

Comité Operativo

Revisión de Norma de Emisión para fundiciones y fuentes emisoras de arsénico

Presentación Comité Operativo | SESIÓN N°6/2022
jueves 6 de octubre, 2022

Ivonne Moreno
División de Calidad del Aire
Ministerio del Medio Ambiente



Objetivos de la reunión

Conocer los resultados del Estudio “Antecedentes para la elaboración de una norma para Arsénico y la Revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico”, referente a la revisión de la normativa internacional, mejor tecnología disponible para control de emisiones y los escenarios regulatorios propuestos.

Además, de acuerdo a lo requerido por el Ministerio de Minería en la sesión anterior, se solicitó al expositor que presente el cruce de los escenarios de esta revisión de la norma de emisión y de la Norma primaria de calidad del aire para arsénico, que se está elaborando de manera paralela.

Tabla

- Presentación: Resultados del estudio y análisis comparativo
Expositor: Sr. Luis Cifuentes, Director GreenLab, Dictuc S.A.



Próximas Reuniones

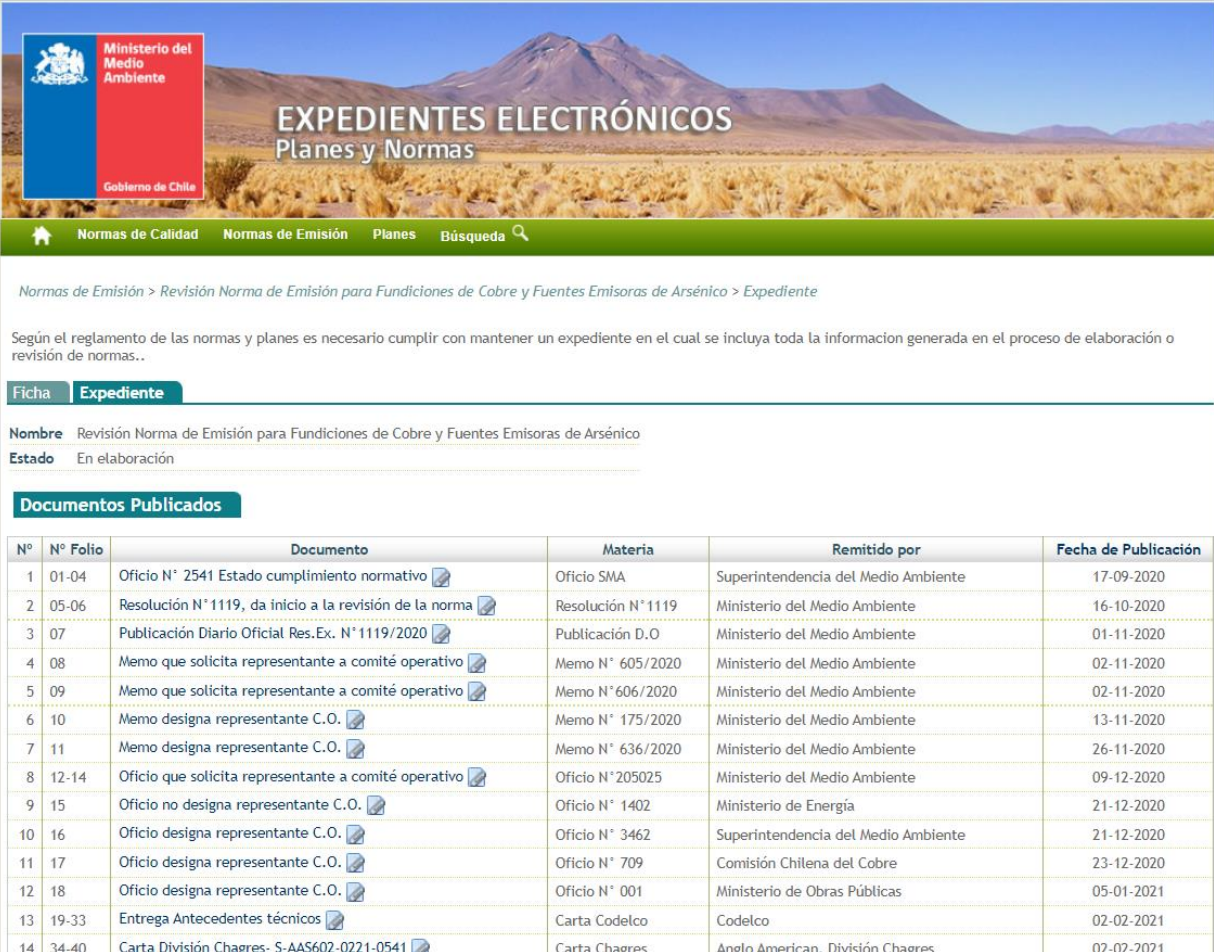
Actividad	Temas a tratar	Fecha
1° Sesión C.O.A	Obj: Presentación de los comités operativos ampliados de la elaboración de una norma para Arsénico y de la Revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico.	Última semana de octubre
7° reunión C.O.	Obj: Criterios de la revisión y metodología para abordar la revisión para fuentes existentes y nuevas	1ra semana de noviembre



Expediente electrónico

000703 vta

https://planesynormas.mma.gob.cl/normas/expediente/index.php?tipo=busqueda&id_expediente=937836



Ministerio del Medio Ambiente
Gobierno de Chile

EXPEDIENTES ELECTRÓNICOS

Planes y Normas

Normas de Calidad Normas de Emisión Planes Búsqueda

Normas de Emisión > Revisión Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico > Expediente

Según el reglamento de las normas y planes es necesario cumplir con mantener un expediente en el cual se incluya toda la información generada en el proceso de elaboración o revisión de normas..

Ficha **Expediente**

Nombre Revisión Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico
Estado En elaboración

Documentos Publicados

N°	N° Folio	Documento	Materia	Remitido por	Fecha de Publicación
1	01-04	Oficio N° 2541 Estado cumplimiento normativo	Oficio SMA	Superintendencia del Medio Ambiente	17-09-2020
2	05-06	Resolución N° 1119, da inicio a la revisión de la norma	Resolución N° 1119	Ministerio del Medio Ambiente	16-10-2020
3	07	Publicación Diario Oficial Res.Ex. N° 1119/2020	Publicación D.O	Ministerio del Medio Ambiente	01-11-2020
4	08	Memo que solicita representante a comité operativo	Memo N° 605/2020	Ministerio del Medio Ambiente	02-11-2020
5	09	Memo que solicita representante a comité operativo	Memo N° 606/2020	Ministerio del Medio Ambiente	02-11-2020
6	10	Memo designa representante C.O.	Memo N° 175/2020	Ministerio del Medio Ambiente	13-11-2020
7	11	Memo designa representante C.O.	Memo N° 636/2020	Ministerio del Medio Ambiente	26-11-2020
8	12-14	Oficio que solicita representante a comité operativo	Oficio N° 205025	Ministerio del Medio Ambiente	09-12-2020
9	15	Oficio no designa representante C.O.	Oficio N° 1402	Ministerio de Energía	21-12-2020
10	16	Oficio designa representante C.O.	Oficio N° 3462	Superintendencia del Medio Ambiente	21-12-2020
11	17	Oficio designa representante C.O.	Oficio N° 709	Comisión Chilena del Cobre	23-12-2020
12	18	Oficio designa representante C.O.	Oficio N° 001	Ministerio de Obras Públicas	05-01-2021
13	19-33	Entrega Antecedentes técnicos	Carta Codelco	Codelco	02-02-2021
14	34-40	Carta División Chagres- S-AAS602-0221-0541	Carta Chagres	Anglo American, División Chagres	02-02-2021

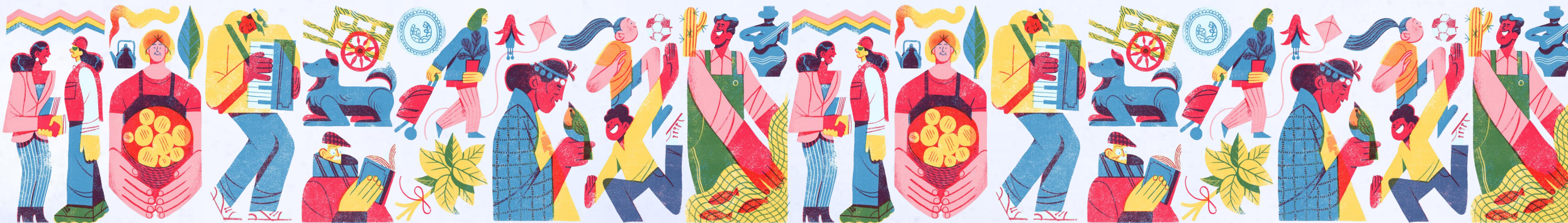


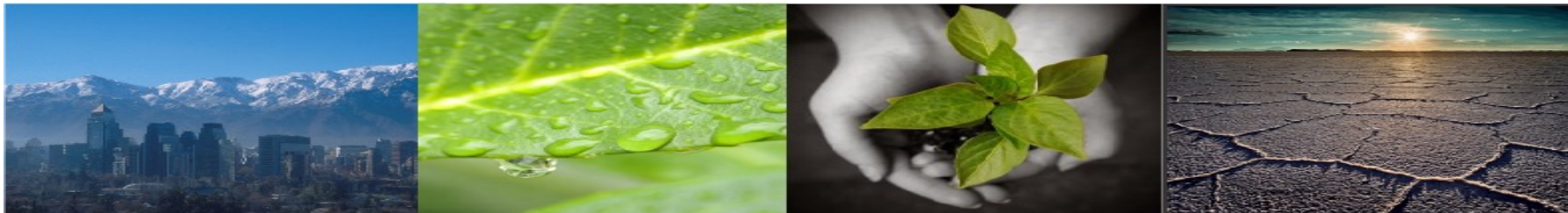
¿Preguntas?



Ministerio del
Medio
Ambiente

Gobierno de Chile





ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA LA ELABORACIÓN DE UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE PARA ARSÉNICO Y LA REVISIÓN DE LA NORMA DE EMISIÓN PARA FUNDICIONES DE COBRE Y FUENTES EMISORAS DE ARSÉNICO

NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE (NPCA) Y NORMA DE EMISIÓN DE AS

Estudio solicitado por la Subsecretaría del Medio Ambiente

**PRESENTACIÓN AL COMITÉ OPERATIVO DEL DS28/2013
6 OCTUBRE 2022**

Objetivos

□ 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.

□ Específicos:

- a) **Obtener antecedentes para la Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico.**
- b) **Revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico.**

Relacion con el proceso de revisión de la norma emisión de MP y As (DS28/2013)

- Las dos normas están íntimamente ligadas, porque el As se emite a través del material particulado (es un componente del MP).
- Las medidas de reducción de emisiones de As son realmente medidas de reducción de As, ya que no se puede separar el As del MP.
- Por lo tanto, reducciones de As conllevan necesariamente reducciones de MP.
- Luego, la emisión límite de MP de una fundición específica será el menor valor de lo que requiera cada norma → una de las dos normas será redundante en cada fundición (no necesariamente la misma en todas).
- La concentración de As en el concentrado que procesa la fundición es clave en determinar cual es la norma “activa”

NIVELES BASALES DE CONCENTRACION DE ARSENICO EN EL AIRE

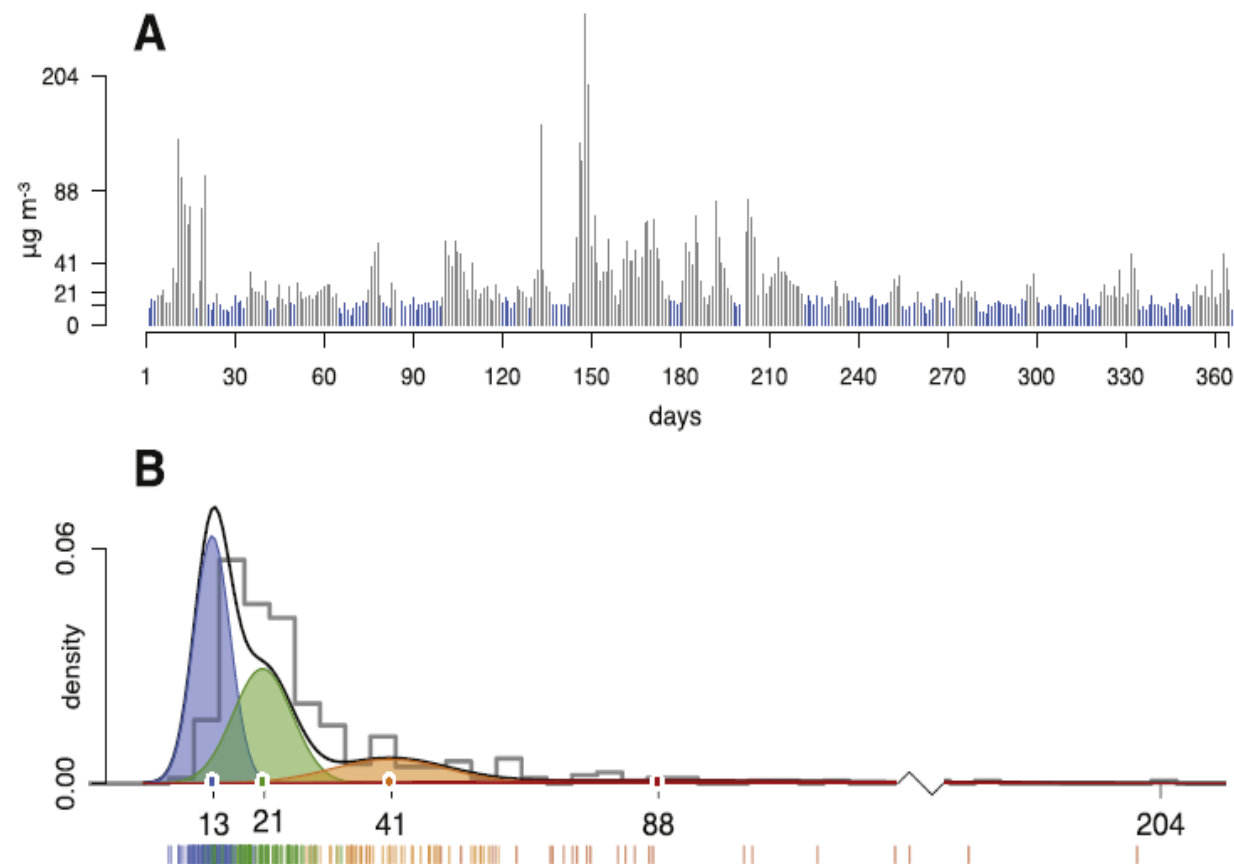
La investigación al servicio de una política pública sustentable



Estimación del aporte basal – Cadenas markovianas ocultas

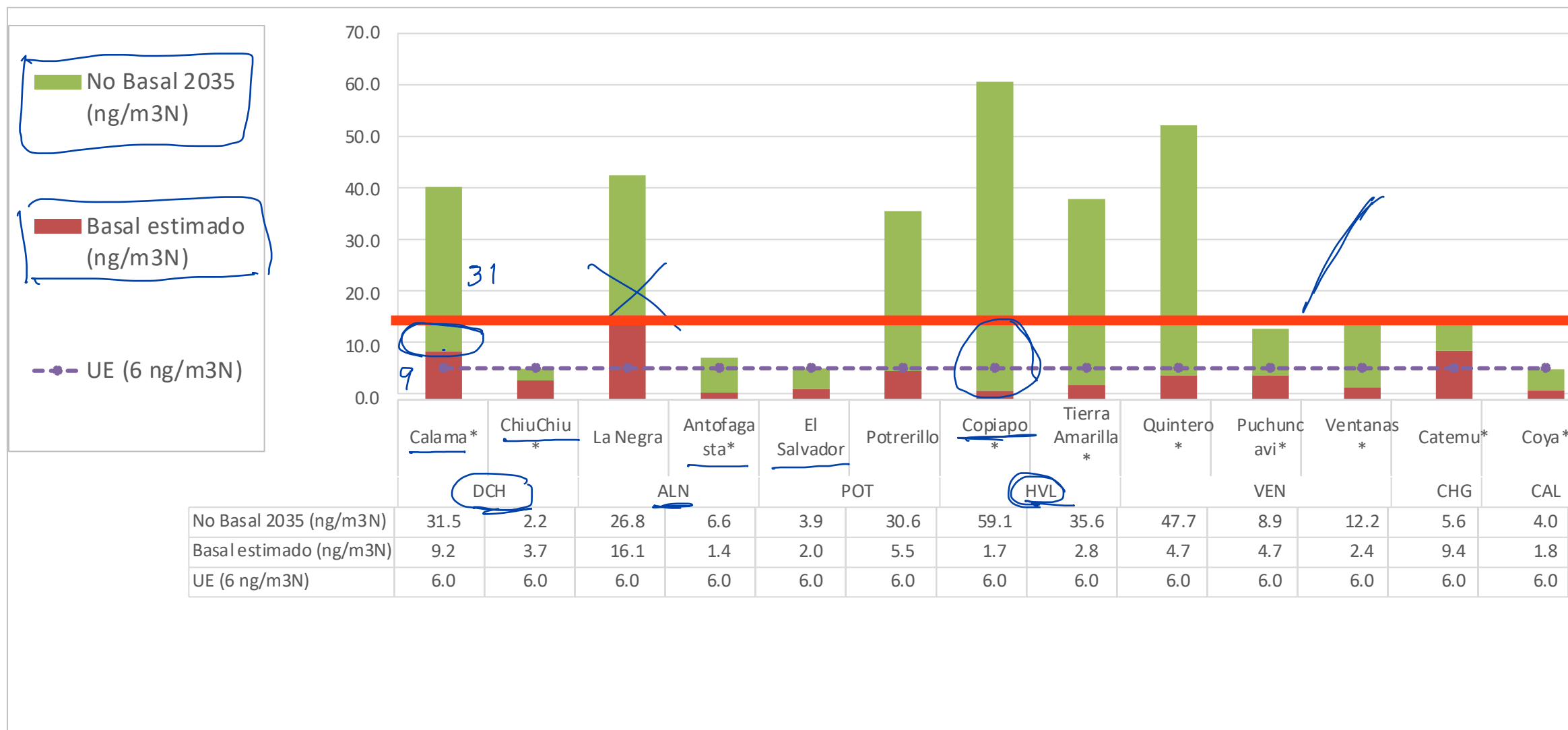
- Para la estimación se realiza un análisis estadístico, basado en cadenas markovianas ocultas (HMM)
- Las HMM realizan una agrupación de las observaciones a lo largo del tiempo en regímenes de distintas concentraciones (*clusters*)
- Los resultados se comparan con las mediciones observadas en periodos donde la fundición no estuvo funcionando

Ejemplo de cadena markoviana oculta para estimar concentración basal



Fuente: (Martín-Cruz et al., 2020)

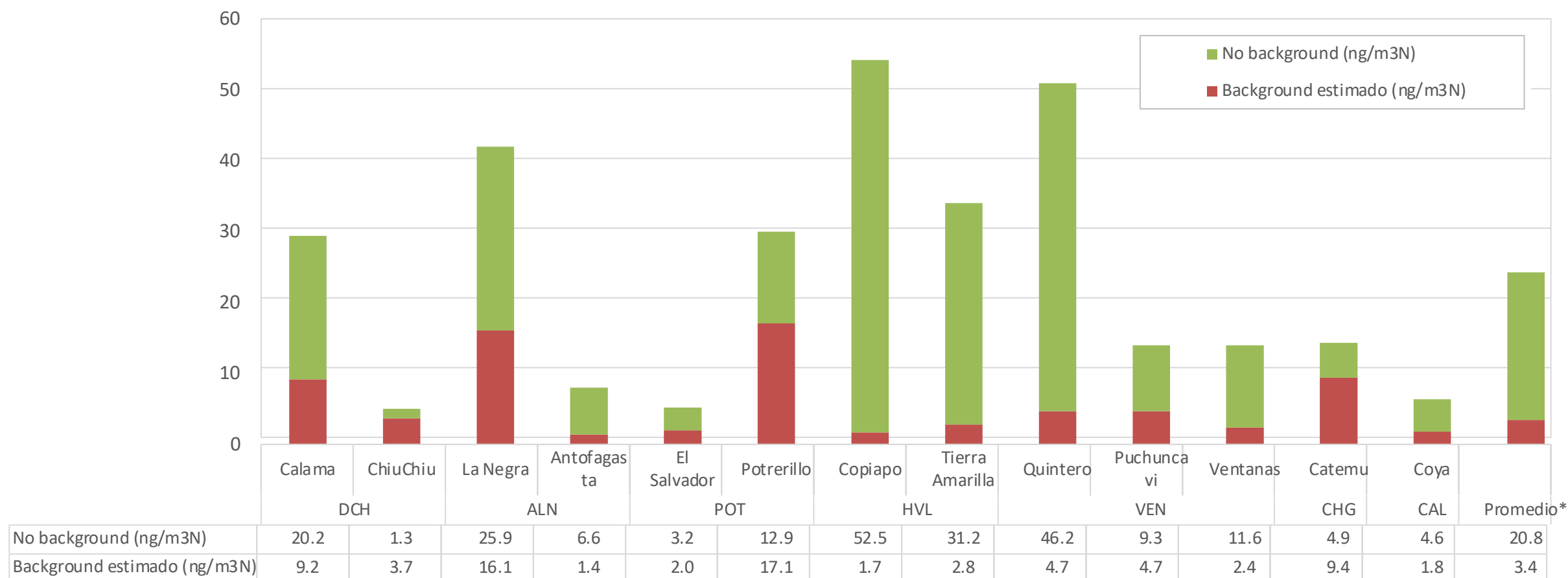
Proyección base 2035: Concentración As [ng/m³N] medido en MP10



* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10.

Promedio: Promedio ponderado por población de cada localidad. La proyección puede variar con los resultados finales del modelo de dispersión (aunque no tanto).

Situación 2020: Concentración As [ng/m³N] medido en MP10



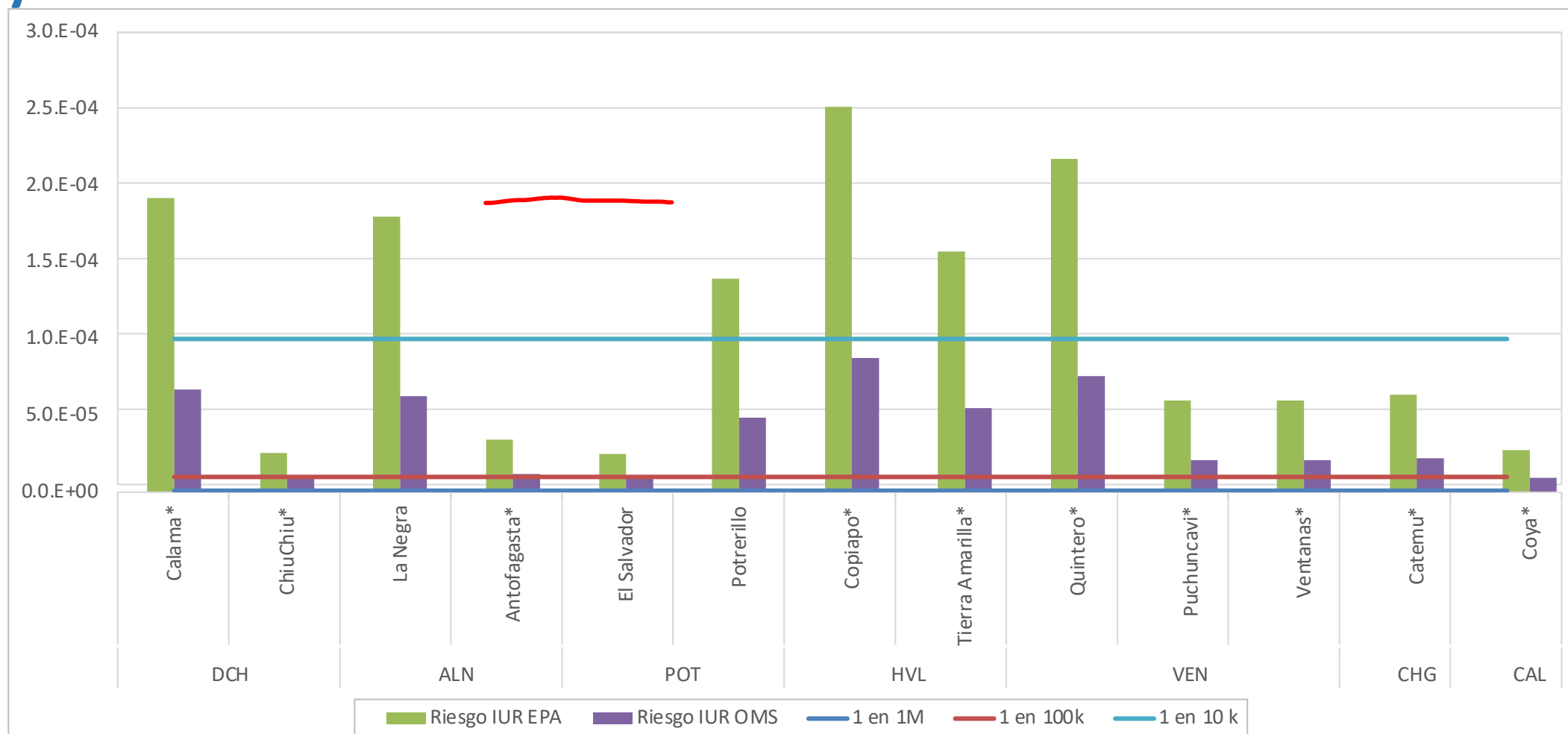
□ *Promedio: Promedio ponderado por población de cada localidad

□ Diferencias importantes en los niveles observados de arsénico y en la estimación del background.

□ En promedio el background es el 14% de la concentración observada, pero puede llegar a ser 74% (ChiuChiu) o 66% (Catemu)

Riesgo incremental de cáncer

Proyección base 2035



*Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10.

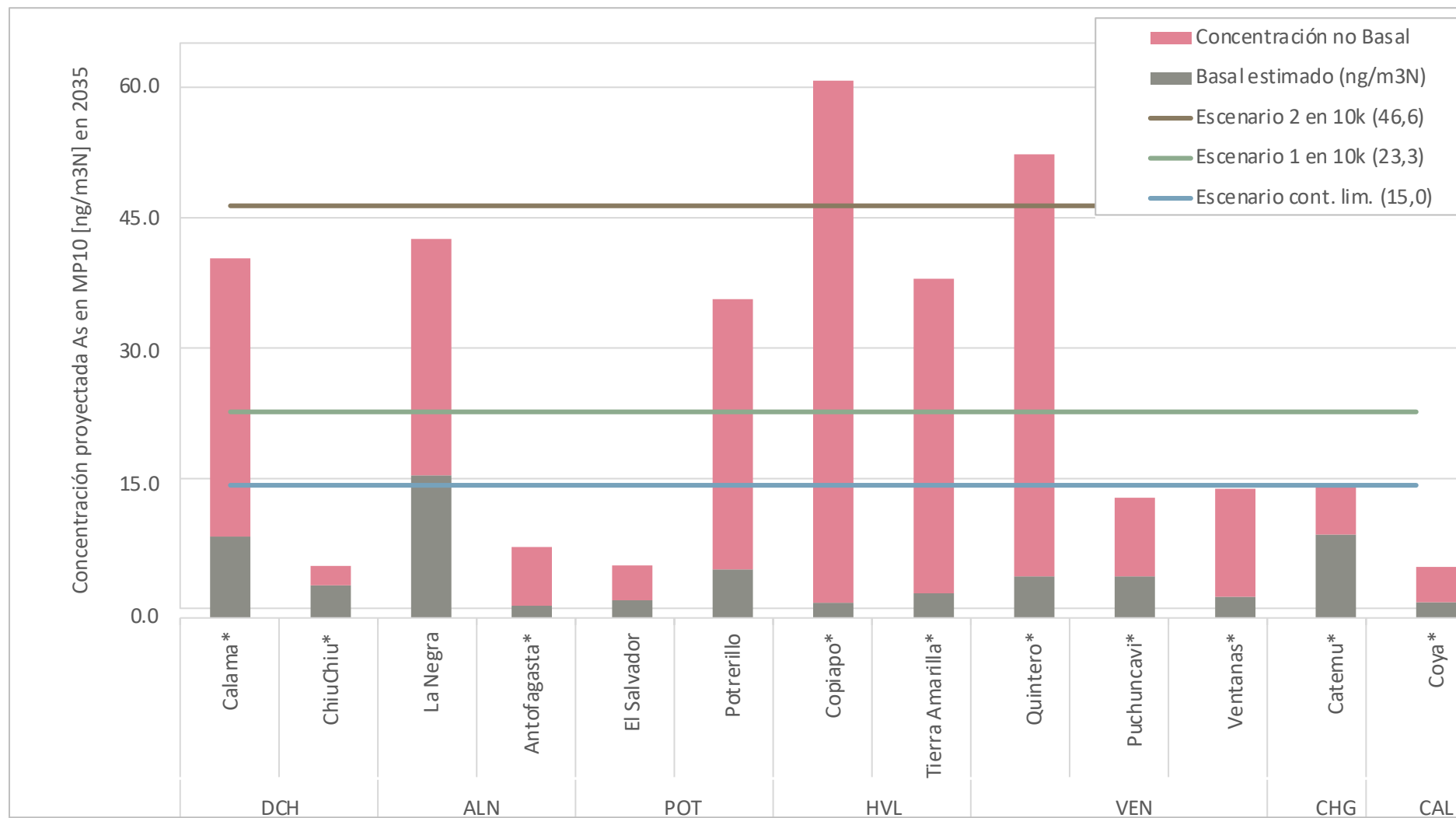
- Promedio considerando la concentración media proyectada ponderada por población.
- En el escenario base los riesgos se encuentran entre:
 - IUR EPA: 2,5 en 100k hasta 2,5 en 10k
 - IUR OMS: 1 en 100k hasta 1 en 10k

Escenarios normativos propuestos

Se proponen 3 escenarios normativos:

- **Escenario 2 en 10k:** Escenario con un riesgo equivalente al riesgo aceptado en la norma de arsénico en el agua potable (2 en 10.000). Equivale a concentración media anual de 46,6 ng/m³ considerando IUR más conservador (US-EPA).
- **Escenario 1 en 10k:** Escenario que considera como riesgo aceptable 1 en 10.000 (1e-4). Equivale a 23,3 ng/m³N, considerando IUR más conservador (US-EPA).
- **Escenario contribución limitada:** Escenario de mayor ambición donde la contribución de las fundiciones a la concentración ambiental es limitada. Equivale a 15 ng/m³N → Riesgo incremental aceptable equivalente a 6,7 en 100.000, es decir, 0,67 casos en 10k durante toda la vida.

Escenarios normativos propuestos



* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10.

- Escenario 2 en 10k: Incumple HVL y Ventanas.
- Escenario 1 en 10k: Incumple Chuquicamata, Altonorte, HVL, Ventanas.
- Escenario contribución limitada: Incumple Chuquicamata, Altonorte, HVL, Ventanas.

Nota: No se considera Potrerillo por no tener representatividad poblacional para MP10, y por no contar con una población censada.

NORMA DE EMISION

La investigación al servicio de una política pública sustentable



Resumen de regulaciones para fundiciones de cobre y fuentes similares

Legislatura	Normas	Contaminantes	Tipo normativa	Otras fuentes incluidas
Chile	NE (2013)	SO ₂ ; As; MP; Hg	Límites anuales Límites emisiones puntuales	Secadores Fuente con tratamiento térmico de cobre y oro, con contenido de As > 0,005% en su alimentación.
EEUU	Performance (1976) Arsenico (1986) NESHAP (2002,2007) Propuesta NESHAP (2022)	SO ₂ ; MP	BAT Límites emisiones puntuales Límites emisiones fugitivas	Tostadores (1976) Secadores (2002, 2007)
Alemania	TA LUFT (2002, 2020)	SO _x ; MP; As (y derivados); sust. inorgánicas	BAT Límites emisiones puntuales	Tostadores y secadores
China	NE industria Cu, Ni y Co (2010)	SO ₂ ; MP; As; Pb; Hg; Cl	Límites emisiones puntuales	Secadores
Japón	Acciones regulatorias para sitios industriales (1998) Reglamento Ley de Control de CA (2017)	SO _x ; MP; Cd; Pb; Hg	BAT Límites emisiones puntuales (consideran la zona y antigüedad)	Tostadores y secadores
Zambia	NE (1997)	SO ₂ ; MP	Valores objetivos límites emisiones puntuales	-

Medidas de control aplicadas desde la entrada de la NE

Principales medidas de control aplicadas por fundición

Fundición	Medida de control aplicada
Chuquicamata	<p>Fusión: HF potenciado</p> <p>Conversión: Incorporación CPS N°5, reemplazo campanas primarias y secundarias</p> <p>Refinación: Planta de tratamiento de Humos</p> <p>Tratamiento de gases: Aumento capacidad de tratamiento, sistemas de tratamiento de gases del Secador N°6, HF y Hornos de Refino, PAS N°3 y N°4 a doble contacto</p>
Altonorte	<p>Preparación de concentrados: Modernización sistema de secado (Secado indirecto)</p> <p>Refinación: Reforming a gas natural</p> <p>Tratamiento de gases: Filtro de Mangas, renovación del catalizador de la PAS N°3</p>
Potrerosillos	<p>Refinación: Sistema de tratamiento de humos negros</p> <p>Tratamiento de gases: Mejoramiento integración captación procesamiento gases, PAS de simple a doble contacto.</p>
HVL	<p>Conversión: Alimentación carga fría a CPS</p> <p>Refinación: Sistema de tratamiento de Humos Negros RAF</p> <p>Tratamiento de gases: Planta de Tratamiento de Gases de Cola</p>
Ventanas	<p>Preparación de concentrados: Aumento captación MP Secador</p> <p>Fusión: Captación gases secundarios CT y sangrías</p> <p>Conversión: Sistema mecanizado carga fría CPS, captación gases secundarios CPS</p> <p>Limpieza de escoria: Aumento captación MP y gases secundarios HLE/HE y sangrías</p> <p>Refinación: Planta de tratamiento de humos visibles RAF</p> <p>Tratamiento de gases: Tratamiento de gases de cola, reemplazo intercambiador de calor y Torre k5, tratamiento de gases secundarios</p>
Chagres	<p>Preparación de concentrados: Modernización sistema de secado</p> <p>Refinación: planta de tratamiento de gases de horno de refino</p> <p>Tratamiento de gases: Mejora Tratamiento de gases HR y HLE</p>
Caletones	<p>Preparación de concentrados: Optimización PSFLUO</p> <p>Limpieza de escorias: Planta Limpieza de Escorias</p> <p>Refinación: Reducción opacidad humos Hornos Anódicos</p> <p>Tratamiento de gases: Sistema de reducción de emisiones plantas de ácido</p>

ESCENARIOS DE ACTUALIZACIÓN DE LA NORMA EXISTENTE

La investigación al servicio de una política pública sustentable



Tres Escenarios para la actualización de la norma existente

Alternativa 1:

Conservar la contribución de las fuentes puntuales a la calidad del aire actual, la cual, en términos generales, es bastante menor que los límites permitidos. Esto incluye también agregar un límite de emisión de Hg para las fuentes existentes. Además, se propone un límite de emisiones de MP para chimenea de campana secundaria (*secondary hood system*) de los convertidores de las fundiciones que tengan dichos dispositivos, en EEUU esto es vigente desde más de 40 años (US-EPA, 1986).

Alternativa 2:

Adecuar los límites de los procesos unitarios que se encuentran normados actualmente, a los niveles de la propuesta de US-EPA (2022). Se propone variar el control de las emisiones totales de As mediante dos límites diferenciados entre anuales y trianuales. Además, se propone regular el MP contenido en los hornos de refino en lugar de la opacidad (cambio comprendido en la propuesta de actualización de la norma en EEUU).

Alternativa 3:

Agregar límites de emisiones fugitivas según lo propuesto por la US-EPA (2022). Esta norma regula las emisiones de MP para controlar las emisiones de otros metales tóxicos. Se incluye la obligación de instalar sistemas de captura secundarios en los convertidores, en conjunto con un límite de MP para las emisiones de escape generados a nivel de sistema en coherencia con la norma de la US-EPA (2007). También se propone prohibir los convertidores por lotes (tipo batch), vigente en EEUU para todas las fundiciones construidas después de 1998 (US-EPA, 2002).

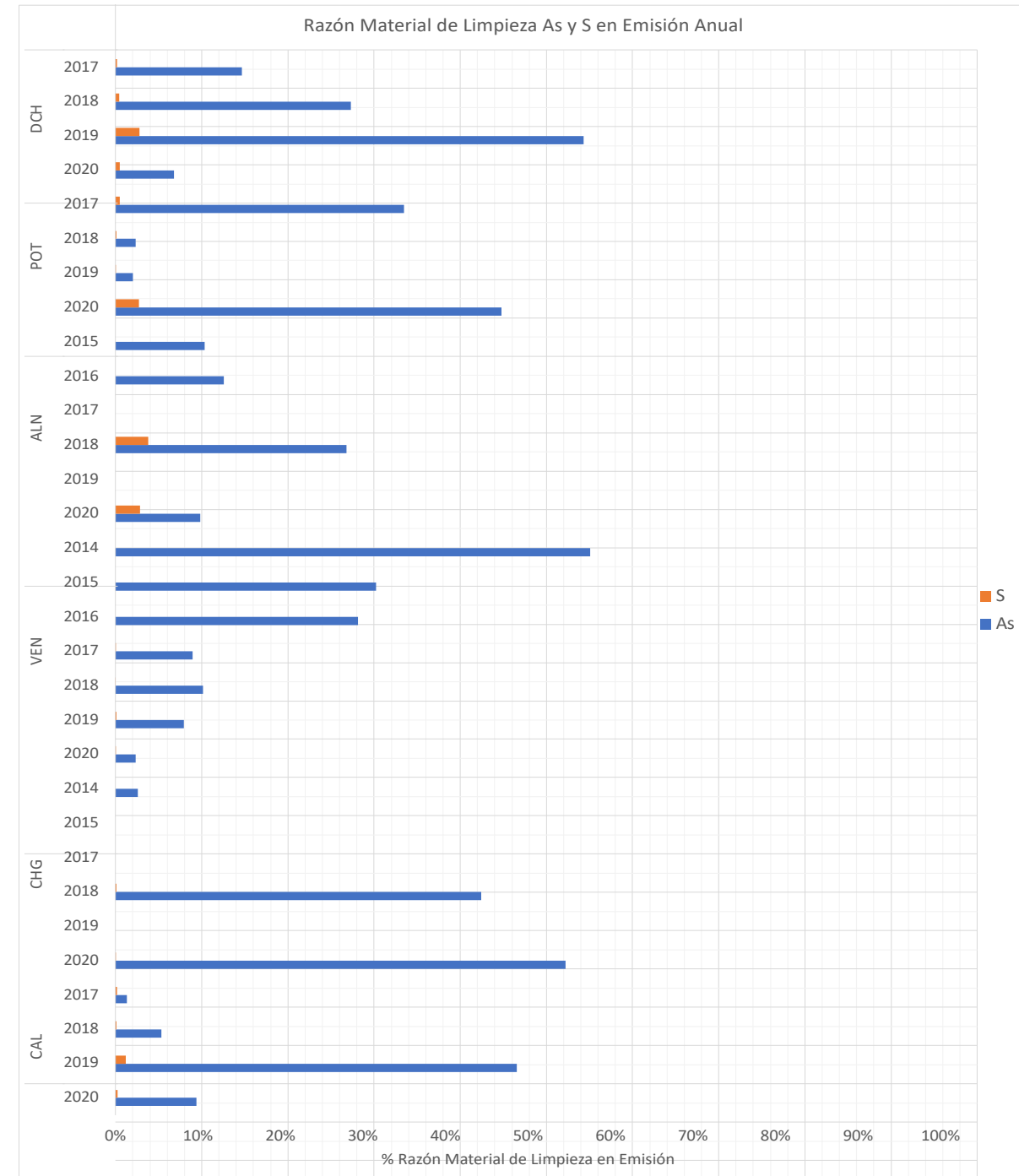
Escenarios de actualización de la norma existente

Punto de medición	Contaminante	Fuente	Actual	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Método	Frecuencia de verificación
Sistema de la fundición	As	Fundiciones existentes	Balance anual	Balance anual	Emisión Anual Balance Trianual	Emisión Anual Balance Trianual	CH-29	Anual
	SO ₂	Fundiciones existentes	Balance anual	Balance anual	Balance anual	Balance anual	CEMS	Anual
Secadores	MP	Fundiciones existentes	50 mg/Nm3	50 mg/Nm3	50 mg/Nm3	30 mg/Nm3	CH-5	Mensual
		Fuentes nuevas	30 mg/Nm3	30 mg/Nm3	30 mg/Nm3	30 mg/Nm3	CH-5	Mensual
Planta de ácidos	SO ₂	Fundiciones existentes	600 ppm	600 ppm	600 ppm (1)	600 ppm (1)	CEMS	Mensual
		Otras fuentes industriales existentes	400 ppm	400 ppm	400 ppm (1)	400 ppm (1)	CEMS	Mensual
		Fuentes nuevas	200 ppm	200 ppm	200 ppm (1)	200 ppm (1)	CEMS	Mensual
		Fundiciones existentes	1 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	CH-29	Mensual
	As	Otras fuentes industriales existentes	1 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	CH-29	Mensual
		Fuentes nuevas	1 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	0,8 mg/Nm3	CH-29	Mensual
	Hg	Fundiciones existentes	n.a.	0,1 mg/Nm3	0,05 mg/Nm3	0,05 mg/Nm3	CH-29	Mensual
		Otras fuentes industriales existentes	n.a.	0,1 mg/Nm3	0,1 mg/Nm3	0,1 mg/Nm3	CH-29	Mensual
Hornos de limpieza de escoria	As	Fuentes nuevas	0,1 mg/Nm3	0,1 mg/Nm3	0,05 mg/Nm3	0,05 mg/Nm3	CH-29	Mensual
		Fundiciones existentes	1 mg/Nm3	1 mg/Nm3 (2)	1 mg/Nm3 (2)	1 mg/Nm3 (2)	CH-29	Mensual
	MP	Fuentes nuevas	1 mg/Nm3	1 mg/Nm3 (2)	1 mg/Nm3 (2)	1 mg/Nm3 (2)	CH-29	Mensual
		Fundiciones existentes	50 mg/Nm3	50 mg/Nm3 (3)	50 mg/Nm3 (3)	50 mg/Nm3 (3)	CH-5	Mensual
Hornos de refinó	MP	Fuentes nuevas	30 mg/Nm3	30 mg/Nm3 (4)	30 mg/Nm3 (4)	30 mg/Nm3 (4)	CH-5	Mensual
		Todas	20%Ringelman	20%Ringelman	n.a.	n.a.		Mensual
Techo Reactor	MP	Todas	n.a.	n.a.	5,8 mg/Nm3	5,8 mg/Nm3	CH-5	Mensual
Techo CPS	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	1,95 kg/hr	CH-5	Anual
Techo Hornos de refinó	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	0,77 kg/hr	CH-5	Anual
Reactor de fusión	MP10	Fuentes nuevas	n.a.	n.a.	n.a.	0,73 kg/hr	CH-5	Anual
Chimenea de campana secundaria de Convertidores	MP	Fundiciones existentes	n.a.	11,6 mg/Nm3	11,6 mg/Nm3 (6)	11,6 mg/Nm3 (6)	CEMS	Anual
		Fuentes nuevas	n.a.	11,6 mg/Nm3	11,6 mg/Nm3 (6)	11,6 mg/Nm3 (6)	CH-5	Mensual
Sistema de la fundición/fuente	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	300 g/ton (7)	CEMS	Diario

Límite anual de Arsénico

Material de limpieza

- Límite actual de As considera el descuento de As contenido en material de limpieza.
- Los cronogramas de mantención y limpieza varían entre fundiciones.
 - Entre 2017 y 2020, Caletones y Chuquicamata reportaron As en material de limpieza en 10 meses.
 - Los que menos reportaron fueron CHG (3), ALN (2) y HVL (0)
- En algunos casos mantenciones mayores se llevan entre 18 y 30 meses
 - El resultado del balance anual no coincide con emisiones reales
- En promedio un 20% del Arsénico “emitido” es reportado en el material de limpieza
 - Para algunas fundiciones y años, esto puede superar el 50%

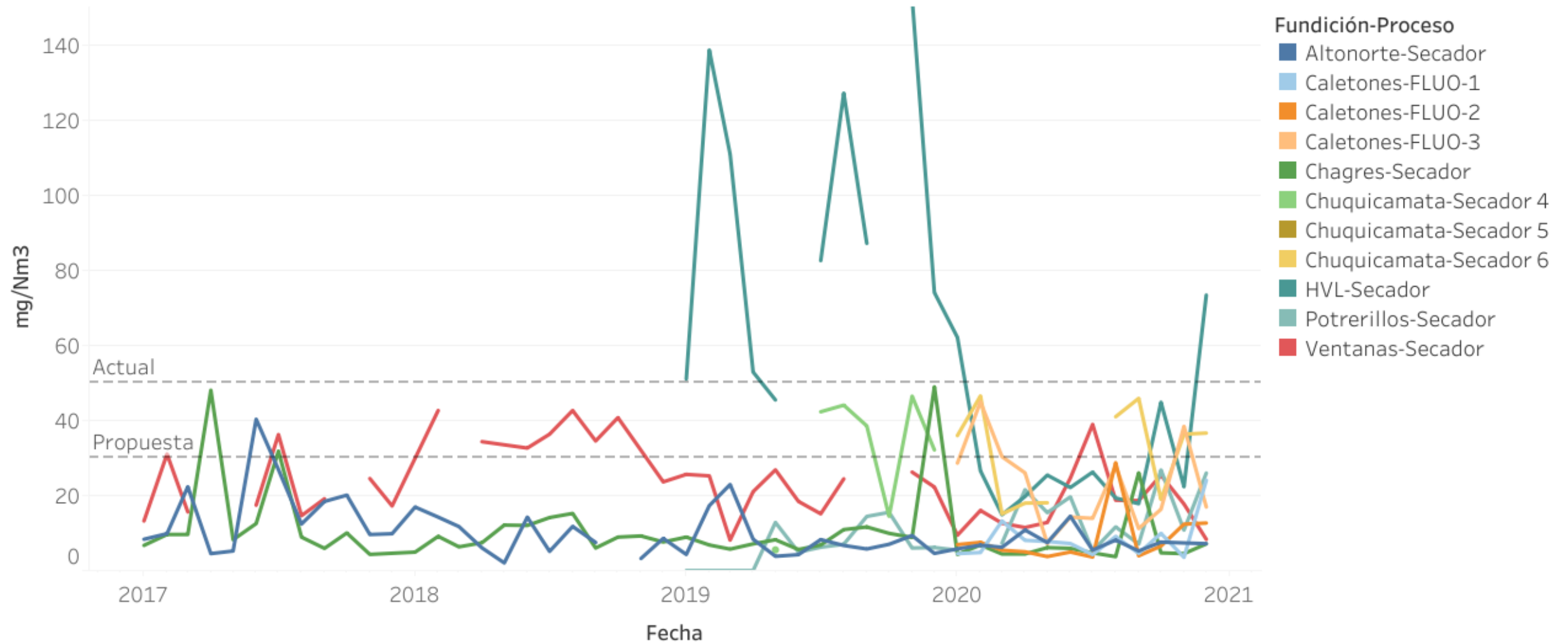


Propuesta de límite emisión anual y balance tri-anual

- Considerar periodos más largos reduce la diferencia entre el resultado del balance y las emisiones reales.
- Para evitar que esta diferencia puede camuflar emisiones reales más altas, se propone distinguir dos límites
 - Un límite de emisión anual equivalente a la suma de los resultados mensuales (sin considerar material de limpieza)
 - Un límite del balance trianual, que considere el descuento por material de limpieza

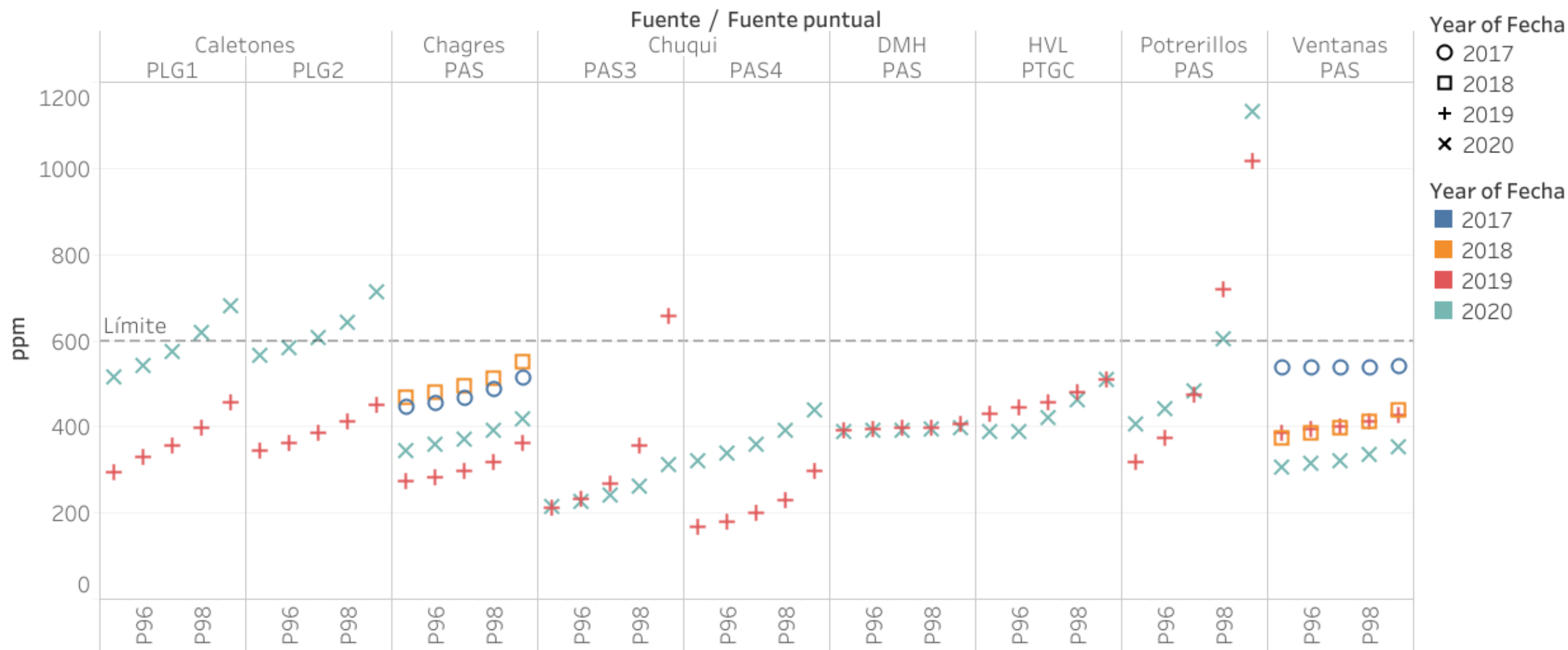
Fuente emisora	Balance SO2 [t/año]	Emisión As anual [t/año]	Balance As trianual [t/3 años]	Balance promedio [t/año]	Limite balance actual [t/año]
Altonorte	24.000	139	340	113	123
Caletones	47.680	143	351	117	130
Chagres	14.400	39	95	32	35
Chuquicamata	49.700	524	1.285	428	476
Hernán Videla Lira	12.880	19	45	15	17
Potrerillos	24.400	172	424	141	157
Ventanas	14.650	53	130	43	48

Límite MP secadores



□ Límite propuesto sólo para Alternativa 3

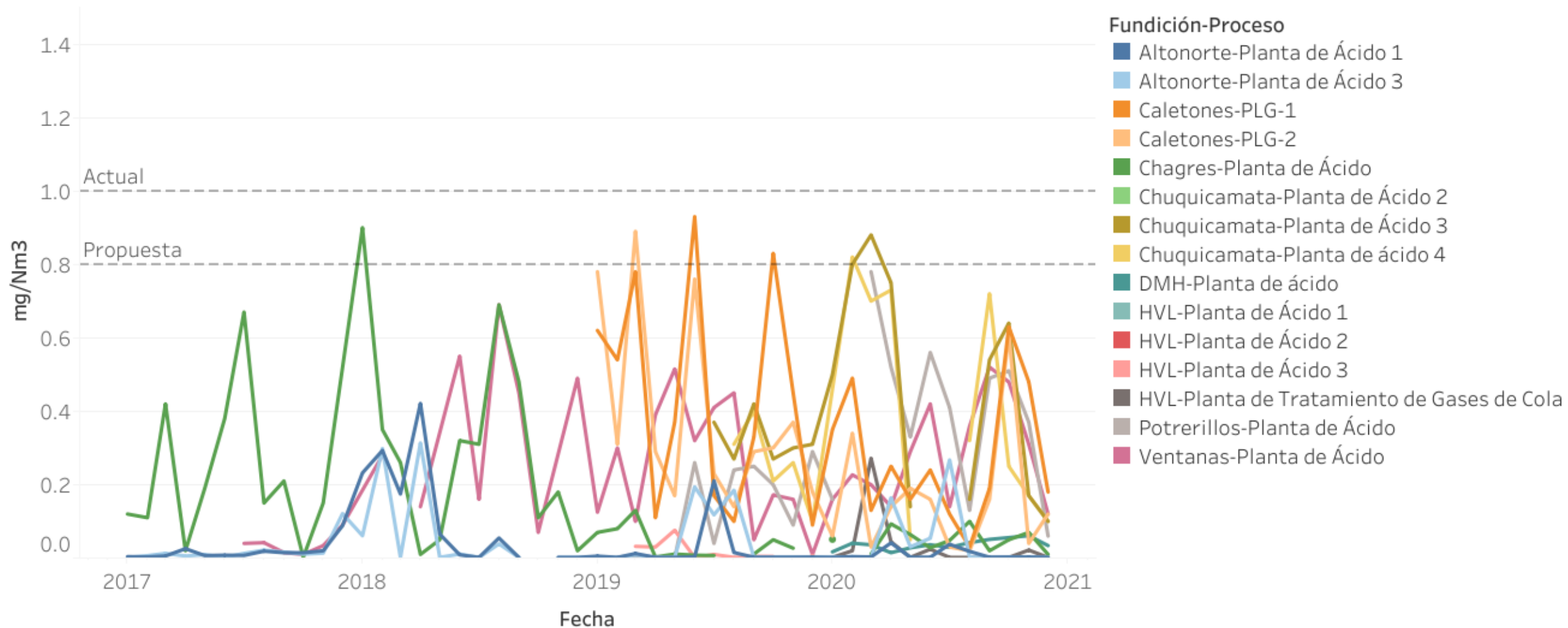
Límite SO₂ Plantas de ácido



Límite de 600 es para todas las fuentes menos DMH que tiene un límite de 400 ppm

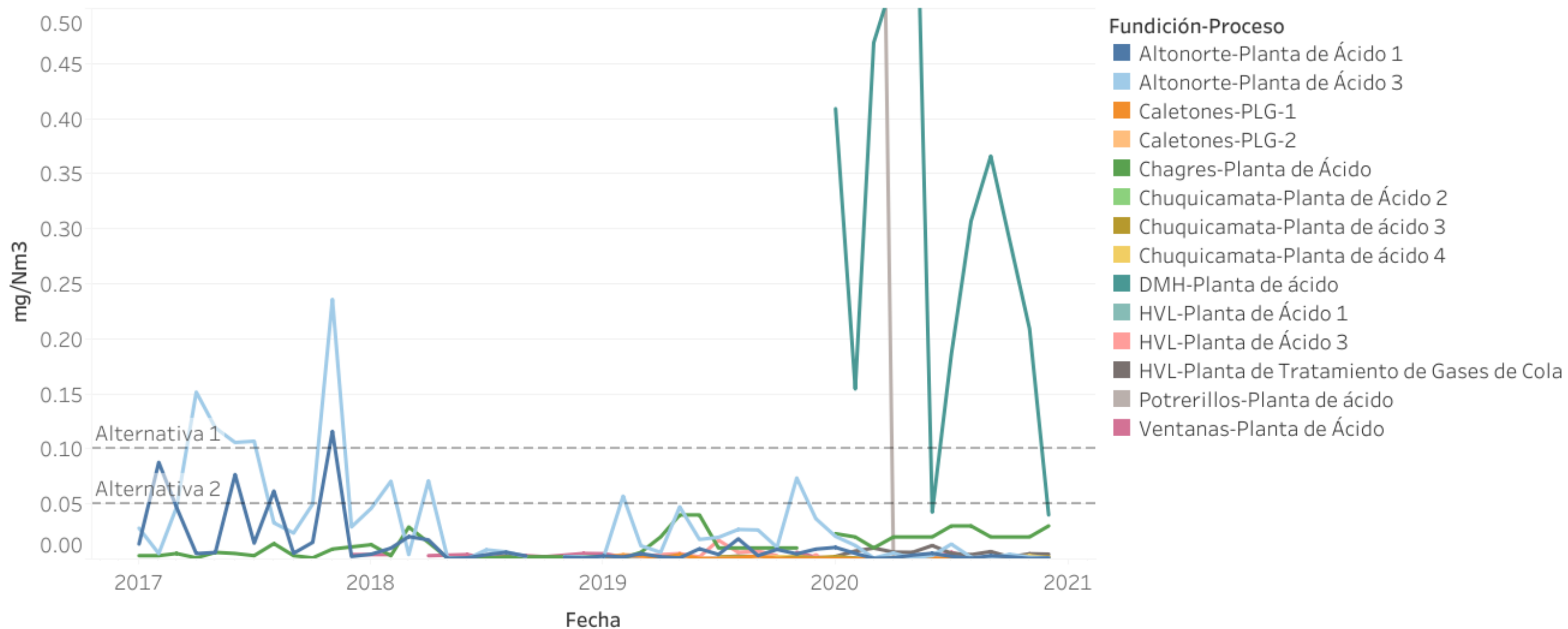
- Límite propuesto desde Alternativa 2. Pasar de percentil 95 a percentil 99

Límite As Plantas de ácido



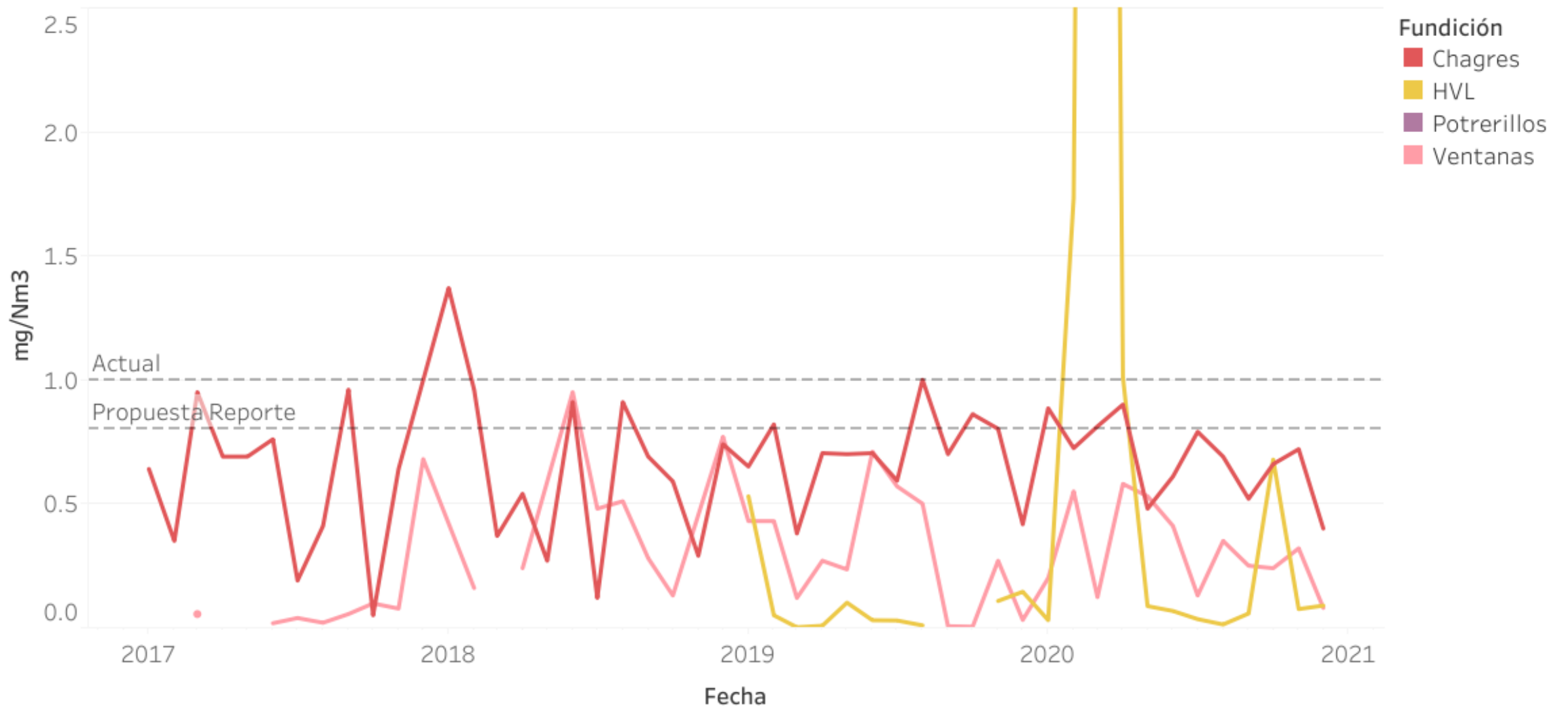
□ Límite propuesto desde Alternativa 1

Límite Hg Plantas de ácido



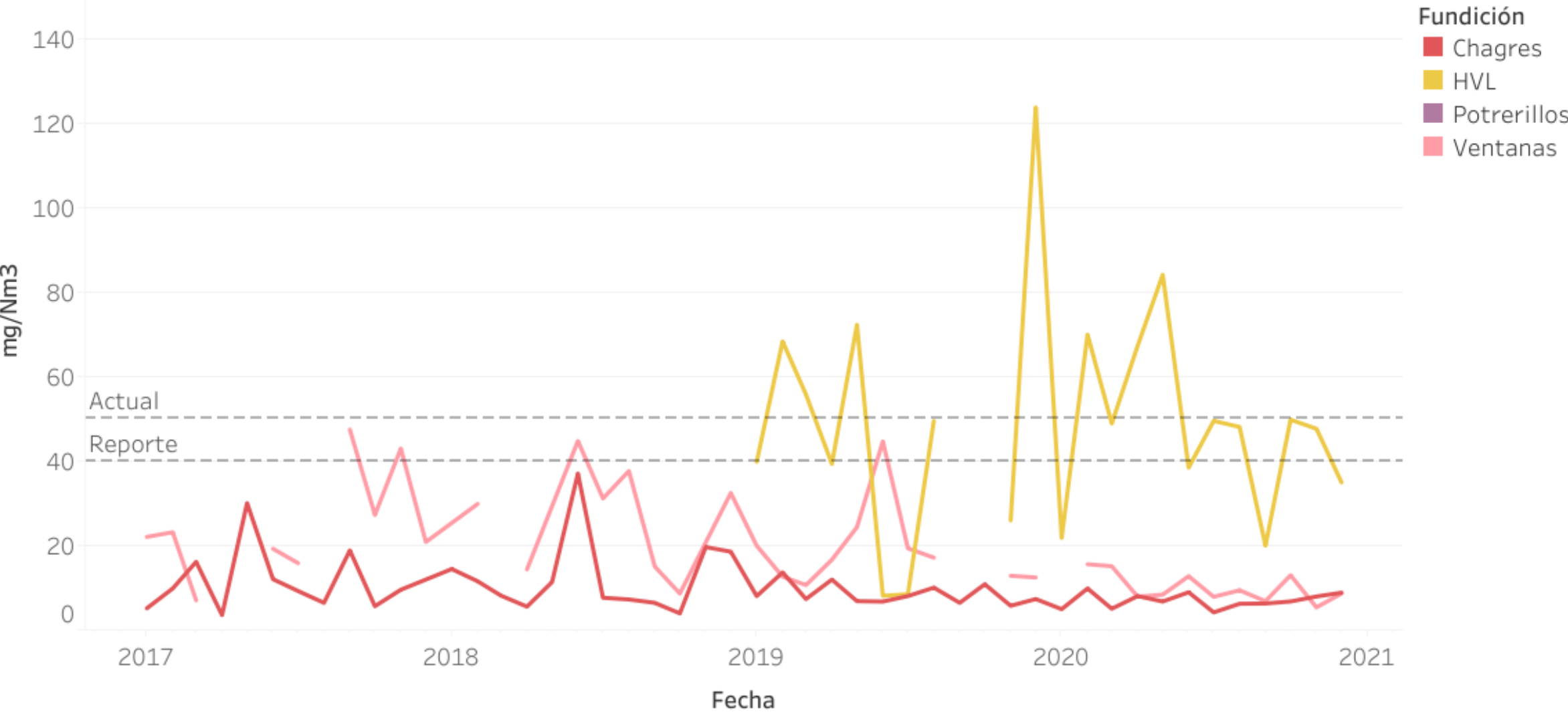
□ Límite propuesto desde Alternativa 1. Para Alternativa 2 y 3, propuesta es más ambiciosa, sólo para fundiciones (no para otras fuentes)

Propuesta reporte por As en HELE/HE



Propuesta de reporte desde alternativa 1

Propuesta reporte por MP en HELE/HE



□ Propuesta de reporte desde alternativa 1

Propuesta limite MP en hornos de refino



Ventanas tiene datos semestrales y Chagres mensuales.

- Propuesta de reporte desde alternativa 2

medidas de reducciones

Relación entre la NPCA para As y la NE requerida para cumplirla

relacion NE AS y NE

Fundición	Escenario de Norma de Calidad		
	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
DCH	Actual ✓	Alternativa 3	Alternativa 3 + reducción
ALN	Actual ✓	Actual	Actual
POT	Actual ✓	Actual	Actual
HVL	Alternativa 1	Alternativa 2 + Planta de Flotación	Alternativa 3 + Planta de Flotación
VEN	Alternativa 3	Alternativa 3 + Planta de Flotación	Alternativa 3 + Planta de Flotación
CHG	Actual ✓	Actual	Alternativa 1
CAL	Actual ✓	Actual	Actual

Más estricto.

□ Para cumplir con la NPCA se requieren límites de emisión asimilables a cada alternativa de NE.

□

Relacion entre la NPCA para As y la NE requerida para cumplirla

NPCA	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
DCH	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)
ALN	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
POT	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
HVL	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (46,6) (con Planta de Flotación)	Esc. Cont. Lim. (15,0) (con Planta de Flotación)
VEN	--	--	Esc 2 en 10k (46,6)
CHG	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
CAL	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc. Cont. Lim. (15,0)

Para cumplir con la NPCA se requieren limites de emisión asimilables a cada alternativa de NE.

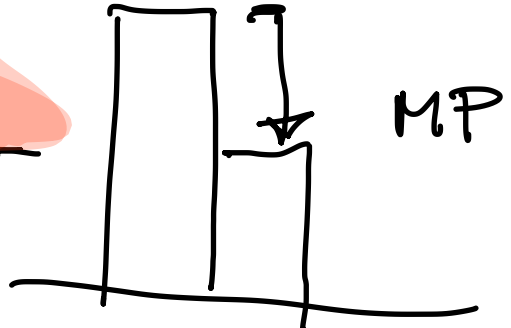
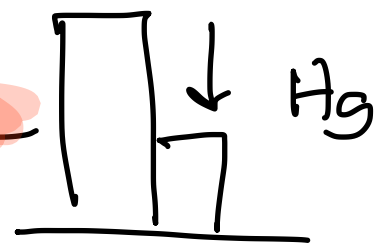
ESTIMACIÓN DE POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES PARA LAS ACTUALES FUENTES EMISORAS DE ARSÉNICO

La investigación al servicio de una política pública sustentable

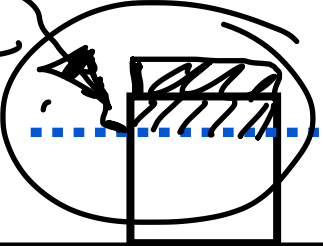


Alt 1
≡ |
Alt 2
≡ |
Alt 3
≡ |

↓ ↓ ↓
Cr
Vn
Zn
Cd

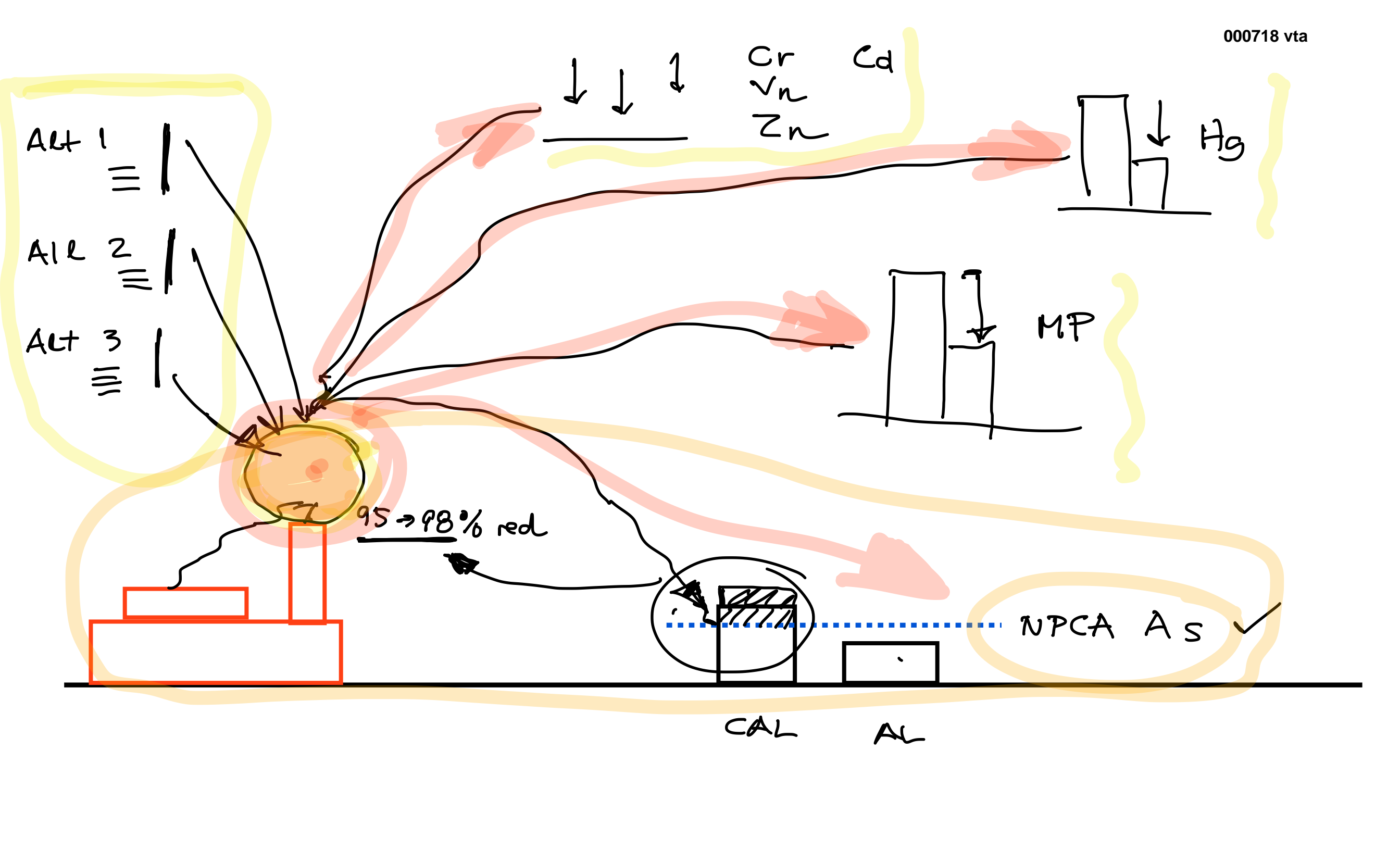


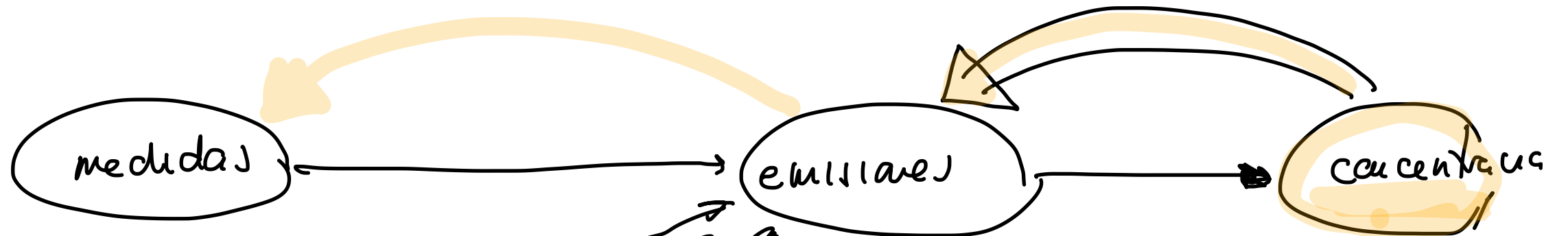
95 → 98% red



NPCA AS ✓

CAL AL





Base

Alt. 1 secucio capture

Alt 2 proc. mitacs

Alt 3 todo



NPCA
{ 1 }
{ 2 }
{ 3 }

Potencial de reducción

Potencial de reducción SO₂ [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035

Medida de mitigación	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	Total
Planta tostación		203.942	65.247	140.946	169.334	160.456	463.009	1.202.935
Captura secundaria en boca del reactor		805.756	190.989	792.286			3.076.344	4.865.375
Captura y tratamiento sangrado reactor	287.110	773.526	183.350	380.297		255.134	1.181.316	3.060.733
Captura y tratamiento gases secundarios CPS			398.785	806.151		1.641.134	2.569.362	5.415.432
Captura terciaria en CPS (1)	959.767	1.442.073	512.724	1.036.479	331.271	2.110.029	3.303.466	9.695.810
Alimentación carga fría CPS		400.576	142.423			586.119	917.629	2.046.748
Captura y tratamiento hornos escoria				40.180		59.597		99.777
Flotación de escorias				180.811	260.052	268.187		709.049
Planta de tratamiento de gases de cola							903.099	903.099

□ Nota: Las celdas en blanco significan que las medidas no son aplicables a la fundición correspondiente o que ya tienen una medida aplicada con mayor eficiencia.

Potencial de reducción

Potencial de reducción As [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035

Medida de mitigación	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	Total
Planta tostación		12.882	6.654	2.219	3.119	1.047	7.352	33.273
Captura secundaria en boca del reactor			16.002	3.293	347		28.217	47.860
Captura y tratamiento sangrado reactor	54.705	38.202	13.961	1.437		1.228	9.847	119.381
Captura techo en reactor (1)	70.187	61.992	35.457	5.569	5.763	1.477	44.752	225.197
Captura techo y filtro de manga reactor (1)	78.961	69.741	39.889	6.265	6.483	1.662	50.346	253.347
Captura y tratamiento gases secundarios CPS			1.600	201		266	1.129	3.196
Captura terciaria en CPS (2)	6.323	719	1.994	251	128	332	1.407	11.154
Alimentación carga fría CPS			233			39	165	437
Captura y tratamiento hornos escoria				5.663		-		5.663
ESP húmedo en horno anódico	82.126			72				82.198
Flotación de escorias				11.325	16.780	4.551		32.656

(1) Potencial incluye la instalación de captura secundario en boca del reactor y captura y tratamiento del sangrado del reactor.

(2) Potencial incluye la captura y tratamiento de gases secundarios en CPS.

Nota: Las celdas en blanco significan que las medidas no son aplicables a la fundición correspondiente o que ya tienen una medida aplicada con mayor eficiencia.

EVALUACIÓN DE COSTOS Y BENEFICIOS

La investigación al servicio de una política pública sustentable

90



Evaluación de los beneficios de los escenarios regulatorios propuestos

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 (-)
Potrillo	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 (-)

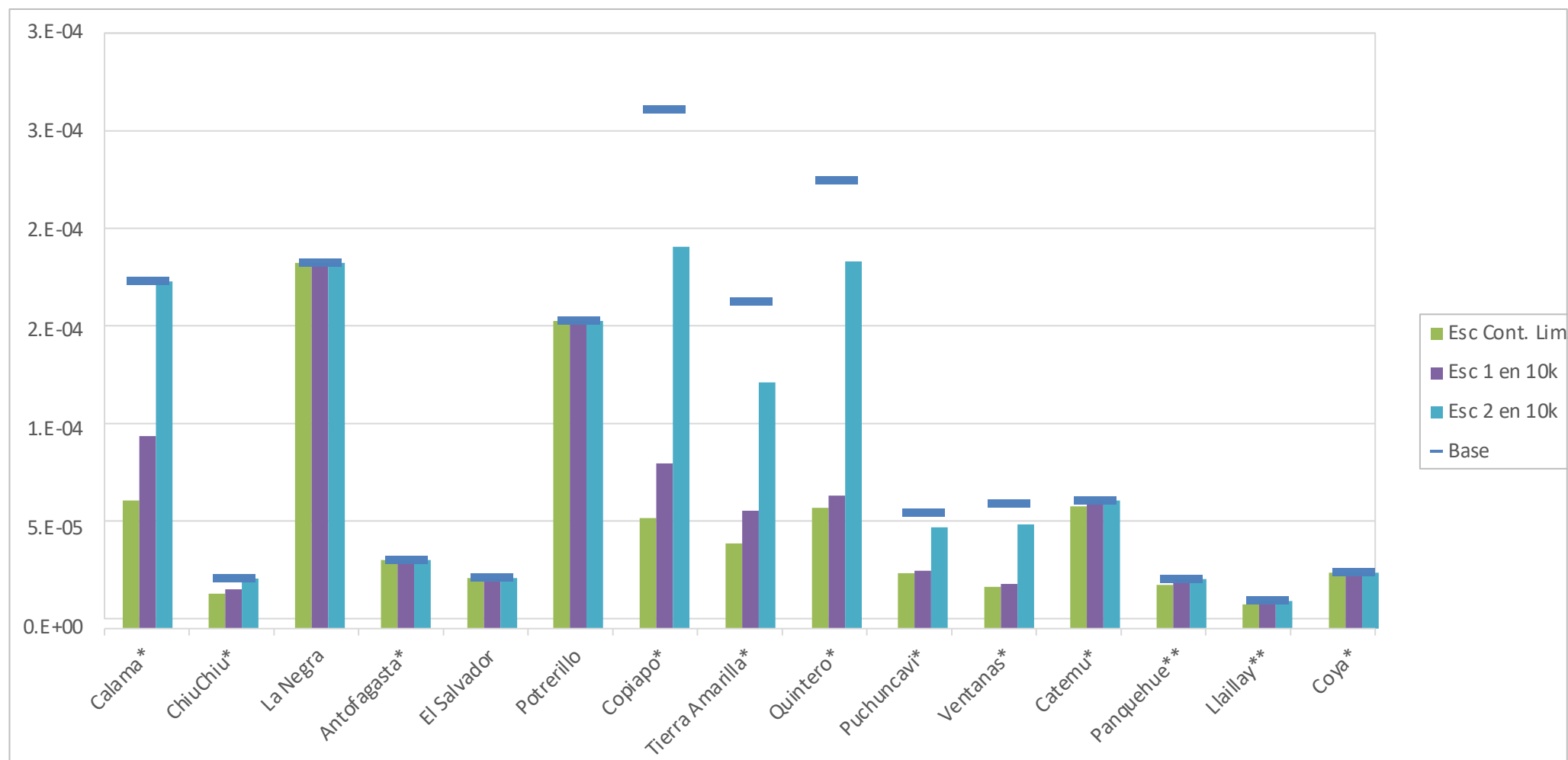
Notas:

- Base = Concentración total sin norma, proyección al 2035.
- En paréntesis se muestra la reducción alcanzada respecto del escenario base.

* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10.

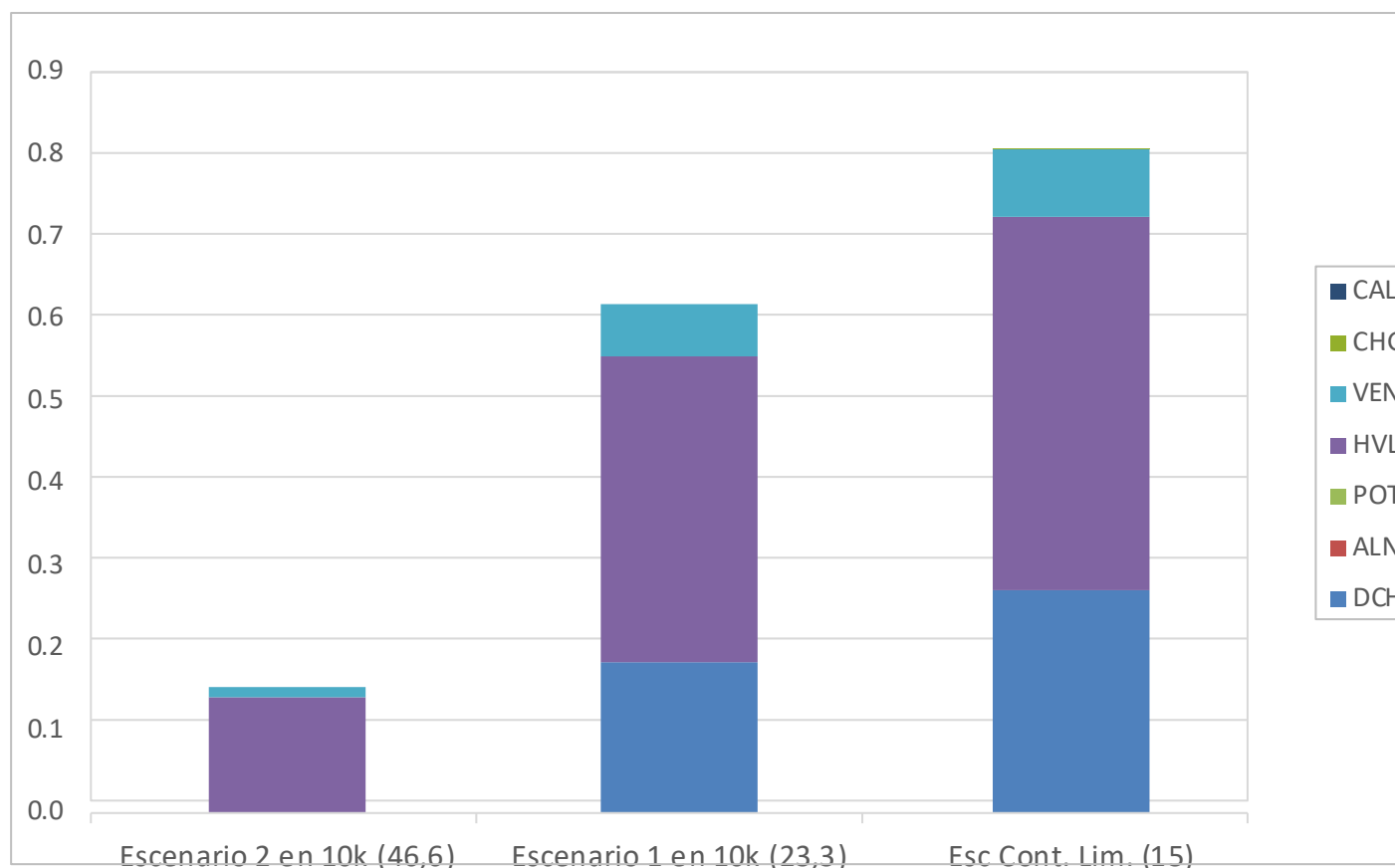
** Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen solo de la modelación de dispersión.

Variación de riesgo incremental según escenario regulatorio



- IUR: US-EPA
- Año referencial: 2035
- * Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10
- ** Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

Beneficios por reducción en número de casos de cancer esperados



Distribución de la reducción del riesgo poblacional por escenario para año referencial, en casos esperados

- IUR: US-EPA; Sensibilización con IUR OMS es 2,87 veces menor.
- Población: en base a proyección INE 2035
- Año referencial: 2035

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	-	-	-
Potrerillo	-	-	-
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

Valorización de los beneficios anuales [UF/año] asociados a los escenarios de NPCA para el año de referencia

* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10.

Metodología estimación costos de inversión, operación y mantenimiento de tecnologías de reducción de emisiones

- Considerando las **emisiones puntuales y fugitivas** asociadas a cada **proceso unitario** identificado:
 - Siguiendo lineamientos de la US-EPA, **se compararon las 7 fundiciones entre sí** (factibilidad, costos).
 - Se revisó la **literatura nacional e internacional**. Se revisaron los documentos asociados a la **nueva propuesta NE para fundiciones de cobre** en desarrollo por la US-EPA (2022a). Se destaca un caso de estudio en que se evaluó qué tecnologías tendrían que ser aplicadas en las fundiciones existentes si las normas tuvieran un alto nivel de exigencia.
 - A partir de la identificación de medidas de abatimiento factibles **se compilaron sus costos y eficiencias de captura**, así como consideraciones relevantes para su evaluación y aplicación.

- Estimación costo unitario de inversión
 - Se **privilegian antecedentes nacionales**, complementados por entrevistas a las fundiciones.
 - Se consideraron diversos factores, seleccionando uno o dos factores con información disponible para todas las fundiciones, que mejor podría representar el proceso de escalamiento de las tecnologías.
 - Se consideraron **hasta dos componentes de los costos**, de esta forma su suma da el costo de inversión total.

- Estimación costos unitario de operación y mantenimiento
 - Se **privilegian antecedentes nacionales**, complementados por entrevistas a las fundiciones.

Metodología estimación costos de detención por implementación, y por reducción del nivel de producción

□ Costos de detención por implementación

Costo por **tiempos de implementación de las medidas de abatimiento y posterior puesta en marcha** (incluye periodos de adaptación de producción menor intensidad).

- Se realizan los siguientes supuestos sobre los tiempos de detención:
 - 5 meses para medidas en la misma línea de producción (ej. reactores)
 - 3 meses para medidas de captura de techo o sistemas anexos (ej. captura de techo en horno de escoria)
 - 1 mes para medidas de instalaciones anexas (ej. planta de tostación)
- Para estimar el costo se considerar el **valor agregado de la fundición** (143,2 UF/ton).

□ Costos por reducción del nivel de producción

Si las medidas adicionales a implementar tienen un **costo total muy alto** —mayor a los ingresos de la venta de cobre—, es lógico que la **fundición decida limitar su producción** hasta el límite que permite que se cumpla la NPCA.

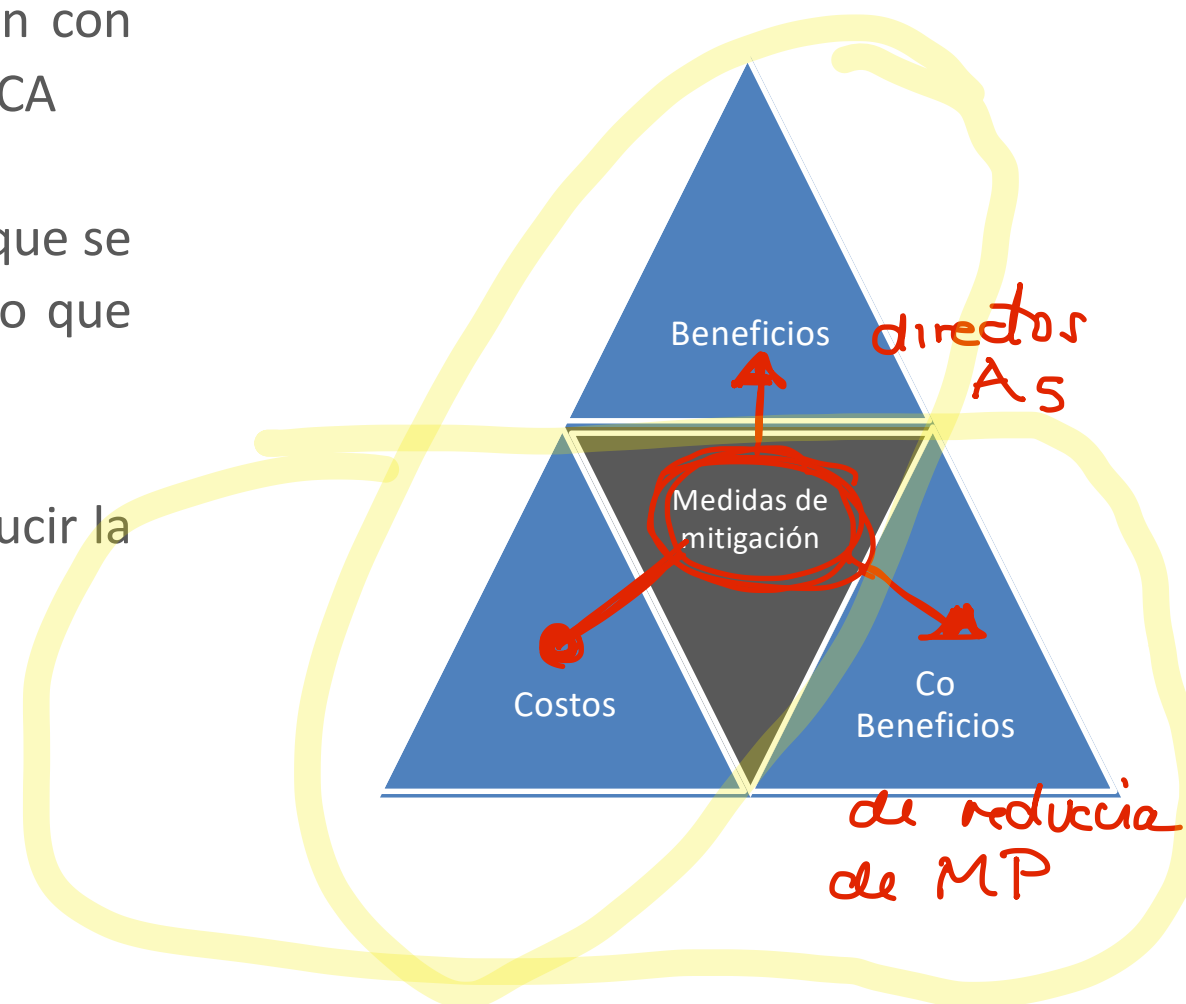
- Se estima la **emisión de arsénico proyectada** para cada fundición, según su producción proyectada
- Se estima un **costo unitario de no producción**, utilizando el mismo valor agregado de la fundición.

Fundición	Costo [UF/ As]
Chuquicamata	183.553
Altonorte	352.200
Potrerosillos	353.785
HVL	716.172
Ventanas	823.247
Chagres	1.801.819
Caletones	686.377

Costos y beneficios:

Selección de paquete de medidas para escenarios de NPCA

- Se seleccionan paquetes de medidas de forma tal que, se **minimicen los costos totales**, sujetos a que cumplan con los límites de concentración de cada escenario de NPCA
- Es un problema no lineal, por lo que, puede suceder que se opte por medidas con costos medios más altos, pero que logren costos totales menores.
- Como medida también se considera la opción de reducir la producción para dar cumplimiento a la NPCA.



Costos y beneficios: Paquete de medidas para escenarios de NPCA

Fundición	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chuquicamata	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: -	CPS: Captura Terciaria en CPS	CPS: Captura Terciaria en CPS
	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	-	-	-
Potrerrillos	-	-	-
Hernán Videla Lira	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
Chagres	Reactor: -	Reactor: -	Reactor: Captura y tratamiento sangrado reactor
Caletones	-	-	-

Costos y beneficios: Costo de Paquete de medidas para escenarios de NPCA

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

Reducciones de emisiones logradas y efecto en concentraciones

Estimación de reducción de emisiones lograda (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	-	-	-
Potrerosillos	-	-	-
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

El proceso de selección de medidas es discreto, y luego las reducciones alcanzadas pueden ser mayores que las reducciones requeridas.

→ Esto se traduce en que las concentraciones esperadas para dar cumplimiento a la norma puedan ser menores a las concentraciones límites establecidas por la norma.

Co-beneficios:

Mejora en efectos de salud por reducción de MP2,5

Estimación de co-beneficios [UF/año], por escenario y efecto considerado, 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

Costos y beneficios:

Beneficios totales

Beneficios totales [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia



- Los co-beneficios corresponden a cerca del 97% de los beneficios totales estimados
- El escenario de 23,3 [ng/m3] tiene cerca de 3,7 veces más beneficios comparado con el escenario de 46,6 [ng/m3]
- El escenario de 15,0 [ng/m3] tiene cerca de 4,5 veces más beneficios comparado con el escenario de 46,6 [ng/m3]

Costos y beneficios: Indicadores descriptivos por fundición

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

Nota: 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).

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

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

Costos y beneficios: Indicadores al 2035

Calidad ↓

Escenario	Reducción de Emisión <i>AS</i> [t/año]	Reducción Cáncer al pulmón [casos/año]	Red Mortalidad prematura MP2.5 [casos/año]	Beneficios [UF/año]	Costos [UF/año]	Razón B/C
<u>Esc 2 en 10k (46,6)</u>	<u>11</u>	<u>0,2</u>	<u>5,4</u>	105.802	100.051	<u>1,06</u>
Esc 1 en 10k (23,3)	<u>196</u>	<u>0,7</u>	<u>18,9</u>	369.031	713.756	<u>0,52</u>
<u>Esc Contribución Limitada (15,0)</u>	<u>266</u>	<u>0,8</u>	<u>22,6</u>	441.151	11.542.409	<u>0,04</u>

Nota: 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).

Costos y beneficios:

Indicadores descriptivos – sin Ventanas

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)	5,7	33.282	0,16	4,7	91.089	2,74
Esc 1 en 10k (23,3)	173,3	475.294	0,60	16,0	311.647	0,66
Esc Cont Lim (15,0)	243,0	11.245.684	0,75	19,6	382.268	0,03

Nota: 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).

Escenario	D E	C	D Can	D Mort	B	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