugar, se analizan los costos por detención por implementación de medidas de abatimiento. Este costo se refiere a los tiempos de implementación de las medidas de abatimiento y la posterior puesta en marcha, lo que incluye los periodos de adaptación desde que la producción se realiza a una menor intensidad, hasta que alcance el nivel normal. En este caso no se identificaron valores ni tiempos de detención y puesta en marcha en la literatura, por lo que según el tipo de medida se tomaron supuestos sobre los tiempos de detención para cada una:

- En particular, se tomó el supuesto de que para implementar medidas mayores que impliquen cambios en la ruta crítica de producción —es decir, en un secador, reactor de fusión, convertidor, hornos de refinado, y/o sistemas de tratamiento de escorias— se considerarán 5 meses de detención, definidos a partir de las experiencias de las implementaciones de medidas en las fundiciones Chuquicamata y Potrerillos, y 2,5 meses adicionales, correspondientes a 5 meses de puesta en marcha con producción media a 50% de lo normal. De modo que el tiempo total de detención asumido para medidas mayores es de **7,5 meses** en total.
- Para medidas de envergadura mediana, en este caso los sistemas de captura de emisiones fugitivas que se instalan en el techo o en sistemas anexos como los hornos de escoria, se asumió una detención total de **3 meses**, correspondiente a 2 meses de detención y 2 meses de producción media a 50% de lo normal, equivalente a 1 mes adicional de detención.

- Mientras que, para medidas menores, implementadas en procesos anexos, como una planta de tostación, se les definió un tiempo de detención de **1 mes** en total, equivalente a 2 meses de producción media de 50% de lo normal.

Utilizado estos tiempos de detención, para poder estimar un costo monetario se utiliza el valor agregado de la fundición, dado que durante este periodo cesa la producción. El valor agregado de la fundición se estima como la diferencia entre el precio de largo plazo de cobre y los costos directos, donde el precio de largo plazo corresponde a la proyección del precio según expertos (3,31 USD/libra), reportado por la DIPRES (2021), mientras que los costos directos se obtienen de Lagos et al. (2021) (0,94 USD/libra). El valor resultante es **143,2 UF/t** de cobre. Cabe destacar que en estos costos no se incluyen los ingresos que se dejan de percibir por la reducción en la producción de ácido sulfúrico, oro y plata, así como otros costos indirectos⁸⁰.

Finalmente, se estiman los costos por reducción del nivel de producción para dar cumplimiento a la NPCA propuesta. El razonamiento detrás de este costo es que, si las medidas adicionales que se requieren implementar para cumplir el nivel de calidad del aire definido tienen un costo total muy alto — mayor a los ingresos que se obtendrían a partir de la venta de cobre—, entonces lo lógico es que la fundición decida limitar su producción hasta el límite que permite que se cumpla la NPCA. Esta situación es relevante especialmente en la medida que los niveles analizados para la NPCA son más exigentes. En este caso, para dar valor a este costo, se estimó la intensidad de emisiones de arsénico que tendrían las fundiciones de acuerdo con su producción proyectada de cobre, para obtener un costo unitario de no producción por cumplimiento de la norma. Para esto se utilizó el mismo valor agregado del cobre estimado para el costo de detención y puesta en marcha, 143,2 UF/t.

El costo unitario obtenido en este caso depende según cuál es la fundición, por tener distinta intensidad de emisión de As por tonelada de cobre producido, como se muestra en la Tabla 7-3. Se observa que Chagres tendría el mayor costo unitario por tonelada de arsénico adicional a reducir, lo cual responde a que es la fundición con menor intensidad de emisiones (g As/t Cobre producido, ver Sección 3.3.8), lo cual implica que para reducir una tonelada de arsénico se debe dejar de producir mayor cantidad de cobre, implicando un mayor costo total.

Cabe destacar que en la Tabla 7-3 se presentan los costos unitarios que se utilizarían en el caso de que en el análisis se identifique que una fundición incurriría en este costo, lo que no quiere decir que todos estos costos unitarios estimados se utilicen en la estimación de los costos de las NPCA propuestas, presentada en la Sección 7.3.

⁸⁰ Lagos et al. reporta los siguientes costos directos: laboral, energía brutal total, mantención, consumibles, servicios en el lugar y *direct cash costs*.

Tabla 7-3 Costo por reducción del nivel de producción para dar cumplimiento a la NPCA [UF/t As]

Fundición	Costo [UF/t As]
Chuquicamata	183,553
Altonorte	352,200
Potrerillos	353,785
HVL	716,172
Ventanas	823,247
Chagres	1,801,819
Caletones	686,377

Fuente: Elaboración propia

7.2 Variables operacionales con influencia en las emisiones

En general, las variables operacionales se explican por medio de tres tipos de variables: características del concentrado, características del proceso y los niveles de producción. Si bien las emisiones reales dependen de una multiplicidad de factores, se puede simplificar su estimación en base a la combinación de las estas tres variables operacionales según se presenta en la Ecuación 41.

$$\begin{aligned}
 \text{Emisión de As } \left(\frac{\text{tonAs}}{\text{año}} \right) &= \text{Características del concentrado } \left(\frac{\text{tonAs}}{\text{tonCu}} \right) \\
 &* \text{Características del proceso } (1 - \text{eficiencia}_{\text{captura}}) \\
 &* \text{Nivel de producción } \left(\frac{\text{tonCu}}{\text{año}} \right)
 \end{aligned}$$

Ecuación 41 Emisiones a partir de variables operacionales

7.2.1 Características del concentrado

Una primera variable operacional con gran importancia en las emisiones es la composición del concentrado de cobre. Los diferentes concentrados presentan distintos contenidos de arsénico, cobre y otros metales de potencial interés para cada fundición. El contenido de cada uno de los metales en los concentrados varía según la influencia los fluidos hidrotermales y magmatismo en su lugar de origen, y de esta forma pueden variar considerablemente entre distintas minas de origen. En cuanto a emisiones, un mayor contenido de arsénico en el concentrado hace que, a mismas eficiencias de captura y fijación, mayores sea la intensidad de emisiones de la fundición. De esta forma, a mayor contenido de arsénico, mayor es el potencial de emisión por masa que entra.

En la Figura 7-1 se muestra el contenido de arsénico de los flujos de concentrados que ingresan a las fundiciones. Se observa gran diferencia entre el contenido de arsénico, el cual oscila entre 877 y 9.440 [ppm] a nivel de fundición, para Chagres y Chuquicamata respectivamente.

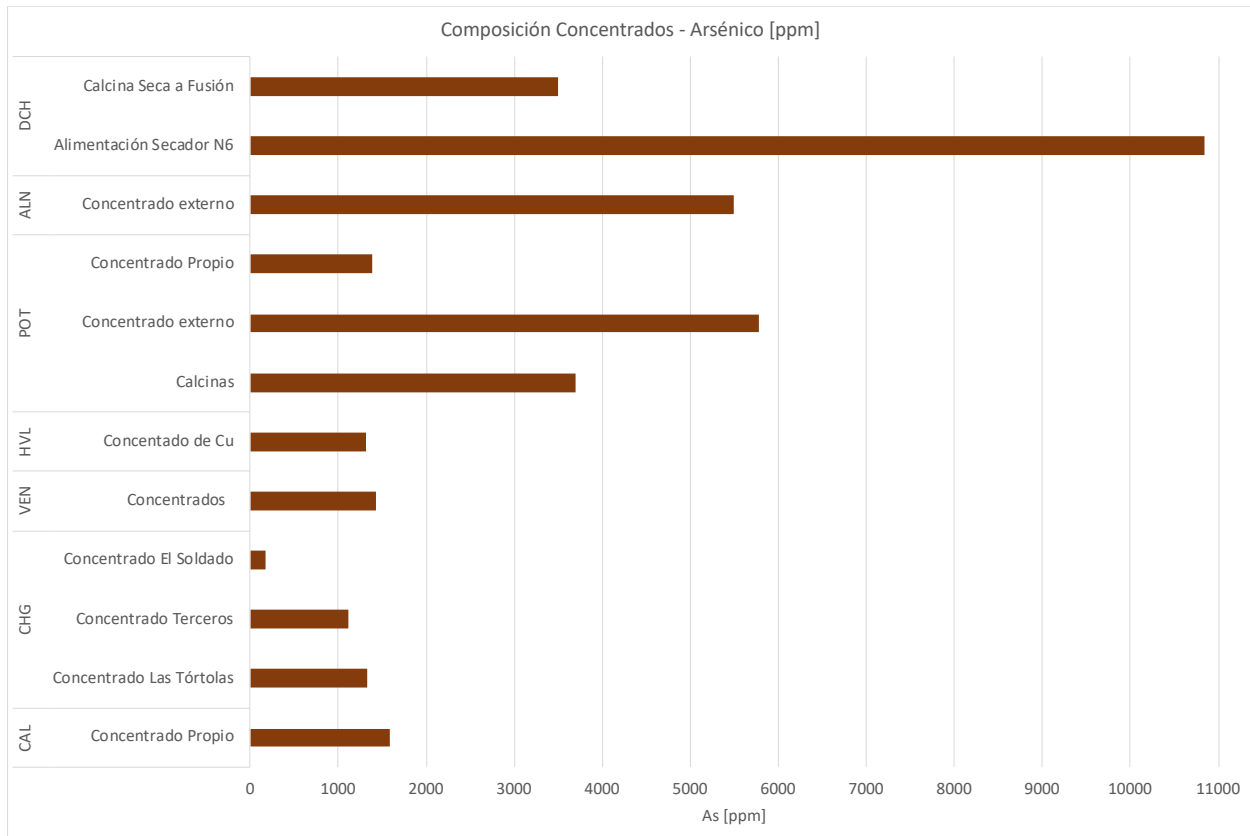


Figura 7-1 Contenido promedio de As en concentrados de cobre procesados [ppm], año 2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos periodo 2020

Es importante resaltar que la ley de cobre es igualmente importante que el contenido de arsénico, ya que, si un concentrado alto en arsénico es a su vez alto en cobre, la emisión por cobre final producido no es necesariamente alta. La relación respecto a la intensidad, es que en la medida que mayor sea la ley de cobre, menor masa de concentrado es necesaria para producir una tonelada de cobre en la fundición. En la Tabla 7-4 se muestra el ratio entre la cantidad de cobre producida y la cantidad de concentrados para cada fundición, si bien técnicamente en este ratio también depende de la eficiencia de recuperación, en general, estas eficiencias están en torno al 98% (Lagos, G., Peters, D., Videla, A., Jara, 2018), por lo que las variaciones en general se explica por los cambios en la ley de cobre de los concentrados de cobre.

Tabla 7-4 Ratio entre cobre producido y concentrados procesados

Fundición	ton de cobre por ton procesada
Chuquicamata	35,04%
Altonorte	27,58%
Potrerrillos	25,78%
HVL	25,11%
Ventanas	45,34%
Chagres	21,21%
Caletones	25,53%

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos de año 2020

7.2.2 Características del proceso

Una segunda variable operacional que influye en las emisiones son las características constructivas y operativas del proceso, las cuales resultan en diferentes niveles de captura y fijación. La comparación entre las fundiciones es compleja en la medida que las tecnologías, capacidades, equipos de abatimiento, entre otras, varía entre las fundiciones, dependiendo de las características de los concentrados, la edad de sus equipos y especificación del producto deseado. Al tratarse de una serie de procesos interconectados la disponibilidad de arsénico en cada una de las etapas es dependiente de las etapas previas. Lo anterior se complejiza aún más por la existencia de flujos de retorno, dentro de los cuales el más relevante es el proceso de recuperación de cobre de escorias, los cuales funcionan como una retroalimentación de material.

De esta forma, la emisión de cada uno de los procesos unitario, no sólo depende de la tecnología, sistemas de captura y abatimiento instalados, sino que también de la configuración completa de la fundición (COPRIM, 2012; US-EPA, 1995). La correcta mantención de los equipos y la detección oportuna de desviaciones respecto de los valores esperados en los sistemas de abatimiento, son prácticas operacionales que permiten optimizar el rendimiento operacional de cada uno de los procesos unitarios. Mayores captaciones y fijación, en general, requieren cambios tecnológicos en la configuración de la fundición, los cuales suelen requerir inversiones significativas.

Como es de esperar, la diferencias en la configuración⁸¹ generan diferencias en la captura y eficiencia. En la Tabla 7-5 se muestra la fracción de captura y fijación de arsénico para cada fundición. Dado que la emisión se cuantifica por medio de balance de masa, cada tonelada de arsénico capturada es una que no se emite.

⁸¹ Para ver la configuración actual de las fundiciones chilenas ver Sección 3.3 y/o el Informe Complementario en su Sección 3.2.

Tabla 7-5 Fracción de captura y fijación de As por fundición año 2020, según balance de masa

Fundición	As
Fundición Chuquicamata	97,3%
Fundición Altonorte	98,0%
Fundición Potrerillos	97,7%
Fundición HVL	(1) 97,0%
Fundición Ventanas	95,1%
Fundición Chagres	98,1%
Fundición Caletones	96,7%

(1) Estimación referencial, puesto que estimaciones de balance de masa no fueron estimadas con metodología aprobada.

Nota: Fracciones incluyen contenido de los elementos en los materiales de limpieza reportados para el año 2020

Fuente: Elaboración propia

7.2.3 Niveles de producción

El nivel de producción también influye directamente en el nivel de emisiones, pues cada tonelada adicional procesada emite una determinada cantidad adicional de contaminante. En la Tabla 7-6 se puede ver la capacidad, el procesamiento efectivo y el factor de planta de cada fundición en 2020. Se observan factores disímiles, lo que da cuenta de distintas realidades según la fundición, viéndose influenciadas las fundiciones de Potrerillos y Chuquicamata por encontrarse en proceso de puesta marcha aun durante el 2020, tras los cambios en su configuración para dar cumplimiento a las exigencias del DS28/2013. Se espera que a futuro aumente el nivel de procesamiento de las fundiciones en línea con las proyecciones de Cochilco, llegando a operar con factores de planta de entre 80% y 90% (ver Sección 3.4).

La diferencia entre la capacidad y el procesamiento se explica por las detenciones en alguno de los procesos unitarios de producción, cualquiera sea su motivo (mantención programada, falla, cumplimiento norma, etc.), así como por una eventual producción con niveles de carga más bajo de los nominales. En principio, una mayor cantidad de detenciones implicaría una emisión menor, ya que habría más periodos sin emitir.

Tabla 7-6 Capacidad, procesamiento y factor de planta 2020 por fundición [ton/año]

Fundición	Capacidad de procesamiento	Procesamiento 2020	Factor de planta 2020
Fundición Chuquicamata	1.400.000	661.423	47,2%
Fundición Altonorte	1.160.000	1.050.188	90,5%
Fundición Potrerillos	680.000	489.173	71,9%
Fundición HVL	380.000	313.142	82,4%
Fundición Ventanas	425.000	360.664	84,9%
Fundición Chagres	650.000	512.673	78,9%
Fundición Caletones	1.400.000	1.258.914	89,9%
Total	5.865.000	4.646.177	79,2%

Fuente: Elaboración propia según reportados por titulares en el marco del DS28/2013

En términos de emisión anual, no influye cuándo se realizan las detenciones, sino que solo importaría el factor de planta final. Sin embargo, el aporte los niveles de concentración

atmosférica a los que se expone a la población, no es indiferente a la temporalidad de las detenciones. Lo anterior, puesto que las condiciones meteorológicas afectan la dispersión de los contaminantes (ver Sección 5.1.6), y de esta forma el cuándo se detiene la fundición para realizar su mantención afecta en la magnitud en que la detención varía las concentraciones de As en las localidades de la zona de influencia. De esta forma, si las detenciones se priorizan en las épocas de peor ventilación atmosférica, se podría reducir los niveles de concentración sin modificar el procesamiento total.

7.3 Costos de las alternativas regulatorias propuestas y beneficios

Para estimar los costos referenciales para los escenarios regulatorios propuestos (ver Sección 6.5.1) se realiza una selección de medidas de reducción de emisiones que resulten en un nivel de calidad del aire *acceptable*. Desde el punto de vista de económico la implementación de estas medidas implican en costos incurridos, que resultan en beneficios y co-beneficios (ver Figura 7-2). Desde el punto de vista de la comparación entre costos y beneficios realizada en la Sección 7.3.4, se consideran estos tres tipos de efectos socioeconómicos.

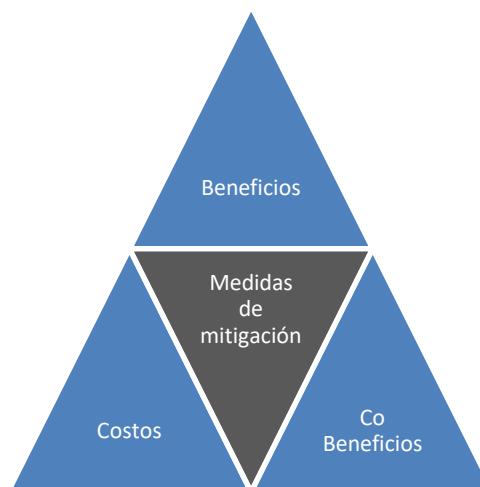


Figura 7-2 Efectos socioeconómicos de las medidas de mitigación

Fuente: Elaboración propia

Los costos corresponden a los costos de inversión, operación, mantención y, en general, cualquier gasto incremental asociado a la instalación y funcionamiento de la medida de mitigación. Dentro de estos se incluyen los gastos por detención, y su consiguiente pérdida de productividad, asociada al proceso de instalación de las diferentes tecnologías. La metodología para la estimación de los costos, considera por un lado la selección de medidas de mitigación (Sección 7.3.1) y la estimación de sus costos a partir de los costos unitarios estimados (ver Sección 7.1)

Los beneficios sociales asociados a una NPCA de arsénico provienen de la reducción de los efectos en salud, según la metodología detallada en la Sección 6.4. Si bien los beneficios de la NPCA se

presentan en la Sección 6.5.2, la selección de medidas de mitigación puede resultar en mayores beneficios mayor. Esto ocurre en los casos en que para cumplir con las exigencias de la NPCA se decide por aplicar una medida de mitigación con reducciones mayores a las requeridas. Lo anterior ocurre pues las reducciones disponibles no son lineales, por lo que la selección de las medidas puede resultar en mayores beneficios que los presentados en la Sección 6.5.2.

Por su parte, los co-beneficios corresponden a aquellos beneficios producidos por las medidas de mitigación implementadas a causa de la NPCA de As, pero que no se asocian a las reducciones de As. En particular, para el presente estudio los beneficios estimados se asocian a las reducciones de las emisiones de MP a consecuencia de las medidas de mitigación para controlar emisiones de As. El método y resultados de la estimación de estos co-beneficios se presenta en la Sección 7.3.3.

7.3.1 Selección de medidas de mitigación

El método de selección de las medidas de mitigación busca simular el comportamiento de los privados que deciden qué medidas de mitigación implementar en las distintas fuentes. Para ello se considera que los costos son incurridos por los privados, mientras que los beneficios en salud no son directamente percibidos por quienes toman las decisiones, de esta forma la simulación de la decisión privada se basa en minimizar los costos, sujetos al cumplimiento de la norma de calidad. De esta forma, las medidas se agrupan en *paquetes*, los cuales resultan en determinados costos y reducciones, seleccionando aquel *paquete* con menor costo que cumpla con el límite de los escenarios propuestos de NPCA. Matemáticamente, lo anterior se expresa en la Ecuación 42.

$$\text{Min}\{ \text{Costos Totales} = \sum_{\substack{p \in \text{medidas en paquete} \\ f \in \text{fundición}}} \text{Costo Medida}_{p,f} \}$$

s. a.

$$(1) \text{Emisión}_{f,p} = \text{Emisión}_f^{\text{sin paquete}} - \sum_{p \in \text{medidas en paquete}} \text{Reducción}_{p,f}$$

$$(2) \text{Concentración}_{l,p} = \frac{\text{Emisión}_{f,p}}{\text{FEC}_{f,l}}$$

$$(3) \text{Límite Concentración}_{\text{Esc.NPCA}} \geq \text{Concentración}_{l,p}$$

Donde,

f: fundición

p: paquete de medidas

l: localidad

Esc NPCA: Escenario de NPCA

Ecuación 42 Modelo de selección de paquetes de medidas

Cabe destacar que dentro del modelo se considera como parte de las medidas incluidas en los paquetes, la opción de que una fundición logre la reducción de emisión necesaria para dar cumplimiento por medio de la reducción de sus niveles de producción. Dado el alto costo de esta detención (ver Sección 7.1.2), la reducción de los niveles de producción ocurre en dos casos: (1) ya no hay más medidas de mitigación disponible para incluir en el paquete, o (2) el costo total de incluir una nueva medida es mayor al costo de ingresos reducidos por menores niveles de producción.

Por la forma en que se plantea el método de selección de medidas y, dado que se espera que las fundiciones sean las mayores fuentes de arsénico⁸², la solución general equivale a minimizar el costo para cada una de las fundiciones individualmente. Es decir, para cada una de las fundiciones se elige un paquete de medidas que permite alcanzar los niveles de las alternativas propuestas de NPCA. De esta forma, el paquete de medidas seleccionadas para cada una de las fundiciones bajo los distintos escenarios se presenta en la Tabla 7-7.

⁸² Situación que se acrecienta en la medida que avanzan la estrategia de descarbonización que implica el cierre de otras fuentes de arsénico: las centrales eléctricas a carbón (ver Sección 3.4.1)

Tabla 7-7 Paquete de medidas seleccionadas para cada fundición en propuestas de escenarios de NPCA

Fundición	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chuquicamata	Reactor: - Captura y tratamiento sangrado reactor Captura en techo de reactor	Reactor: - Captura y tratamiento sangrado reactor Captura en techo de reactor	Reactor: Captura y tratamiento sangrado reactor Captura en techo de reactor y filtro de manga
	CPS: - Captura Terciaria en CPS	CPS: - Captura Terciaria en CPS	CPS: - Captura Terciaria en CPS
	Horno Anódico: - ESP húmedo en horno anódico	Horno Anódico: - ESP húmedo en horno anódico	Horno Anódico: - ESP húmedo en horno anódico
	Reducción niveles producción: -	Reducción niveles producción: -	Reducción niveles producción: - Para evitar emisiones de 57,4 t/año, equivalente a una reducción de 20% de producción
Altonorte	-	-	-
Potrillos	-	-	-
Hernán Videla Lira	Reactor: - Captura secundaria en boca de reactor	Reactor: - Captura secundaria en boca de reactor	Reactor: Captura y tratamiento sangrado reactor Captura secundaria en boca de reactor Captura en techo de reactor
	Horno de escoria: Captura y tratamiento hornos escoria	Horno de escoria: Reemplazo de horno por sistema de flotación	Horno de escoria: Reemplazo de horno por sistema de flotación
Ventanas	Reactor: Captura secundaria en boca de reactor Captura en techo de reactor	Reactor: Captura secundaria en boca de reactor Captura en techo de reactor	Reactor: Captura secundaria en boca de reactor Captura en techo de reactor y filtro de manga
	CPS: -	CPS: -	CPS: - Captura Terciaria en CPS
	Horno de escoria: -	Horno de escoria: Reemplazo de horno por sistema de flotación	Horno de escoria: Reemplazo de horno por sistema de flotación

Fundición	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chagres	Reactor: -	Reactor: -	Reactor: Captura y tratamiento sangrado reactor
Caletones	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

De los paquetes de medidas seleccionados (ver Tabla 7-7) se observa que en la medida que los escenarios son más ambiciosos, el número de medidas y su ambición aumentan de forma relevante. Es destacable que, en el escenario regulatorio más ambicioso, incluso se llegan a incluir medidas como la reducción de los niveles de producción para dar cumplimiento a los NPCA. De esta forma se logran las reducciones de emisiones requeridas para dar cumplimiento a los niveles propuestos de NPCA, lo cual se puede observar en la Tabla 7-8.

Tabla 7-8 Estimación de reducción de emisiones lograda y requerida

Fundición	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chuquicamata	-	158,6 (152,1)	224,9 (224,9)
Altonorte	-	-	-
Potrerrillos	-	-	-
Hernán Videla Lira	5,7 (5,0)	14,6 (13,2)	16,9 (16,2)
Ventanas	5,8 (3,6)	22,5 (17,8)	23,4 (22,9)
Chagres	-	-	1,2 (0,0)
Caletones	-	-	-

Nota: entre paréntesis se presenta la estimación de las reducciones requeridas

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7-8 se observa como en la medida que aumenta la ambición de las medidas, los márgenes de sobrecumplimiento se van acortando, observándose que en el escenario más ambicioso virtualmente no existe ningún margen. Al respecto cabe destacar que existen incertidumbres propias de la modelación que podrían resultar que en determinadas condiciones las reducciones no sean suficientes. Se destaca también que, además de las medidas de mitigación modeladas, existen prácticas operacionales que también tienen influencia en las emisiones y que podrían permitir lograr reducciones mayores, incluso evitando que sea necesario la detención modelada.

7.3.2 Costos totales de alternativas regulatorias

Los costos totales de las alternativas regulatorias corresponden a la suma de los costos incrementales de cada una de las fundiciones considerando inversiones, operación, mantención, costos por tiempos de detención (y *ramp up*) para instalación y los costos por reducción de los niveles de producción para dar cumplimiento a la NC. Tal como se explica previamente, en la presente consultoría se propone realizar la comparación de beneficios y costos en línea con los últimos análisis seguidos por la US-EPA, siguiendo un enfoque temporal de un año de evaluación. Con este enfoque se comparan los beneficios de un año con los costos anualizados asociados a la implementación del escenario regulatorio, donde el año a seleccionar corresponde a un año donde se haya alcanzado los niveles descritos en la normativa.

De esta forma los costos asociados a la instalación de las medidas, es decir las inversiones y tiempo de detención durante la instalación, se anualizan en un período de 20 años y utilizando como tasa de descuento la tasa de descuento social vigente: 6%. Por su parte, los costos de

operación y mantención, así como las eventuales reducciones en los niveles de procesamiento son estimados a partir de la producción proyectada para cada año.

Los costos de los escenarios regulatorios⁸³, los cuales corresponden a la suma de los costos de las medidas presentadas en la Tabla 7-7, se presentan en la Tabla 7-9. Se observa que los costos aumentan de forma significativa entre los diferentes escenarios. De esta forma, el escenario de 1 en 10k, que exige un límite equivalente al 50% del límite exigido en el escenario 2 en 10, presenta costos que son 7 veces mayores. De la misma forma el escenario más ambicioso tiene un costo estimado más de 100 veces mayor que el costo estimado para el escenario 2 en 10k.

Se observa que en los escenarios menos exigentes los costos están dominados por los costos de inversión, los cuales representan un 88% del total de costos, en el caso del escenario 2 en 10k, y un 91% en el caso del escenario 1 en 10k. Por su parte, el escenario más ambicioso está dominado por los costos de detención para dar cumplimiento a la NC, fundamentalmente en Chuquicamata, los cuales por sí sólo representan el 90% de los costos estimados.

⁸³ En el Anexo digital G – Resultados CB Escenarios, se presenta el detalle de los costos por fundición, tipo de costo, escenario y para diferentes años.

Tabla 7-9 Costos totales de alternativas regulatorias [UF/año], por fundición y tipo de costo para año de referencia

Fundiciones	Tipo de Costo	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Fundición Chuquicamata	Inversión	-	232.000	281.200
	O&M	-	29.700	123.900
	Detención para instalación medidas	-	6.195	6.195
	Detención para cumplir NC	-	-	10.540.000
Fundición HVL	Inversión	30.460	195.700	231.000
	O&M	2.132	10.790	17.860
	Detención para instalación medidas	690	966	1.519
Fundición Ventanas	Inversión	57.130	219.400	242.700
	O&M	8.590	16.700	51.130
	Detención para instalación medidas	1.055	2.373	2.901
Fundición Chagres	Inversión	-	-	37.390
	O&M	-	-	2.617
	Detención para instalación medidas	-	-	388
Total		100.100	713.800	11.540.000

Nota: Resultados presentados con cuatro cifras significativas

Fuente: Elaboración propia

7.3.3 Estimación de co-beneficios

Los co-beneficios corresponden a otros beneficios asociados a las medidas de mitigación, que no se vinculan directamente con las reducciones de los niveles de arsénico. De estos co-beneficios, los mayores provendrían de la mejora en la salud de la población expuesta asociada a la reducción de las emisiones de material particulado.

Los efectos en salud del material particulado han sido largamente estudiados, y son largamente utilizados en la estimación de beneficios y co-beneficios de regulaciones para la gestión de la calidad del aire (GreenLab, 2018; MMA, 2013b). El método de estimación de los beneficios asociado a este tipo de contaminantes se basa en la Guía Metodológica para la elaboración de AGIES del MMA (2013b), donde los diferentes parámetros han sido actualizados para reflejar el estado del arte. La compilación de estas actualizaciones, así como otros detalles se presentan en el Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico en su Sección 7.4, pero cabe destacar que los resultados de la aplicación de esta metodología dependen fuertemente de los coeficientes dosis-respuestas. Los coeficientes utilizados para la estimación de los actuales beneficios se presentan en la Tabla 7-10, observándose que se seleccionan fuentes utilizadas comúnmente en evaluaciones nacionales e internacionales (GreenLab, 2018, 2020).

Tabla 7-10 Coeficientes de Dosis-Respuesta para MP2,5 (por $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tipo de efecto	Causa	Grupo etario	Coeficiente	Fuente
Mortalidad	Todas las causas	30+	$9,47 \times 10^{-3}$	(Krewski et al., 2009; Lepeule, Laden, Dockery, & Schwartz, 2012)
Admisiones Hospitalarias	Enfermedades cardiovasculares	18-64	$1,40 \times 10^{-3}$	(Moolgavkar, 2000)
	Enfermedades cardiovasculares	65+	$1,89 \times 10^{-3}$	(Zanobetti, Franklin, Koutrakis, & Schwartz, 2009)
	Enfermedades respiratorias	65+	$1,39 \times 10^{-3}$	(Kloog, Coull, Zanobetti, Koutrakis, & Schwartz, 2012; Zanobetti et al., 2009)
	EPOC	18-64	$2,20 \times 10^{-3}$	(Moolgavkar, 2000)
	Asma	<65	$3,32 \times 10^{-3}$	(Sheppard, 2003)
Visitas sala emergencia	Asma	Todas	$1,39 \times 10^{-3}$	(Glad et al., 2012; Mar, Koenig, & Primomo, 2010; Slaughter et al., 2005)
Días laborales perdidos	Todas las causas	18-64	$4,60 \times 10^{-3}$	(Ostro, 1987)

Nota: En los casos que se presenta más de una fuente para un coeficiente, el valor que se presenta corresponde al promedio entre las fuentes.

Fuente: Elaboración propia

Considerando la metodología, para determinar los co-beneficios es necesario estimar la variación de los niveles de concentración de MP2,5 a causa de las medidas implementadas para el control del arsénico. Para ello se propone utilizar el ratio de contribución de las fundiciones de As : MP2,5, estimado para las estaciones de monitoreo, según lo presentado en la Ecuación 43.

$$\Delta MP2.5_f^e \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{\Delta As_f^e \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right]}{Ratio_{MP2.5}^{As}} \quad , \text{ para } e: \text{ estación, } f: \text{ fundición}$$

Ecuación 43 Estimación de variación en las concentraciones de MP2,5 a partir de las variaciones de concentraciones de arsénico

El supuesto implícito detrás de la Ecuación 43 es que la relación entre el aporte de las fundiciones a las concentraciones de arsénico y su aporte al MP2,5 es lineal. Ante la falta de inventarios detallados de las emisiones de material particulado fugitivas en las fundiciones, este supuesto es una aproximación razonable para estimar los co-beneficios. La contribución de MP2,5 se obtienen de diferentes fuentes, privilegiando estudios previos según se explícita en la Tabla 7-10. La contribución de As, para cada año y estación requerida según la información de MP2,5, se estima en base a los datos históricos de arsénico (ver Sección 2.3.2) descontando la estimación de la concentración basal estimada estadísticamente según lo descrito en los Anexos (Sección 10.4). El detalle del ratio As : MP2,5 considerado se presenta en la Tabla 7-11.

Tabla 7-11 Ratio de contribución de fundiciones a As y MP2,5

Fundición	As : MP2,5	Fuente contribución de fundición a MP2,5
Fundición Chuquicamata	3,2%	AGIES Anteproyecto PDA Calama (MMA, 2019), utilizando emisiones y FEC para estación 23 de marzo
Fundición Altonorte	5,4%	Estudio de Calidad del Aire, Sector La Negra (SISTAM, 2021), Estación Inacesa
Fundición Potrerillos	0,8%	Estimación propia en base a análisis estadístico de calidad el aire reportada en estación Cine Inca, período 2016-2020
Fundición HVL	2,7%	Promedio de las demás fundiciones
Fundición Ventanas	3,1%	AGIES Anteproyecto PPDA Concón, Quintero y Puchuncaví (MMA, 2018)
Fundición Chagres	0,9%	Evaluación costos medidas efectivas para diseñar un instrumento de gestión ambiental en la zona interior de la región de Valparaíso (GreenLab-Dictuc, 2019), contribución de fuentes fijas a Catemu. Valor en el orden de magnitud, aunque levemente superior, a lo observado en estación Santa Margarita en estudio sobre modelo receptor realizado para la fundición Chagres (Particulotech, 2021)

Nota: para la fundición Caletones no se contó con antecedentes que permitiera la estimación. Se destaca que en su área de influencia no se supera ninguno de los escenarios de NPCA, por lo que tampoco habrían co-beneficios.

Fuente: Elaboración propia

Se destaca que los valores presentados en la Tabla 7-11 a pesar de tener orígenes distintos se mantienen dentro del mismo orden de magnitud, con un rango entre 0,8% a 5,4%. Este antecedente se utilizó para proponer un valor para el caso de la fundición HVL. En este caso no se contaron con antecedentes que permitieran obtener una estimación, ante lo cual se utiliza como mejor supuesto el valor medio de las demás fundiciones. Dado lo sensible de este parámetro para los resultados finales, se propone una sensibilización considerando los valores máximos y mínimos observados en las otras fundiciones.

Con los supuestos anteriores para estimar la variación de las concentraciones de MP2,5, se aplica la metodología propuesta por la Guía para Elaboración de AGIES (MMA, 2013b). La estimación de co-beneficios anuales⁸⁴ se presenta en la Tabla 7-12, donde se observa que al igual que los beneficios estimados de la NPCA se vinculan a las áreas más pobladas. De esta forma, Copiapó percibe un 50%, 45% y 83% de los co-beneficios estimados, según los escenarios ordenados de más ambicioso a menos ambicioso. De la misma forma, Calama representa un 26% de los co-beneficios, en los escenarios donde hay mejoras de la calidad del aire, mientras que Quintero representa cerca de 12.5% de los co-beneficios en todos los escenarios regulatorios.

⁸⁴ En el Anexo digital G – Resultados CB Escenarios, se presenta el detalle de los co-beneficios por localidad, alternativa de escenario regulatorio, tipo de beneficio, y escenario de sensibilidad As : MP2,5 en HVL.

Tabla 7-12 Estimación de beneficios [UF/año], por escenario y localidad para año de referencia

Fundición	Localidades	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chuquicamata	Calama	-	74.272	105.156
	ChiuChiu	-	11	15
HVL	Copiapó	85.352	219.356	253.212
	Tierra Amarilla	3.062	7.884	9.105
Ventanas	Quintero	13.826	53.856	55.872
	Puchuncaví	517	2.020	2.096
	Ventanas	1.113	4.350	4.513
Chagres	Catemu	-	-	798
	Panquehue	-	-	395
	Llayllay	-	-	1.027
Total		103.870	361.748	432.188

Fuente: Elaboración propia

Un análisis por los efectos considerados, cuyos resultados se presentan en la Tabla 7-10, permite observar que la mayor parte de los co-beneficios estimados se asocian a la reducción de los casos de mortalidad prematura en adultos (Mort-All-30+), las cuales representan el 99,8% de los co-beneficios estimados. De lejos, siguen reducciones en las admisiones hospitalarias por cardíacas (HA-CVD), las cuales representan casi el 80% de los co-beneficios restantes.

Tabla 7-13 Estimación de co-beneficios [UF/año], por escenario y efecto considerado, para año de referencia

Beneficios	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Mort-All-30+	103.660	360.998	431.285
HA-CVD-65+	114	388	461
HA-CVD-18-64	52	201	246
HA-RSP-65+	3	12	14
HA-CLD-18-64	0	1	2
HA-Asth-<65	0	1	1
ERV-Asth-All	18	67	81
WLD-All-18-64	21	81	99
Total	103.870	361.748	432.188

Nota: la traducción de la notación de los beneficios puede consultarse en la Sección 7.5.2 del Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico.

Fuente: Elaboración propia

Por último, se presenta la sensibilización de los resultados de co-beneficios al ratio As : MP2,5 en la fundición de HVL. Se observa que en el caso en que este ratio alcanza un valor equivalente al mayor valor observado en las otras fundiciones, los co-beneficios se reducen entre un 30% y 43%, dependiendo el escenario, respecto del valor medio. En el caso opuesto, cuando se considera un ratio equivalente al menor valor observado en las otras fundiciones, los co-beneficios aumenta entre un 140%-201%.

Tabla 7-14 Sensibilización de co-beneficios [UF/año] por escenario y escenario de relación As : MP2,5 en HVL, para año de referencia

Esc. Relación As : MP2,5 en HVL	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
5,4%	59.478	247.904	300.845
2,7%	103.870	361.748	432.188
0,8%	312.294	889.505	1.039.109

Fuente: Elaboración propia

7.3.4 Comparación de costos y beneficios

Los beneficios estimados de los diferentes escenarios regulatorios se pueden desagregar en tres componentes. En primer lugar los beneficios directos de la NPCA, los cuales representan los beneficios por alcanzar los niveles de concentración de arsénico establecidos en las alternativas regulatorias en aquellas zonas cuya proyección los supera (ver Sección 6.5.1). En segundo lugar, están aquellos beneficios que resultan de reducciones de emisiones de As mayores a las requeridas, asociadas a la implementación de los paquetes de medidas seleccionados. Estos beneficios se estiman de la misma forma que los beneficios directos de la NPCA, cuya metodología de cálculo se presenta en la Sección 6.4, y sus resultados se presentan en la Tabla 7-15. El tercer componente de los beneficios estimados corresponde a los co-beneficios, que en este caso corresponden a las mejoras en salud de la población expuesta, producto de la mejora de la calidad del aire en MP2,5.

Tabla 7-15 Beneficios de la NPCA [UF/Año] por reducciones adicionales de arsénico, para año de referencia

Principal fuente	Localidades	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chuquicamata	Calama	-	179	-
	ChiuChiu	-	0	-
HVL	Copiapó	403	851	447
	Tierra Amarilla	15	31	16
Ventanas	Quintero	159	343	37
	Puchuncaví	6	12	1
	Ventanas	12	27	3
Chagres	Catemu	-	-	8
	Panquehue	-	-	4
	Llayllay	-	-	10
Total		595	1.442	526

Nota: Valores estimados considerando la IUR recomendada por la US-EPA. De considerar la IUR de la OMS los beneficios son 2,89 veces menores.

Fuente: Elaboración propia

De esta forma los beneficios de los escenarios regulatorios son los presentados en la Tabla 7-16 y Figura 7-3. Se observa que para la alternativa con un riesgo *acceptable* equivalente a una incidencia de 2 en 10 mil durante toda la vida, los beneficios superan las 150 mil UF/año. En la segunda alternativa, con un riesgo *acceptable* equivalente a una incidencia de 1 en 10 mil durante toda la vida, los beneficios alcanzarían cerca de 380 mil UF/año, es decir, 2,4 veces los beneficios

del primer escenario. Por último, la alternativa más ambiciosa alcanza cerca de 470 mil UF/año, equivalente a 3,1 veces los beneficios estimados para el escenario más laxo.

Se destaca también que la componente de mayor relevancia en los beneficios corresponde a los co-beneficios productos de la mejora de la calidad del aire en términos de MP2,5, los cuales representan cerca de 97% de los beneficios totales en todos los casos.

Tabla 7-16 Beneficios estimados [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia

Componente	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc Cont Lim (15,0)
Beneficios directos de la NPCA	2.580	10.408	13.573
Beneficios por reducción adicionales de As	595	1.442	526
Co-Beneficios por reducción de niveles de MP2,5	103.870	361.748	432.188
Total	107.045	373.598	446.287

Fuente: Elaboración propia

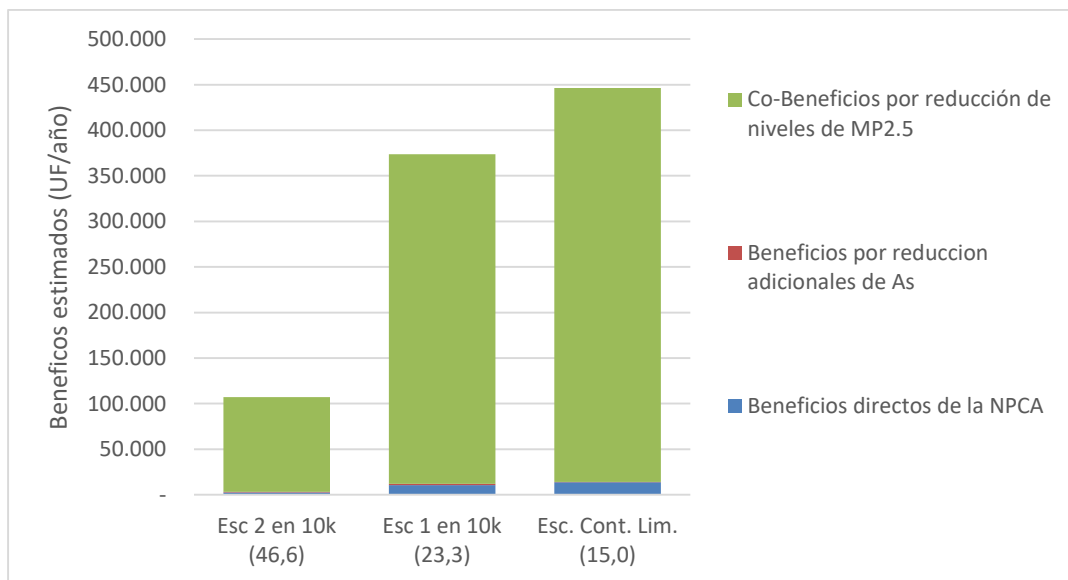


Figura 7-3 Beneficios estimados [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia

Fuente: Elaboración propia

De la comparación entre los beneficios recién presentados y los costos estimados en la Sección 7.3.2, se observa que los beneficios y costos se encuentra en el mismo orden, con la excepción del escenario más ambicioso donde los costos están un orden de por encima de los beneficios. La magnitud de los beneficios estimados es mayor que los costos en el escenario con un nivel de norma equivalente a 2 en 10 mil (46,6 ng/m³), mientras que en los otros escenarios los costos son mayores. Esto se observa en los resumen de indicadores presentados en la Tabla 7-17.

Tabla 7-17 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia

Escenario	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Esc 2 en 10k (46,6)	11	100.051	0,2	5,4	105.802	1,06
Esc 1 en 10k (23,3)	196	713.756	0,7	18,9	369.031	0,52
Esc Cont Lim (15,0)	266	11.542.409	0,8	22,6	441.151	0,04

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7-17 se observa como en la medida que aumenta la ambición de las alternativas regulatorias propuestas los beneficios tienden aumentar linealmente, mientras que los costos aumentan exponencialmente, en la medida que los costos marginales son mayores para las últimas reducciones en cada una de las fundiciones. Cabe destacar que la distribución de los costos y beneficios varía entre las diferentes fundiciones, lo cual se puede observar en la Tabla 7-18, Tabla 7-19 y Tabla 7-20.

Es interesante la dispersión de los resultados del indicador B/C entre las diferentes fundiciones; para HVL se observa que en todos los escenarios se observa que este indicador es mayor a la unidad en todas las fundiciones, situación que no se repite en las otras fundiciones donde los resultados están normalmente bajo la unidad, indicando que socialmente los beneficios son menores que los costos. La explicación de esto guarda relación con los amplios espacios para instalación de medidas de reducción de emisiones a un costo eficiente en HVL, asociado, por ejemplo, a la captura de gases secundarios y la instalación de una planta de flotación de escoria que sustituya los actuales hornos de escoria. Asimismo, los resultados del indicador se ven beneficiados por una población expuesta relativamente alta (superior a las 170 mil habitantes), que hace que las mejoras en calidad del aire tengan un beneficio social mayor.

En contraposición los resultados de las demás fundiciones son menores a la unidad. En el caso de Ventanas, fundición que ya cuenta con una serie de sistemas para la captura y abatimiento de sus emisiones fugitivas, las medidas adicionales para dar cumplimiento son más costosas lo que resulta en costos medios de reducción superiores. En el escenario "1 en 10 k (23,3)", el nivel de reducciones necesarias justifica la instalación de un sistema de flotación de escorias para reemplazar los hornos de escoria, el cual, si bien tiene un costo total mayor, tiene un costo medio más bajo, lo cual resulta en que el indicador B/C aumente levemente respecto al escenario previo. Por su parte Chuquicamata, al igual que Ventanas ya cuenta con medidas de implementación ya instaladas, lo que hace que las medidas adicionales seleccionadas sean más costosas. En este caso particular, la modelación indica que, para alcanzar los niveles requeridos en el escenario más ambicioso, la fundición debiera incluso reducir su nivel de producción, lo cual resulta en costos significativos. Por último, la fundición Chagres se ve perjudicada por la escasa población expuesta lo que resulta en que la mejora en la calidad del aire resulte en beneficios comparativamente menores en comparación con otras zonas.

Tabla 7-18 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc 2 en 10k (46,6)”, año de referencia

Fundición	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Fundición Chuquicamata	-	-	-	-	-	-
Fundición Altonorte	-	-	-	-	-	-
Fundición Potrerillos	-	-	-	-	-	-
Fundición HVL	5,7	33.282	0,16	4,7	91.089	2,74
Fundición Ventanas	5,8	66.769	0,02	0,8	15.802	0,24
Fundición Chagres	-	-	-	-	-	-
Fundición Caletones	-	-	-	-	-	-
Total	11,4	100.051	0,18	5,5	106.891	1,07

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-19 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc 1 en 10k (23,3)”, año de referencia

Fundición	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Fundición Chuquicamata	158,6	267.883	0,19	3,9	77.502	0,29
Fundición Altonorte	-	-	-	-	-	-
Fundición Potrerillos	-	-	-	-	-	-
Fundición HVL	14,6	207.411	0,41	12,0	234.146	1,13
Fundición Ventanas	22,5	238.462	0,08	3,2	61.578	0,26
Fundición Chagres	-	-	-	-	-	-
Fundición Caletones	-	-	-	-	-	-
Total	195,8	713.756	0,68	19,2	373.226	0,52

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-20 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc Cont Lim (15,0)”, año de referencia

Fundición	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Fundición Chuquicamata	224,9	10.954.956	0,27	5,6	109.734	0,01
Fundición Altonorte	-	-	-	-	-	-
Fundición Potrerillos	-	-	-	-	-	-
Fundición HVL	16,9	250.333	0,47	13,9	270.298	1,08
Fundición Ventanas	23,4	296.725	0,08	3,3	63.884	0,22
Fundición Chagres	1,2	40.395	0,00	0,1	2.236	0,06
Fundición Caletones	-	-	-	-	-	-
Total	266,4	11.542.409	0,83	22,9	446.152	0,04

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

Para complementar el análisis de los resultados en la Tabla 7-21 se presentan los costos y beneficios medios estimados para las distintas fundiciones. Se observa que los beneficios medios son constantes⁸⁵ para cada una de las fundiciones, mientras que los costos medios son crecientes en la medida que aumenta la ambición de los escenarios normativos.

Tabla 7-21 Costos y benéficos medios por fundición y escenario, año de referencia

Fundición	Costos Medios [UF/ton As]			Beneficios Medios [UF/caso de cáncer evitado]		
	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Fundición Chuquicamata	n.a.	1.689	48.721	n.a.	405.388	404.957
Fundición HVL	5.877	14.188	14.818	573.426	570.973	570.352
Fundición Ventanas	11.586	10.578	12.686	769.970	767.065	766.919
Fundición Chagres	n.a.	n.a.	32.892	n.a.	n.a.	2.331.906

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Tabla 7-22 se observa la estimación del indicador B/C frente a la sensibilización del parámetro IUR (ver Sección 6.3 para mayor discusión de cómo se utiliza este valor) y del valor estimado para el parámetro As : MP2,5 en las localidades en torno HVL. Se observa que, entre estos dos factores, los resultados son más sensibles al parámetro As : MP2,5 en las localidades cercanas a la fundición HVL. Justamente en torno a este parámetro se observa que los resultados del indicador B/C puede cruzar la unidad. Por ejemplo, para el escenario “2 en 10k (46,6)” una relación muy alta de As a MP podría resultar en beneficios menores a los costos. De la misma forma, en el escenario “1 en 10k (23,3)” una relación más bajo de As : MP2,5 puede resultar en beneficios mayores a los costos. Cabe destacar que este parámetro afecta únicamente la estimación de los co-beneficios de las localidades en torno a la fundición de HVL.

Tabla 7-22 Sensibilidad de B/C frente a IUR y escenario As : MP2,5 en HVL

Escenario As : MP2,5 en HVL	Esc 2 en 10k (46,6)		Esc 1 en 10k (23,3)		Esc. Cont. Lim. (15,0)	
	OMS	US-EPA	OMS	US-EPA	OMS	US-EPA
5,4%	0,61	0,62	0,35	0,36	0,03	0,03
2,7%	1,05	1,06	0,51	0,52	0,04	0,04
0,8%	3,13	3,15	1,25	1,26	0,09	0,09

Fuente: Elaboración propia

⁸⁵ Se observan pequeñas variaciones (< 0,3%) explicadas por redondeos y agrupaciones de los valores.

8. Conclusiones

El presente estudio se desarrolló para dar cumplimiento al objetivo de entregar antecedentes para la elaboración de una NPCA de arsénico. Para ello se realizó una revisión, sistematización y análisis de la calidad del aire, las emisiones del contaminante, sus consecuencias en la salud humana y la relación emisión concentración. A partir de la revisión de estos antecedentes, en conjunto con la experiencia internacional, se proponen tres alternativas de escenarios regulatorios, los cuales son evaluados en términos de beneficios y costos sociales. A continuación, se presentan las conclusiones del desarrollo de las diferentes actividades.

Sobre el análisis de la **calidad del aire**, los niveles de concentración de arsénico observados en las estaciones del país oscilan en un amplio rango, con zonas con concentraciones promedios anuales cercanas a 1 ng/m³, mientras otras tienen valores medios muy por sobre los 100 ng/m³, con Doña Inés cercana a la fundición Potrerillos con valores por sobre 1 ug/m³. Si bien, las estaciones con las mayores concentraciones de As son estaciones de monitoreo que no cuentan con representatividad poblacional, dan cuenta de la amplia variación de valores que se pueden encontrar en el país, las cuales dependen tanto de las condiciones base como los aportes basales, la topología y meteorología, como de otras condiciones como la ubicación de las estaciones de monitoreo respecto de las fuentes emisoras y el nivel de emisión de estas últimas.

A pesar de la variabilidad de las concentraciones observadas de arsénico, se observa que consistentemente las zonas cercanas a las fundiciones de Cobre tienen concentraciones mayores al resto de las zonas del país. De esta forma considerando localidades en las cercanías de las fundiciones⁸⁶ con estaciones de control se observa una concentración promedio anual ponderada por población de 20,8 ng/m³. Aun así, dentro de estas localidades se observan diferencias relevantes, con concentraciones en el año 2020 que superaron en promedio los 40 ng/m³ (La Negra, Copiapó y Quintero), mientras que otras estaciones tienen concentraciones promedias menores a 10 ng/m³ (ChiuChiu, Antofagasta, El Salvador y Coya). En contraposición, las mediciones de arsénico en lugares fuera del área de influencia de las fundiciones, se observan niveles menores a 4 ng/m³, salvo en dos estaciones ubicadas en el desierto de Atacama. En estas dos estaciones los niveles promedian 10 ng/m³, dando cuenta de la influencia del aporte basal del desierto sobre los niveles observados.

El análisis anterior está limitado por la falta de información en otras zonas, pues de las 46 estaciones con mediciones de arsénico 72% de ellas están ubicadas en zonas de influencia de las fundiciones. Asimismo, estas estaciones también tienen las series de tiempo más largas y, en general, una mayor frecuencia de medición. Sin embargo, las observaciones en otras zonas incluyen zonas afectadas por diferentes fuentes tales como termoeléctricas (Tocopilla y

⁸⁶ Considerando, Chuquicamata: Calama y ChiuChiu; Altonorte: La Negra y Antofagasta; Potrerillos: El Salvador y Potrerillos; HVL: Copiapó y Tierra Amarilla; Ventanas: Quintero, Puchuncaví y Ventanas, Chagres: Catemú; Caletones: Coya.

Mejillones), refinerías (Concón), así como ciudades (Santiago y Temuco). Esta variedad de fuentes hace presumir que, en el resto de las zonas, actualmente sin medición, también tendrían valores de arsénico bajos (<5 ng/m³). La excepción serían aquellas zonas afectadas con niveles basales, tal como lo muestran las mediciones en estaciones cercanas a la minera Spence, o las estimaciones de la contribución basal en Calama, donde se encontrarían niveles cercanos a los 10 ng/m³.

El hecho de que en las zonas cercanas a las fundiciones se observen mayores concentraciones coincide con la estimación del **inventario de emisiones**. Este inventario, con año base 2020, estima una emisión anual de 473 toneladas de As, de las cuales sobre el 99% provienen de las fundiciones de cobre. Al respecto se destaca que los balances de masa desarrollados por las fundiciones y mandatados por la actual Norma de Emisión (DS28/2013 del MMA), han permitido contar con mejores estimaciones de las emisiones. Las actuales estimaciones incluyen las emisiones fugitivas, las cuales de otra forma no serían posibles de estimar con precisión. La estandarización de este proceso, junto con la supervisión de la SMA de los reportes, permite contar con estimaciones realizadas bajo metodologías comparables. Aun así, se observa que durante los años 2019 y 2020 dos fundiciones reportaron reiteradamente balances mensuales negativos, lo cual ha implicado, por un lado, la acción de la SMA en el marco de las exigencias de la Norma, pero que también han complejizado el análisis realizado en el presente estudio. Por esto se optó por proponer una reestimación de las emisiones de una de las fundiciones a partir de sus reportes técnicos posteriores lo cuales cuentan con una metodología que refleja más fielmente sus operaciones.

Más allá del aporte procedimental del DS28/2013, el cual ha permitido disponibilizar información valiosa para el presente estudio, también ha contribuido significativamente a la reducción de las emisiones de As, así como a la consiguiente mejora en la calidad del aire de las zonas cercanas. De la estimación de emisiones reportadas por las fundiciones se observa que, a la fecha, los límites anuales de emisión se han cumplido en todas las fundiciones durante los años que ha regido el DS28/2013⁸⁷.

Comparando los tres años desde que aplica la norma con tres años posterior al DS 28/2013⁸⁸, se estiman mejoras de As en las concentraciones observadas. Estas van desde reducciones cercanas a 80% en el caso de Chuquicamata y Potrerillos, a 70% para Caletones, a 40% para Ventanas. De estas reducciones, se destaca que parte de ellas corresponde a los procesos de puesta en marcha, destacando que tanto Chuquicamata como Potrerillos al 2020 aún no alcanzaban sus niveles normales de procesamiento. Por esta razón, tanto sus emisiones y, por lo tanto, los niveles de

⁸⁷ Esto sin considerar los problemas de balance de masa que han tenido algunas de las fundiciones, en los que se han reportado balances mensuales negativos y ha implicado acción de la SMA para mejorar sus metodologías de estimación.

⁸⁸ Para Altonorte, Ventanas y Chagres, se compara 2013-2015 con 2018-2020, mientras que para Chuquicamata, Potrerillos, HVL y Caletones, se compara 2015-2017 con 2020-2021.

concentración atmosférica de As en las estaciones cercanas, son menores a los esperados cuando las fuentes emisoras de arsénico operen en un régimen normal. Sin perjuicio de lo anterior, un análisis unitario, como el presentado en la Tabla 8-1, permite observar que las fundiciones con mejoras en la calidad del aire, son las que tuvieron las principales mejoras en término de intensidad de emisión.

Cabe destacar que los resultados de intensidad de emisiones presentados en la Tabla 8-1 permite observar diferencias de entre 4-5 veces entre las fundiciones con mayor intensidad y las con menor intensidad. Esta diferencia se explica, en parte, por la diferencia en el contenido de arsénico en los concentrados procesados, con las fundiciones ubicadas en la zona más norte (DCH, ALN y POT) procesando concentrados con contenidos superiores al 0,5%, mientras el resto de las fundiciones (HVL, VEN, CHG y CAL) procesan concentrados con contenidos promedios de arsénico menores a 0,15%. Otra explicación, de la intensidad de emisiones tiene que ver con las tecnologías instaladas, tanto en el proceso mismo de fundición, como en los sistemas de captura y tratamiento de los gases. Al respecto cabe destacar que todas las fundiciones están alcanzando una eficiencia de fijación y captura superior al 95% exigido en el DS 28/2013.

Tabla 8-1 Intensidad de emisiones [g As/t Cu producido], periodo 2017 a 2020

Año	DCH	ALN	POT	HVL R/RE (1)	VEN	CHG	CAL
2017	1.854	407	7.744	242	252	192	495
2018	442	425	4.255	91	151	229	420
2019	615	383	883	-77/130	149	276	162
2020	840	453	760	165/237	174	174	209
2019-2020	728	418	822	44/182	162	225	185

- (1) Para los años 2019 y 2020 se presentan los valores reportados y recalculados. R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio reportado en periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las fundiciones de HVL y Chagres se observa un aumento de los niveles de concentraciones de As observado entre ambos periodos. En el caso de HVL, el aumento de las concentraciones viene a apoyar el resultado del proceso de reestimación (realizado que apuntaba a que sus emisiones para el año 2020 (re-estimadas en 18,7 ton/año), estaban más cercanas a las reportadas entre 2016-2017 (21 y 21 ton/año) que al periodo pre norma 2011-2015 (entre 7 y 14 ton/año). En el caso de Chagres se destaca que a pesar de observarse una leve mejora en término de emisiones se observa un aumento de los niveles medidos de arsénico. En el caso de Chagres, se observa que la comparación se ve afectada por las concentraciones reportadas el año 2018, donde se observaron valores anormalmente altos en el segundo trimestre del año (hasta esa fecha se reportaban trimestralmente), así como en agosto (en el segundo semestre se reportan mensualmente). Al respecto, no se observan variaciones en las emisiones reportadas, ni en los parámetros meteorológicos que pudieran explicar el aumento en las concentraciones observadas. Se destaca que, sin considerar ese año, se observan que las

concentraciones no han variado sustancialmente respecto al periodo pre-norma, manteniéndose promedios del periodo en el rango $\pm 5\%$ respecto del periodo pre norma en todas las estaciones.

Dado que algunas de las fundiciones no están operando en su régimen normal, fue necesario realizar la proyección de su operación a una situación en régimen para estimar sus emisiones y los consiguientes cambios en la calidad del aire observado. La proyección consideró las actuales proyecciones nacionales de Cochilco (2021). Para proyectar las concentraciones, se realizó una definición de la **relación emisión-concentración**. Esta definición se basó en la modelación de la dispersión de las emisiones de arsénico en las zonas en torno a cada una de las fundiciones. El modelo de dispersión se realizó siguiendo los lineamientos oficiales del SEA, calibrando sus resultados con las emisiones y concentraciones observadas en el año 2020.

Según la comparación entre datos promedio de concentración de arsénico modelados versus observados en las estaciones de referencia para obtención del FEC, se puede determinar que existe una variación de resultados. Esto se condice con las variables de incertidumbre que indicaron que en general, existe sobreestimación (considerando la mayoría de las estaciones representativas), conservando la homogeneidad y baja dispersión. Si bien, variaciones se deben a una multivariada de factores involucrados en cada dominio (topografía, parametrizaciones utilizadas en el WRF, estimación de el régimen de operación de las plantas, estimación de las emisiones fugitivas, asimilación de emisiones fugitivas como difusas en el modelo Calpuff, etc.), la metodología propuesta para la obtención del FEC por fuente incorpora la incertidumbre asociada a los modelos aplicados, meteorológicos y de dispersión atmosférica.

Al realizar un análisis comparativo entre los resultados modelados y los observados de arsénico en las estaciones, en la mayoría de los casos se apreció una buena correlación. No obstante, los resultados del modelo de dispersión atmosférica aplicado presentaron, en líneas generales, una sobreestimación homogénea en los niveles de concentración de arsénico en las estaciones. Por lo tanto, a pesar de que se presenten diferencias entre modelado y observado, los resultados de la modelación son ajustados según las concentraciones observadas para la determinación del factor emisión - concentración FEC que se ajuste a las observaciones. Se destaca que esta metodología resulta válida siempre y cuando se trate de un valor promedio anual y no un análisis episódico (horaria o diaria). Esto último se considera válido al considerar que los riesgos sobre la salud de la población, que la NPCA busca prevenir, están asociados a una exposición crónica y no aguda. De los resultados de este proceso se pudo distinguir entre el impacto en los niveles observados de aquellas fuentes puntuales con estimaciones más precisas dado los reportes técnicos en el marco del DS28/2013, del resto de las emisiones, las cuales son principalmente fugitivas. Esta diferencia permitió posteriormente estimar con mayor precisión el efecto de las diferentes medidas sobre las concentraciones observadas.

Respecto al proceso de modelación de la relación emisión-concentración, se destaca que para estimar el efecto agregado se estimó la concentración basal, entendida como el aporte a la concentración observada que no se relaciona con las emisiones anuales de arsénico. Dada las limitaciones del estudio, se optó por un análisis estadístico de las series de concentraciones para

estimar las concentraciones basales. En base a este análisis se logró estimar una concentración base para cada una de las localidades en el área de influencia de las fundiciones. Este método de determinación del nivel basal tiene sus limitaciones, como que depende de series de tiempo largas y suficientemente pobladas para representar diferentes estados de operación de las fundiciones. Como resultado de esta limitación, algunas de las estimaciones resultantes podrían estar sobreestimadas, sobre todo en aquellas con estaciones con una serie de datos corta, con baja frecuencia de medición, o que utilizan compósitos de periodos largos para determinar las concentraciones reportadas.

En este marco es destacable la necesidad de estandarizar el número de mediciones de Arsénico, observándose que actualmente en las zonas con fundiciones el estándar es de 1 medición cada tres días, lo cual es cercano al estándar recomendado por la UE de 1 medición cada dos días (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004). Lo anterior, no sólo permite mejores análisis estadísticos de los datos de concentración permitiendo mejores estimaciones de las concentraciones basales, sino que también permite disminuir la incertidumbre respecto a la concentración media de cada localidad. Además, se deben estandarizar los métodos analíticos de medición de arsénico en material particulado, los cuales se sugiere que deben consistir en análisis por espectrometría de absorción atómica o espectrometría de masa (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004), así como los límites de detección mínimos.

Dada la relevancia de las concentraciones basales estimadas en la relación emisión-concentración y, por lo tanto, en los resultados de la proyección de los escenarios regulatorios, es recomendable realizar los estudios pertinentes que permitan complementar los resultados estadísticos y robustecer conclusiones del presente estudio.

En lo que se refiere a los **efectos en salud sobre la población humana**, el arsénico es un reconocido tóxico que puede estar en variadas formas químicas, siendo las formas inorgánicas y cuya toxicidad en humanos se debe a la exposición principalmente a formas inorgánicas. Este tóxico afecta a casi todos los procesos celulares y funciones de los órganos del cuerpo. La inhalación normalmente aporta menos del 1% de la dosis total absorbida de arsénico en el ser humano, siendo la ingesta la principal vía de exposición.

Dependiendo del tipo de exposición al arsénico, es decir, de corto (exposición aguda) o largo plazo (exposición crónica), el desarrollo de síntomas clínicos varía. Para observar una intoxicación aguda debe existir exposición a dosis particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios, sino solamente en exposiciones ocupacionales y que pueden producir daños en los órganos que pueden provocar la muerte. Estudios de exposición ocupacional han mostrado una clara correlación entre la exposición al arsénico inorgánico y la mortalidad por cáncer de pulmón (efecto crítico), motivo por el cual múltiples organizaciones los han clasificado como carcinógeno en humanos.

El efecto crítico a la salud por la exposición al arsénico en el aire es el cáncer de pulmón, y su caracterización se realiza mediante la estimación del riesgo incremental de cáncer que

corresponde al incremento en la probabilidad de un individuo de desarrollar cáncer por la exposición a un compuesto cancerígeno. La estimación del riesgo de cáncer de por vida para las sustancias cancerígenas por la vía de inhalación, se lleva a cabo usando las concentraciones en el aire de la sustancia cancerígena y el criterio de toxicidad que en este caso corresponde el Riesgo Unitario Inhalatorio (IUR). De los IUR identificados se releva la aproximación de la US-EPA ($4,3e-6$ por ng/m^3), y la de la OMS que es 2,89 veces menor ($1,5e-6$ por ng/m^3).

Al respecto cabe destacar que los beneficios directos por reducción de la exposición de la población al arsénico son directamente proporcionales al valor de IUR considerado, y luego los resultados considerando el IUR de la OMS da cuenta de beneficios directos 2,89 veces menor que los resultados de considerar el IUR de la US-EPA. Para el análisis exploratorio de los posibles escenarios regulatorios, se consideró el IUR de la US-EPA por ser mayor y luego ser más estricto. Esto quiere decir que, para alcanzar un mismo nivel de riesgo, por ejemplo, $1e-4$ el valor que se deriva de usar el IUR de la US-EPA es más exigente (23,3 ng/m^3 de arsénico) que el valor que se deriva de usar el IUR de la OMS (66,6 ng/m^3 de arsénico).

Para definir las **propuestas de escenarios regulatorios de la NPCA**, es relevante considerar que la NPCA tiene el objetivo de regular aquellos contaminantes que tienen riesgo para la salud. Actualmente la legislación nacional no explícita un nivel de riesgo predefinidamente considerado como *acceptable*. Definir cuál es el nivel de riesgo *acceptable* es una cuestión que requiere amplio debate académico, social y político, el cual no se ha resuelto. En la práctica, en el caso chileno, la regulación de As en agua potable da un primer indicador de lo considerado aceptable, donde los valores normados equivalen a un riesgo cercano a $2e-4$, es decir, una incidencia de 2 en 10mil durante toda la vida. Internacionalmente, el riesgo *acceptable* también varía de forma considerable, generalmente dentro de rangos entre $1e-6$ y $1e-4$, lo cual da paso a un amplio rango de valores asociados a normas sobre las concentraciones de arsénico, cuyos riesgos estimados se mueven dentro de estos rangos. Como un antecedente interesante, la US-EPA en general considera como un límite superior de riesgo *acceptable* $1e-4$ ⁸⁹. Aun así, en EEUU no existe una Norma de Calidad federal para el Arsénico. Sin perjuicio de esto, sí existen valores normados en las regulaciones de algunos estados que oscilan entre 0,2 (riesgo equivalente de $1e-6$) y 23 (riesgo equivalente de $1e-4$), ninguno de los estados con regulación cuenta con fundiciones de cobre.

En la UE sí cuentan con algunas fundiciones de cobre, y presentan un valor objetivo transversal para todos los miembros. Este valor objetivo a diferencia de una NPCA, es exigible sólo en los casos en que los costos para alcanzarlo sean razonables, aunque para las zonas donde no se alcanza el valor objetivo se exige *“demostrar que aplican todas las medidas necesarias que no generen costos desproporcionados, dirigidas en partículas a las fuentes de emisión principales, para alcanzar los valores objetivos”* – Directiva 2004/107/CE (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004 Art.3).

⁸⁹ Más sobre el tratamiento de riesgo de contaminantes tóxicos en el aire por la US-EPA disponible en: <https://www.epa.gov/national-air-toxics-assessment/nata-frequent-questions#risk2> (abril 2022)

Los niveles de riesgos estimados para un año de referencia con operación normal se presenta en la Figura 8-1. Se observa que la situación es variada en las diferentes localidades presentadas, tanto en términos de concentración total proyectada y a la contribución del background. De esta forma se observa localidades, como ChiuChiu, El Salvador o Coya con niveles de concentración de arsénico similares al valor objetivo de la UE. En el caso contrario, Calama, La Negra, Copiapó y Quintero superan en 6 veces el valor objetivo de la UE. Más aún hay localidades donde sólo el background estimado supera los niveles de valor objetivo, por lo que incluso sin el efecto de las fuentes emisoras no se alcanzaría el nivel de calidad atmosférica objetivo de la UE.

En vista de los antecedentes expuestos, se propusieron tres alternativas regulatorias posibles de alcanzar en el contexto nacional que representan diferentes niveles de riesgo: un primer escenario con un riesgo adicional equivalente al riesgo del arsénico en el agua potable, es decir, $2e-4$ (46,6 ng/m³), un escenario intermedio con un riesgo adicional de $1e-4$ (23,3ng/m³) equivalente a límite superior del riesgo *acceptable* según los criterios de la US-EPA, y un tercer escenario más ambicioso, el cual se definió considerando la mayor estimaciones de contribución basal (9 ng/m³) más una contribución de las fuentes equivalente al valor objetivo europeo (6 ng/m³), lo que equivale a una norma de 15,0 ng/m³, lo cual es equivalente a un riesgo adicional equivalente de $0,67e-4$. Las alternativas regulatorias propuestas se presentan de forma gráfica en la Figura 8-2.

Las tres alternativas propuestas coinciden con la mayor parte de las regulaciones internacionales en regular las concentraciones promedio anuales, lo cual sucede pues el impacto más estudiado del arsénico corresponde a su contribución al riesgo de cáncer, lo cual resulta de una exposición crónica. Si bien la legislación nacional no contempla, en las regulaciones internacionales suelen considerar un margen de flexibilidad en aquellos casos donde existen fundiciones de cobre. Como una aproximación de este análisis se presentan en los Anexos (ver Sección 10.10) un análisis de los costos y beneficios para escenarios cuyo valor límites consideran las contribuciones basales en cada una de las localidades.

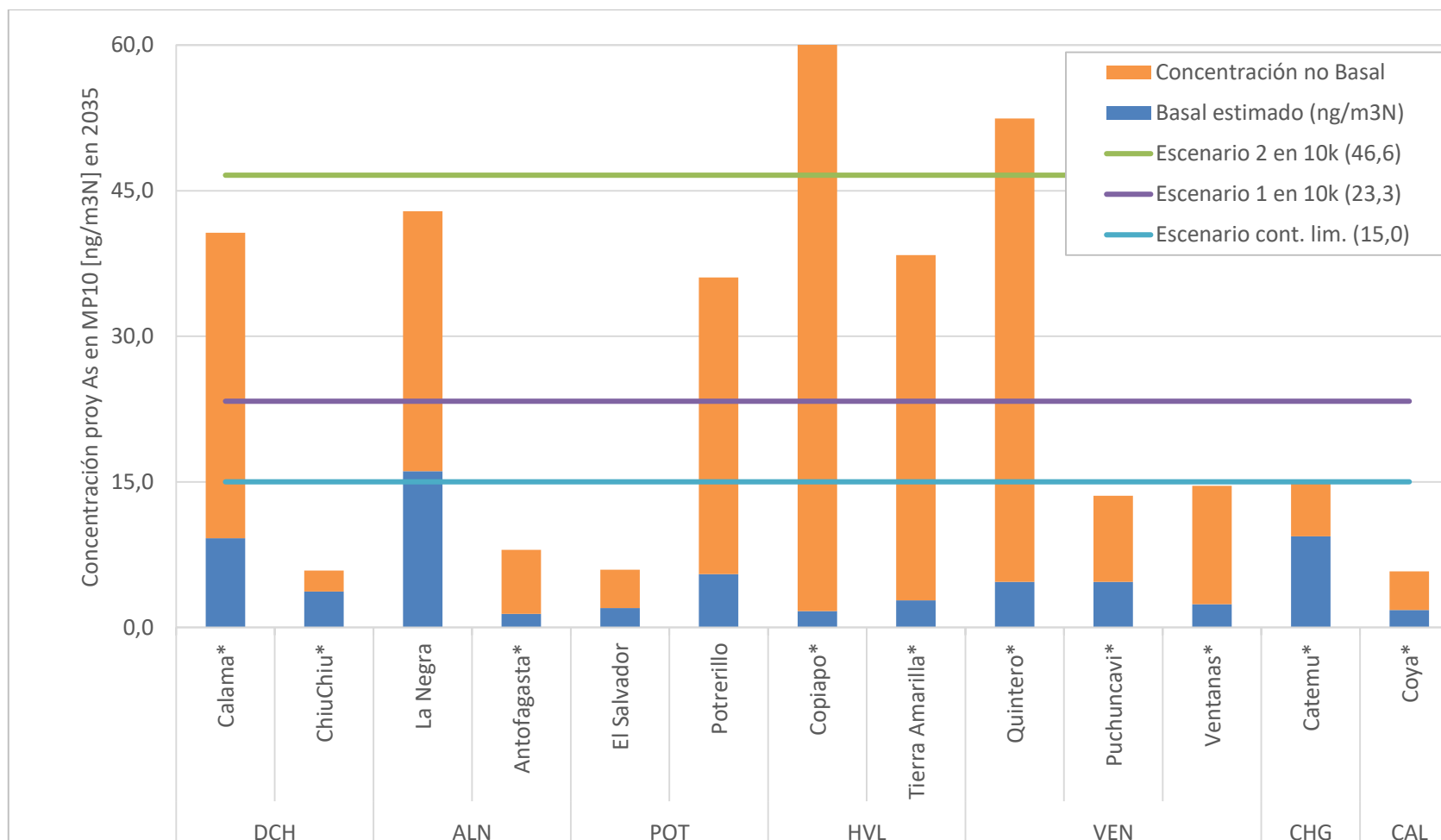
Una normativa con flexibilidad podría ser más eficiente para un mismo nivel, permitiendo que la normativa se enfoque en el aporte humano “gestionable”, y de esta forma permitiendo una mayor protección de la salud de la población en aquellas zonas en que se pueden implementar medidas más ambiciosas. A modo de ejemplo, la comparación entre una norma fija de 23,3 [ng/m³] y una norma variable que considere el basal + 14 [ng/3], entrega el mismo nivel de protección para la zona con el mayor aporte basal, pero permite una mayor protección en zonas con menor aporte basal. Esto puesto que el riesgo adicional *aceptado* es menor en las demás localidades pudiendo llegar a ser hasta un tercio menor (0,67 en 10 mil), a pesar de que la contribución directa de las fuente de emisión de arsénico al riesgo adicional es el mismo. Desde el punto de vista de los resultados de los costos y beneficios estimados, se observa un aumento de los beneficios en estas zonas de un 8%, mientras que los costos aumentarían en un 7%, esto permite alcanzar una relación beneficio-costos mayor.



* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

Figura 8-1 Proyección base de concentración de Arsénico en MP10 [ng/m3N] al 2035

Fuente: Elaboración propia



* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

Figura 8-2 Escenarios regulatorios propuestos

Fuente: Elaboración propia

Los principales indicadores de los resultados de la evaluación socioeconómica de cada una de las alternativas regulatorias propuestas se presentan en la Tabla 8-2. Para la determinación de estos resultados fue necesario identificar un conjunto de medidas aplicables a cada una de las fundiciones que permitieran dar cumplimiento a los niveles definidos en cada una de las alternativas. Estas medidas, sus eficiencias y costos, fueron levantadas tanto de la comparación cruzada entre las tecnologías aplicadas en las fundiciones chilenas para dar cumplimiento a la Norma de Emisión, así como por antecedentes internacionales. Dentro de estos últimos se destacan los antecedentes recogidos y disponibilizados en el proceso vigente de actualización en EEUU de la norma de emisión de para fundiciones de Cobre (US-EPA, 2022), los cuales sistematizan los últimos antecedentes disponibles.

Las medidas evaluadas consideraron 12 tecnologías que podrían instalarse en las fundiciones chilenas, que cubren todos los procesos unitarios salvo los secadores de concentrados, los cuales, en base a los antecedentes disponibles, se estima que tienen una emisión despreciable. Asimismo, incluyó la alternativa de que, en lugar de implementar una medida especialmente costosa, las fundiciones pudieran reducir su nivel de actividad para dar cumplimiento a las exigencias. La selección del conjunto de medidas, las cuales tienen consecuencia en los costos y beneficios de la norma, se realizó mediante un proceso de optimización de los costos totales sujeto al cumplimiento de los niveles de la norma.

De los resultados se observa que mientras los beneficios aumentan de forma lineal con la reducción de casos evitados y, por lo tanto, con la reducción de los niveles de arsénico en el aire, los costos aumentan aceleradamente. Lo anterior implica que en la medida que los escenarios sean más exigentes los costos aumentan más rápido con los beneficios. Lo anterior se refleja en el indicador B/C de la Tabla 8-2, donde se observa que para el escenario más ambicioso es de 0,04, mientras que en el escenario con un riesgo equivalente a $2e-4$ los beneficios superan a los costos en un ratio de 1,06.

Tabla 8-2 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia

Escenario	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Esc 2 en 10k (46,6)	11	100.051	0,2	5,4	105.802	1,06
Esc 1 en 10k (23,3)	196	713.756	0,7	18,9	369.031	0,52
Esc Cont Lim (15,0)	266	11.542.409	0,8	22,6	441.151	0,04

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

Como toda modelación los resultados dependen de los supuestos y metodologías considerada. En ese aspecto es relevante considerar que la mayor parte de la metodología utilizada está en línea con los lineamientos oficiales para la elaboración de este tipo de análisis (MMA, 2013b), siendo adaptada para la evaluación de un contaminante tóxico como el arsénico. Respecto a los supuestos utilizados, estos fueron los que a juicio del consultor resultaban los más confiables. En particular respecto a la identificación de los paquetes de medidas y su estimación de costos, en

la práctica estos pueden desviarse de los estimados en el presente estudio, y su estimación precisa requiere de costosos estudios de ingeniería de detalle que adapten las medidas a la realidad específica de cada operación. En este sentido, el objetivo de la modelación realizada no es predecir el costo exacto, sino que dar cuenta de la magnitud posible de los costos.

Por parte de la estimación de los beneficios, se destaca que la mayor parte de ellos provienen de los co-beneficios asociados a la mejora en la salud de la población por la mejora de los niveles de MP2,5 a consecuencia de la implementación de medidas para regular las emisiones de As. En este aspecto, se destaca como uno de los supuestos más relevantes la relación de As a MP2,5 provenientes de la fundición en los alrededores de la fundición HVL. Si bien, este supuesto fue realizado para cada una de los entornos de las fundiciones, en el resto de los casos se contaron con estudios o datos suficientes para aproximar esta relación, situación que no se logró en esta fundición. Frente a esto, se optó por utilizar el valor medio de los estimados para las demás fundiciones (2,7%) y sensibilizar con los valores extremos estimados (0,8% y 5,4%). De la misma forma, también se consideró como un supuesto relevante el IUR que relaciona el riesgo incremental de cáncer por inhalación de arsénico. Los valores centrales reportados consideran el IUR recomendado por la US-EPA de $4,3e-6$ (por ng/m^3), pero fueron sensibilizados con el IUR recomendado por la OMS que es 2,89 veces menor, es decir, $1,5e-6$ (por ng/m^3).

Los resultados de esta sensibilización se presenta en la Tabla 8-3, donde se observa que el efecto de la proporción As a MP2,5 en HVL tiene un efecto más relevante que la variación del IUR considerado, observándose que incluso podría cambiar el indicador de B/C, pasando por la unidad implicando que los beneficios podrían ser mayores que los costos según la variación de este parámetro.

Tabla 8-3 Sensibilidad de B/C frente a IUR y escenario As : MP2,5 en HVL

Escenario As : MP2,5 en HVL	Esc 2 en 10k (46,6)		Esc 1 en 10k (23,3)		Esc. Cont. Lim. (15,0)	
	OMS	US-EPA	OMS	US-EPA	OMS	US-EPA
5,4%	0,61	0,62	0,35	0,36	0,03	0,03
2,7%	1,05	1,06	0,51	0,52	0,04	0,04
0,8%	3,13	3,15	1,25	1,26	0,09	0,09

Fuente: Elaboración propia

Por último, cabe destacar el efecto que tienen la representatividad poblacional de las estaciones consideradas. Los casos particulares de La Negra y Potrerillos, las cuales no cuentan con representatividad, implican que a pesar de que las concentraciones proyectadas superan los niveles en algunos escenarios, no sea necesario implementar medidas para su reducción. Al respecto, se realizó la sensibilización a la modelación considerando el caso en que estas estaciones si fueran consideradas como representativas. Los resultados de esto, es que en los dos escenarios más ambiciosos evaluados (23,3 y 15 ng/m^3) sería necesario la implementación de medidas de mitigación, e incluso de la reducción de los niveles de producción para alcanzar dichos niveles. Lo anterior conjugado con una población, en comparación con otras zonas, más pequeña, resulta en indicadores B/C por debajo de los observados en las otras fundiciones. Este indicador se encuentra en el orden de los 0,01 para estas fundiciones en el escenario de 23,3

[ng/m³] y de 0,005 en el escenario de 15,0 [ng/m³]. De esta forma, las conclusiones del estudio pueden variar de considerar estas estaciones en los escenarios normativos futuros.

9. Referencias

- AngloAmerican. (2021). Antecedentes para proceso de revisión Decreto Supremo 28 de 2013 que establece Norma de Emisión para fundaciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- ARSENIC PENTOXIDE HSDB® - Hazardous Substances Data Bank. (1992).
- ATSDR. (2007). TOXICOLOGICAL PROFILE FOR ARSENIC U.S., 139(6), 2557–2565.
<https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/6/2557>
- ATSDR. (2016). Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Addendum to the toxicological profile for arsenic. Division of Toxicology and Human Health Sciences. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, (February).
- CARB. (1990). *Technical support document: proposed identification of inorganic arsenic as a toxic air contaminant. Part B – health assessment*, [236p., May].
- Cochilco. (2021). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2021-2032*.
- CODELCO. (2021). Antecedentes generales para el proceso de revisión de la norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico contenida en el DS28 de 2013 del MMA.
- COPRIM. (2012). *Evaluación de costos de escenarios regulatorios para una norma de emisión de fundiciones de cobre*.
- Costa, M. (2019). Review of arsenic toxicity, speciation and polyadenylation of canonical histones. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 375(May), 1–4.
<https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.05.006>
- DEM-RI. (2008). Rhode Island Air Toxics Guideline. Retrieved from Rhode Island Air Toxics Guideline [REVISED]
- DIPRES. (2021). Acta de Resultados del Comité Consultivo del Precio de Referencia del Cobre 2021.
- EGLE. (2004). Table 1 . Michigan Department of Environment , Great Lakes , and Energy - Air Quality Division List of Screening Levels (ITSL , IRSL & SRSL) in Alphabetical Order. Retrieved from https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-aqd-toxics-ITSLALPH_244167_7.pdf
- EMEP/EEA. (2019). 2.C.7.a Copper production. In *Air pollutant emission inventory guidebook 2019* (pp. 1–22).
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A. G., Odman, M. T., Yarwood, G., & Kumar, N. (2017). Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(5), 582–598.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- Entec UK Limited. (2001). Economic evaluation of air quality targets for heavy metals. Report for the European commission. Final report. For the European Commission, (January), 196p. Retrieved from https://ec.europa.eu/environment/enveco/air/pdf/report_heavy_metals.pdf
- Erraguntla, N. K., Sielken, R. L., Valdez-Flores, C., & Grant, R. L. (2012). An updated inhalation unit risk factor for arsenic and inorganic arsenic compounds based on a combined analysis of epidemiology studies. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 64(2), 329–341.
<https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2012.07.001>

- European Commission. (2000). *Ambient Air Pollution by AS, CD and NI compounds*.
- Fang, X., Bi, X., Xu, H., Wu, J., Zhang, Y., & Feng, Y. (2017). Source apportionment of ambient PM10 and PM2.5 in Haikou, China. *Atmospheric Research*, 190, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2017.01.021>
- Gao, S., Cong, Z., Yu, H., Sun, Y., Mao, J., Zhang, H., ... Bai, Z. (2019). Estimation of background concentration of PM in Beijing using a statistical integrated approach. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 858–867. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.12.014>
- Gidhagen H. Kahelinb, P. Schmidt-Thome, C. Johansson, L. (2002). Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM10 in Central and Northern Chile. *Atmospheric Environment*, 36, 3803–3817.
- Giostra, U., Furlani, F., Arduini, J., Cava, D., Manning, A. J., O’Doherty, S. J., ... Maione, M. (2011). The determination of a “regional” atmospheric background mixing ratio for anthropogenic greenhouse gases: A comparison of two independent methods. *Atmospheric Environment*, 45(39), 7396–7405. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2011.06.076>
- Glad, J. A., Brink, L. L., Talbott, E. O., Lee, P. C., Xu, X., Saul, M., & Rager, J. (2012). The relationship of ambient ozone and PM2.5 levels and asthma emergency department visits: Possible influence of gender and ethnicity. *Archives of Environmental and Occupational Health*, 67(2), 103–108. <https://doi.org/10.1080/19338244.2011.598888>
- Gobierno de Bolivia. (1995). Bolivia: Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica, 8 de diciembre de 1995. Retrieved from <https://www.lexivox.org/norms/BO-RE-DS24176C.xhtml>
- Gómez-Losada, Á., Pires, J. C. M., & Pino-Mejías, R. (2015). Time series clustering for estimating particulate matter contributions and its use in quantifying impacts from deserts. *Atmospheric Environment*, 117, 271–281. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.027>
- Government of Alberta. (2005). Alberta Canada, Ambient Air Quality Objectives and Guidelines Summary. Retrieved from <http://www.paza.ca/wp-content/uploads/2011/11/ESRD-AAAQO-Feb-2013.pdf>
- Government of Israel. (2011). Reglamento de Aire Limpio (Valores de Calidad del Aire) (Orden Temporal), 2011. Retrieved from https://www.nevo.co.il/law_html/law00/77858.htm
- Government of Luisiana. (2004). Title 33 ENVIRONMENTAL QUALITY Part III. Air. Retrieved from <https://deq.louisiana.gov/assets/docs/Air/Enforcement/Title33.pdf>
- Government of Manitoba. (2005). Manitoba’s Ambient Air Quality Criteria (AAQCs). Retrieved from https://www.gov.mb.ca/sd/envprograms/airquality/pdf/criteria_table_update_july_2005.pdf
- Government of New Hampshire. (2004). CHAPTER Env-A 1400 REGULATED TOXIC AIR POLLUTANTS. Retrieved from https://www.des.nh.gov/sites/g/files/ehbemt341/files/documents/env-a_1400-adptpstd.pdf
- Government of North Carolina. (2018). SECTION .1100 - CONTROL OF TOXIC AIR POLLUTANTS 15A NCAC 02D. 1101 PURPOSE This Section sets forth the rules for the control of toxic air pollutants to protect human health. Retrieved from <https://files.nc.gov/ncdeq/Air Quality/rules/rules/15a-ncac-02d-Section-1100-Updated-Nov-2020.pdf>

- Government of Quebec. (1979). Clean Air Regulation (RAA). Environment Quality Act (última actualización: abril 2021). Retrieved from <http://legisquebec.gouv.qc.ca/en/showdoc/cr/q-2, r. 4.1>
- Government of Vermont. (2018). Air Pollution Control Regulations. Retrieved from https://dec.vermont.gov/sites/dec/files/aqc/laws-regs/documents/AQCD_Regulations_ADOPTED_Dec132018.pdf
- Government of Washington. (2004). Chapter 173-460 WAC CONTROLS FOR NEW SOURCES OF TOXIC AIR POLLUTANTS. Retrieved from <https://app.leg.wa.gov/wac/default.aspx?cite=173-460&full=true&pdf=true>
- GreenLab-Dictuc. (2019). *Evaluación medidas costo efectivas para diseñar un instrumento de gestión ambiental en la zona interior de la región de Valparaíso.*
- GreenLab. (2018). Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica.
- GreenLab. (2020). *Actualización de tasas de incidencia base de mortalidad y morbilidad para contaminación atmosférica y creación de un modelo automático para la actualización.* Retrieved from <http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8484a611-8fa9-4695-acea-c847e7b828c0&fname=200221-ATICA2-InformeFinal.pdf&access=public>
- HazardText. (2021a). Arsenic - clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: (2021). In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]. In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. (pp. 1–75). Thomson Reuters Inc.
- HazardText. (2021b). Arsenic pentoxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values. In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. Thomson Reuters Inc.
- HazardText. (2021c). ARSENIC TRICHLORIDE. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. Thomson Reuters Inc.
- HazardText. (2021d). Arsenic trioxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: (2021). In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]. In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. Thomson Reuters Inc.
- HazardText. (2021e). Arsine. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values. In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. Thomson Reuters Inc.
- Helsen, L. (2005). Sampling technologies and air pollution control devices for gaseous and particulate arsenic: A review. *Environmental Pollution*, 137(2), 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.025>
- INE. (2019a). *Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019.* Retrieved from https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/Cd_Pb_Al_Cs_2019.pdf
- INE. (2019b). Estimaciones y Proyecciones de la Población de Chile 2002-2035 a Nivel Comunal. Documento Metodológico.
- Iragüen P., & Ortúzar J. de D. (2004). Willingness-to-pay for reducing fatal accident risk in urban areas: an internet-based web page stated preference survey. *Accident Analysis and Prevention*, 36, 513–524.

- Kloog, I., Coull, B. A., Zanobetti, A., Koutrakis, P., & Schwartz, J. D. (2012). Acute and chronic effects of particles on hospital admissions in New-England. *PLoS ONE*, 7(4), 2–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034664>
- Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R. T., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., ... Tempalski, B. (2009). Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. *Health Effects Institute*, (140). Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19627030>
- Lagos, G., Peters, D., Videla, A., Jara, J. J. (2018). The effect of mine aging on the evolution of environmental footprint indicators in the Chilean copper mining industry 2001-2015. *Journal of Cleaner Production* 174 (2018) 389-400.
- Lagos, G., Peters, D., Salas, J. C., Parra, R., & Pérez, V. (2021). Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países. *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL)*.
- Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D., & Schwartz, J. (2012). Chronic exposure to fine particles and mortality: An extended follow-up of the Harvard six cities study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, 120(7), 965–970. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104660>
- Lewis, A. S., Beyer, L. A., & Zu, K. (2015). Considerations in deriving quantitative cancer criteria for inorganic arsenic exposure via inhalation. *Environment International*, 74, 258–273. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.009>
- Lewis, A. S., Reid, K. R., Pollock, M. C., & Campleman, S. L. (2012). Speciated arsenic in air: Measurement methodology and risk assessment considerations. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 62(1), 2–17. <https://doi.org/10.1080/10473289.2011.608620>
- Liu, B., Li, T., Yang, J., Wu, J., Wang, J., Gao, J., ... Yang, H. (2017). Source apportionment and a novel approach of estimating regional contributions to ambient PM_{2.5} in Haikou, China. *Environmental Pollution*, 223, 334–345. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.01.030>
- Mar, T. F., Koenig, J. Q., & Primomo, J. (2010). Associations between asthma emergency visits and particulate matter sources, including diesel emissions from stationary generators in Tacoma, Washington. *Inhalation Toxicology*, 22(6), 445–448. <https://doi.org/10.3109/08958370903575774>
- Martín-Cruz, Y., Vera-Castellano, A., & Gómez-Losada, Á. (2020). Characterization of background particulate matter concentrations using the combination of two clustering techniques in zones with heterogeneous emission sources. *Atmospheric Environment*, 243(August). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117832>
- Massachusetts, G. of. (2011). MassDEP Ambient Air Toxics Guidelines. Retrieved from <https://www.mass.gov/service-details/massdep-ambient-air-toxics-guidelines>
- Maud, J., & Rumsby, P. (2008). *A review of the toxicity of arsenic in air*, Science Report - SC10104/SR4.
- MECP-Ontario. (2020). Ontario's Ambient Air Quality Criteria. Retrieved from <https://www.ontario.ca/page/ontarios-ambient-air-quality-criteria>
- MEP. (2012). Estándares de calidad del aire ambiente. Anuncio 7. Retrieved from http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/quality_standard1/201605/W020160511506615956495.pdf

- Micromedex. (2021a). Arsenic. Toxicology details. In *Micromedex* (Columbia B, pp. 1–75). Columbia Basin College Library.
- Micromedex. (2021b). Arsenic pentoxide. Toxicology details. In *Micromedex* (pp. 1–45). Columbia Basin College Library ed.
- Micromedex. (2021c). Arsenic trioxide. Toxicology details. In *Micromedex* (pp. 1–57). Columbia Basin College Library.
- Micromedex. (2021d). Arsine. Toxicology details. In *Micromedex* (pp. 1–31). Columbia Basin College Library.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2017). *Estimación del Valor de la Vida Estadística en Chile a través del Enfoque de Disposición a Pagar*.
- Ministerio de Salud. (2008). Decreto 61. *Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile*, (2008), 121–127.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1998). Decreto 165 - Establece Norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire. *Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile*, 165(1998), 3. Retrieved from <https://www.leychile.cl/N?i=1015230&f=2015-12-02&p=>
- Ministry for the Environment, & Government of New Zealand. (2002). Ambient Air Quality Guidelines. Retrieved from <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/ambient-guide-may02.pdf>
- MINSAL. (2018). *Plan Nacional de Cáncer 2018-2028*. Retrieved from https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2019/01/2019.01.23_PLAN-NACIONAL-DE-CANCER_web.pdf
- MINSEGPRES. Decreto 165 - Establece Norma de Emisión para la Regulación del Contaminante Arsenico Emitido al Aire (1998). Retrieved from <https://www.leychile.cl/N?i=1015230&f=2015-12-02&p=>
- MMA. (2013a). Decreto 28- Establece Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico.
- MMA. (2013b). *Guía Metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire*.
- MMA. (2018). Análisis General del Impacto Económico y Social del Anteproyecto del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.
- MMA. (2019). Análisis General del Impacto Económico y Social del Anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Ciudad de Calama y su Área Circundante.
- MOEF & CC, & Government of India. (2019). National Clean Air Programme. Retrieved from <https://pib.gov.in/PressReleseDetail.aspx?PRID=1559384>
- Mohammed Abdul, K. S., Jayasinghe, S. S., Chandana, E. P. S., Jayasumana, C., & De Silva, P. M. C. S. (2015). Arsenic and human health effects: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 40(3), 828–846. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.09.016>
- Moolgavkar, S. H. (2000). Air pollution and hospital admissions for diseases of the circulatory system in three U.S. Metropolitan areas. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50(7), 1199–1206. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464162>
- Nordberg, G. (2021). Metals : Chemical Properties and Toxicity References. Retrieved from <https://www.iloencyclopaedia.org/part-ix-21851/metals-chemical-properties-and-toxicity>

- OEHHA. (2014). Appendix D. Individual Acute, 8-Hour, and Chronic Reference Exposure Level Summaries. *TSD for Noncancer RELs, 2008*(December), 128–169.
- Ostro, B. D. (1987). Air pollution and morbidity revisited: A specification test. *Journal of Environmental Economics and Management*, 14(1), 87–98.
- Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea. (2004). Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente. *Diario Oficial de La Unión Europea*. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0107&from=en>
- Particulotech. (2021). *Modelo de receptor - Fundación Chagres*.
- PubChem. (2021). Hazardous Substances Data Bank (HSDB). *National Library of Medicine*.
- Servicios Mineros SpA. (2019). INFORME DE EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD AUDITORIA A LAS METODOLOGÍAS DE BALANCE DE ARSÉNICO Y AZUFRE.
- Sheppard, L. (2003). Ambient Air Pollution and Nonelderly Asthma Hospital Admissions in Seattle, Washington, 1987-1994. In: Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health. *Health Effects Institute: Boston*, 227–230.
- SISTAM. (2021). Estudio de Calidad del Aire, Sector La Negra, Comuna de Antofagasta.
- Slaughter, J. C., Kim, E., Sheppard, L., Sullivan, J. H., Larson, T. V., & Claiborn, C. (2005). Association between particulate matter and emergency room visits, hospital admissions and mortality in Spokane, Washington. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15(2), 153–159. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500382>
- SMA. (2015). RE 694- Protocolo para validación de metodologías para balance de masa de arsénico y azufre en fuentes emisoras de acuerdo al DS 28/2013 MMA.
- TCEQ. (2011). *Arsenic and inorganic arsenic compounds. TEXAS COMMISSION ON ENVIRONMENTAL QUALITY. Report on carcinogens : carcinogen profiles / U.S. Dept. of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Program* (Vol. 12).
- Tchepel, O., Costa, A. M., Martins, H., Ferreira, J., Monteiro, A., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2010). Determination of background concentrations for air quality models using spectral analysis and filtering of monitoring data. *Atmospheric Environment*, 44(1), 106–114. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2009.08.038>
- US-EPA. (n.d.). Attachment 6 : Useful Terms and Definitions for Explaining Risk, 4, 1–14.
- US-EPA. (1988). Arsenic, inorganic; CASRN 7440-38-2. *Integrated Risk Information System (IRIS) U.S. Chemical Assessment Summary National Center for Environmental Assessment*, 27.
- US-EPA. (1994). Arsine ; CASRN 7784-42-1. *Integrated Risk Information System (IRIS) Chemical Assessment Summary U.S.*, 1–16.
- US-EPA. (1995). Primary Copper Smelting. *AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors Volume I: Stationary Point and Area Sources*. Retrieved from <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch12/final/c12s03.pdf>
- US-EPA. (2004). Air toxics and risk assessment.
- US-EPA. (2011). *Integrated Risk Information System - Arsenic, inorganic (CASRN 7440-38-2), (1968)*.
- US-EPA. (2022). National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Primary Copper Smelting Residual Risk and Technology Review and Primary Copper Smelting Area Source

- Technology Review (Proposed rule). Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0001>
- US-EPA, & French, C. (2020). *Evaluation of Beyond-the-floor and Ample Margin of Safety Control Options and Costs for Process Fugitive Emissions from Smelting Furnaces and Converters, and for Point Source Emissions from Anode Refining Furnaces and for the Combined Emissions S*. Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0060>
- US-EPA, & Jones, D. L. (2019). *Ample Margin of Safety Analysis for Point Sources in the II&S Industry*. Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0052>
- Wang, S. H., Hung, R. Y., Lin, N. H., Gómez-Losada, Á., Pires, J. C. M., Shimada, K., ... Takami, A. (2020). Estimation of background PM_{2.5} concentrations for an air-polluted environment. *Atmospheric Research*, 231, 104636. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2019.104636>
- Wang, Y., Zhang, J., Bai, Z., Yang, W., Zhang, H., Mao, J., ... Chen, L. (2019). Background concentrations of PMs in Xinjiang, West China: An estimation based on meteorological filter method and Eckhardt algorithm. *Atmospheric Research*, 215, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.008>
- World Health Organisation. (2000). Air Quality Guidelines for Europe, 2014(9th November). Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0016/123064/AQG2ndEd_5_10PCBs.PDF
- Wottitz, C. A., & Moreno, G. A. (2011). Fijación química del preservante CCA-C en la madera de *Pinus elliottii* Parte 1: Influencia de la temperatura y de la humedad relativa. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 13(1), 85–103. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2011000100008>
- Yáñez-Morróni, G., Gironás, J., Caneo, M., Delgado, R., & Garreaud, R. (2018). Using the Weather Research and Forecasting (WRF) model for precipitation forecasting in an Andean region with complex topography. *Atmosphere*, 9(8).
- Zanobetti, A., Franklin, M., Koutrakis, P., & Schwartz, J. (2009). Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 8, 58. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-8-58>

10. Anexos

10.1 Anexo 1: Identificación de valores anómalos

10.2 Anexo 2: Metodología para estimación de rango de emisiones de HVL

Figura 10-1 Observaciones con candidatos a ser excluidos para Estación J.J. Latorre, Termoeléctrica Andina

Figura 10-2 Emisión reportada mensualmente [g As/TMF Cu]

10.3 Anexo 3: Rosas de viento estaciones

10.3.1 Rosas de Viento Fundición Chuquicamata

10.3.2 Rosas de Viento Fundición Altonorte

10.3.3 Rosas de Viento Fundición Potrerillos

10.3.4 Rosas de Viento Fundición Hernán Videla Lira

10.3.5 Rosas de Viento Fundición Ventanas

10.3.6 Rosas de Viento Fundición Chagres

10.3.7 Rosas de Viento Fundición Caletones

10.4 Anexo 4: Comparación de concentración basal de arsénico

10.5 Anexo 5: Corroboración de equivalencia entre factores de corrección

10.6 Anexo 6: Puntos de interés en modelación de calidad del aire

10.7 Anexo 7: Inventario de emisiones modelado

10.8 Anexo 8: Análisis datos modelados versus observados

10.9 Anexo 9: Evaluación de metodología de modelación de emisiones

10.10 Anexo 10: ACB para escenario regulatorio

10.11 Anexo 11: Análisis comparativo de concentraciones de arsénico en rocas