

2012

MODELACIÓN ATMOSFÉRICA DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A FUNDICIONES DE COBRE

Informe final

El estudio se centra en el desarrollo de una modelación fotoquímica de los contaminantes MP2.5 y SO₂ asociados a las fundiciones de cobre de Chile, ubicadas entre la II y VI región de Chile, y que se encuentran circunscritas en áreas aledañas a emplazamientos urbanos con problemas históricos de mala calidad del aire.



UNIDAD DE CALIDAD DEL AIRE
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TEMUCO

EQUIPO CONSULTOR

LUIS DÍAZ-ROBLES, PhD.	: Director del Proyecto
CRISTIAN VARELA BRUCE	: Equipo técnico, Modelación
PAMELA REBOLLEDO BOVONE	: Equipo técnico, Gestión
SERGIO DÁVILA RIQUELME	: Equipo técnico, Inventarios
PRAKASH DORAISWAMY, PhD.	: Asesor externo internacional
MARCELO MENA, PhD.	: Asesor externo nacional

DATOS DE LA INSTITUCIÓN EJECUTORA

PROPONENTE	: UNIDAD DE CALIDAD DEL AIRE UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TEMUCO
Dirección	: Rudecindo Ortega 02950, Temuco, Chile.
Página web	: www.uctemuco.cl/aire
Teléfono	: 45 – 553737
ASESORIA INTERNACIONAL	: RESEARCH TRIANGLE PARK
Dirección	: North Carolina, 3040 East Cornwallis Road, EE.UU.
Página web	: www.rti.org
Teléfono	: 919-541-6000
ASESORIA EXTERNA	: CENTRO DE SUSTENTABILIDAD UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO
Dirección	: Av. República 237, Santiago, Chile
Página web	: http://ambiental.unab.cl/
Teléfono	: 02- 6618000

A: Sr. Cristóbal De La Maza

Ministerio de Medio Ambiente

PRESENTE

Estimado Sr.

Por intermedio de la presente hago entrega del informe final de la asistencia técnica “Modelación Atmosférica de Contaminantes asociados a Fundiciones de Cobre”, de acuerdo a lo establecido en el contrato de prestación de servicios, donde se establecen los términos de dicha asistencia técnica.

Atte.,

Luis Díaz Robles
Director Unidad de Calidad del Aire
Universidad Católica de Temuco

INDICE

EQUIPO CONSULTOR.....	ii
DATOS DE LA INSTITUCIÓN EJECUTORA	ii
I RESUMEN EJECUTIVO	vii
1. Antecedentes generales.....	1
1.1 Fundiciones de Cobre de Chile.....	1
2. Modelo de dispersión de contaminantes de las fundiciones de cobre: Escenario base.	4
2.1 Compilación y validación de información de emisiones asociadas a fundiciones de cobre.	4
2.2 Metodología de modelación de dispersión utilizada.	11
2.3 Resultados de modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos de las 7 fundiciones de cobre de Chile.....	16
3. Validación del modelo de dispersión para el escenario base.	25
3.1 Validación de la modelación obtenida.....	25
3.2 Metodología de ajuste de datos observados vs simulados, e intervalo de confianza de los resultados.....	28
4. Estimación de los efectos en la concentración ambiental de SO ₂ y MP2.5, según escenarios normativos de reducción de emisiones de fundiciones de cobre.	30
4.1 Reducción de emisiones de SO ₂ y MP2.5 para 3 escenarios normativos respecto del escenario base.....	30
4.1.1 Reducción de emisiones de SO ₂ y MP2.5 para Escenario 1 (95%).	30
4.1.2 Reducción de emisiones de SO ₂ y MP2.5 para escenario 2 (97%).	31
4.1.4 Reducción de emisiones de SO ₂ y MP2.5 para escenario 3 (98%)	32
4.2 Concentraciones de SO ₂ y MP2.5 por grilla definida para el escenario base y 3 escenarios normativos.	33
4.2.1 Concentraciones de SO ₂	34
4.2.2 Concentraciones de MP2.5.....	38
5. CONCLUSIONES.....	40
6. REFERENCIAS	42

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fundiciones de Cobre de Chile. Ubicación geográfica.....	1
Tabla 2. Situación actual en áreas circundantes a Fundiciones de Cobre de Chile.....	3
Tabla 3. Parámetros medidos en las estaciones de monitoreo circunscritas al dominio geográfico de modelación.	5
Tabla 4. Emisiones de SO ₂ por Fundición de Cobre, año 2010.....	7
Tabla 5. Emisiones de SO ₂ y MP _{2.5} para cada Fundición de Cobre (Ton/año), de acuerdo a porcentaje (%) de captura estimado para el escenario base del año 2008.	16
Tabla 6. Emisiones de SO ₂ (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 1, regulado al 95% de captura.....	30
Tabla 7. Emisiones de MP _{2.5} (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 1, regulado al 95% de captura.....	31
Tabla 8. Emisiones de SO ₂ (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 2, regulado al 97% de captura.....	31
Tabla 9. Emisiones de MP _{2.5} (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 2, regulado al 97% de captura.....	32
Tabla 10. Emisiones de SO ₂ (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 3, regulado al 98% de captura.....	32
Tabla 11. Emisiones de MP _{2.5} (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 3, regulado al 98% de captura.....	33
Tabla 12. Concentraciones de SO ₂ y porcentajes de reducción de emisiones por grilla definida en cada Fundición de Cobre, para cada escenario regulado respecto del escenario base.	34
Tabla 13. Concentraciones de MP _{2.5} y porcentajes de reducción de emisiones por grilla definida en cada Fundición de Cobre, para cada escenario regulado respecto del escenario base.....	38

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zonificación del área de estudio.....	2
Figura 2. Protocolo de Modelación Fotoquímica.....	12
Figura 3. Esquema de Funcionamiento Modelo WRF.....	13
Figura 4. Esquema de Funcionamiento Modelo CMAQ.....	14
Figura 5. Comportamiento diario de las Concentraciones de SO ₂ (µg/m ³). Enero 2008.....	17
Figura 6. Comportamiento diario de las Concentraciones de MP2.5 (µg/m ³).....	18
Figura 7. Influencia de la pluma de SO ₂ (µg/m ³) en las concentraciones de sectores ubicados en la corriente de transporte. Enero 2008.....	20
Figura 8. Comportamiento diario de las Concentraciones de SO ₂ (µg/m ³). Enero 2008.....	21
Figura 9. Comportamiento diario de las Concentraciones de MP2.5 (µg/m ³).....	22
Figura 10. Influencia de la pluma de SO ₂ (µg/m ³) en las concentraciones de sectores ubicados en la corriente de transporte. Enero 2008.....	24
Figura 11. Curvas de ajuste-respuesta de resultados horarios de concentración de SO ₂ modelados, contra datos observados (µg/m ³). Estación La Greda.....	25
Figura 12. Curvas de ajuste-respuesta de resultados horarios de concentración de SO ₂ modelados, contra datos observados (µg/m ³). Estación Cauquenes.....	26
Figura 13. Curvas de ajuste-respuesta de resultados diarios de concentración de SO ₂ modelados, contra datos observados (µg/m ³). Enero 2008. Estación La Greda.....	27
Figura 14. Curvas de ajuste-respuesta de resultados diarios de concentración de SO ₂ modelados, contra datos observados (µg/m ³). Enero 2008. Estación La Greda.....	27
Figura 14. Concentraciones de SO ₂ para escenario base y escenarios regulados.....	35
Figura 15. Concentraciones de SO ₂ (µg/m ³) evitadas, según escenario regulatorio de 95% en Fundiciones de Caletones y Ventanas, imagen derecha e izquierda.....	36
Figura 16. Concentraciones de SO ₂ (µg/m ³) evitadas, según escenario regulatorio de 95% en Fundiciones de Chuquicamata y Altonorte., imagen derecha e izquierda.....	36
Figura 17. Concentraciones de SO ₂ (µg/m ³) evitadas, según escenario regulatorio de 95% en Fundiciones de Potrerillos y Paipote., imagen derecha e izquierda respectivamente.....	37
Figura 18. Concentraciones de MP2,5 para escenario base y escenarios regulados.....	39
Figura 19. Concentraciones de MP2.5 (µg/m ³) evitadas, según escenario regulatorio de 95% en Fundición Caletones. (µg/m ³) y Ventanas, imagen derecha e izquierda respectivamente.	39

I RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe muestra los resultados obtenidos en el estudio “Modelación Atmosférica de Contaminantes asociados a Fundiciones de Cobre de Chile”, el cual consistió en el desarrollo de una modelación fotoquímica de los contaminantes, MP_{2.5} y SO₂, asociados a todas las fundiciones de cobre del país, y que incluyó en el procesamiento, datos de emisión de otras fuentes presentes en el área de estudio, ubicadas entre la II y VI región de Chile. Contiene descripciones y discusiones asociadas al área de estudio, en términos de meteorología y calidad del aire según normativa aplicable, definición y configuración del modelo meteorológico, análisis de desempeño y mapas de temperatura, trayectoria y velocidad del viento, para el dominio geográfico, además del procesamiento de emisiones y modelación fotoquímica (informe y anexos).

En este contexto, cabe mencionar que el trabajo realizado partió con una exhaustiva revisión y análisis de la información de calidad del aire y meteorología disponible en las bases de datos nacionales (estaciones de monitoreo), para identificar la calidad de la misma como insumo para el uso en los modelos de calidad del aire. Por otra parte, considerando la distribución de las fuentes de interés y la necesidad de conocer el destino y transporte de los contaminantes mencionados, el equipo consultor definió un dominio de modelación consistente en un dominio madre (que abarca desde la región de Arica y Parinacota por el norte, hasta la región de Los Lagos por el sur), con una resolución de celdas de 12 km. Además se consideran dos dominios anidados, uno que considera la II a la III región, y otro la V a la VI región, ambos con una resolución de celdas de 4 km. de resolución, abarcando toda el área de interés.

Finalmente, cabe destacar que de acuerdo a los periodos modelados, se obtuvo una robusta asociación y predicción entre las variables observadas y las modeladas, cumpliendo la modelación meteorológica desarrollada con los requerimientos de los modelos de calidad del aire a utilizados.

Respecto de los resultados obtenidos, cabe señalar que hubo comportamientos diferenciados para los puntos evaluados en las cercanías de cada fundición, lo cual respondió por un lado, a la data de entrada utilizada por el modelo y que guarda relación con las emisiones propias de cada fuente estrechamente vinculada a su infraestructura, capacidad de captura y fijación. Por otro lado responde a la interacción de las emisiones de la fundición con otras fuentes circundantes, o entre las plumas de 2 fundiciones, como es el caso de la fundición Ventanas con la fundición Chagres.

1. Antecedentes generales

1.1 Fundiciones de Cobre de Chile

En relación a la zona de estudio, se definió en función del área donde se encuentran emplazadas las 7 fundiciones de cobre¹ que operan en la actualidad en el país, las cuales se encuentran distribuidas entre las regiones de Antofagasta y el Libertador Bernardo O'Higgins. En la Tabla siguiente se indica la ubicación geográfica de las 7 fundiciones.

Tabla 1. Fundiciones de Cobre de Chile. Ubicación geográfica.

Fundición	Región	Comuna	Coordenada	
			Lat	Lon
Fundición Chuquicamata	II	Calama	-22.312	-68.885
Fundición Altonorte	II	Antofagasta	-23.829	-70.317
Fundición Potrerillos	III	Diego de Almagro	-26.438	-69.479
Fundición Hernán Videla Lira	III	Copiapó	-27.412	-70.258
Fundición Ventanas	V	Puchuncaví	-32.762	-71.483
Fundición Chagres	V	Catemu	-32.804	-70.955
Fundición Caletones	VI	Machalí	-34.104	-70.452

Fuente: elaboración propia

Notar que la mayoría de las fundiciones se ubican en la zona norte del país, dejando una menor presencia en la zona centro, y ninguna en la zona sur. Esta información es relevante a la hora de estudiar los posibles impactos por la actividad en la comunidad.

¹ Las fundiciones de cobre constituyen una de las principales actividades económicas del país, constituyéndose también en el pilar económico de algunas ciudades.



Figura 1. Zonificación del área de estudio.

La importancia del área de estudio radica en la existencia de diferentes emplazamientos humanos, que por largos años han presentado problemas de calidad del aire, derivados principalmente de la operación de las fundiciones. Lo anterior, se ha visto refrendado con la declaración de zona saturada de estos emplazamientos, principalmente por concepto de superaciones reiteradas de las normas de MP10 y SO₂, respectivamente.

Tabla 2. Situación actual en áreas circundantes a Fundiciones de Cobre de Chile.

Región	Área	Declaración	Contaminantes	Plan/año
II	Ciudad de Tocopilla	Zona Saturada, 2007	MP10	PDA en elaboración
II	Zona circundante a la Fundición Chuquicamata de CODELCO	Zona Saturada, 1991	MP10, SO ₂	PDA, 1993, 2001
III	Zona circundante a la Fundición Potrerillos de CODELCO, División Salvador	Zona Saturada, 1997	MP10, SO ₂	PDA, 1999
III	Zona circundante a la Fundición Hernán Videla Lira, comunas de Tierra Amarilla y Copiapó	Zona Saturada, 1993	SO ₂	PDA, 1995
IV	Ciudad de Andacollo	Zona Saturada, 2009	MP10	PDA en elaboración
V	Complejo Industrial Ventanas de las comunas de Puchuncaví y Quintero	Zona Saturada, 1993	MP10, SO ₂	PDA, 1993
RM	Región Metropolitana de Santiago	Zona Saturada Zona Latente	MP10, O ₃ , SO ₂ NO ₂	PPDA, 1996, 2004, 2010
VI	Zona circundante a la Fundición Caletones, División el Teniente de CODELCO, comunas de Mostazal, Codegua, Machalí y Requínoa	Zona Saturada, 1994	MP10, SO ₂	PDA en elaboración
VI	Ciudad de Rancagua	Zona Saturada, 2009	MP10	PDA en elaboración

Fuente: elaboración propia.

2. Modelo de dispersión de contaminantes de las fundiciones de cobre: Escenario base.

2.1 Compilación y validación de información de emisiones asociadas a fundiciones de cobre.

A continuación se presenta de manera resumida, el análisis realizado por el consultor a la data de emisiones generada por las 7 fundiciones de cobre del país, proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente en el contexto de la consultoría. Para iniciar el análisis, se presentan las bases de datos facilitadas:

i. Monitoreo de meteorología y calidad del aire

Para efectos del presente estudio, se realizó análisis de datos que consideró la estadística descriptiva y series de tiempo de las variables de calidad del aire y meteorología asociadas a las estaciones de monitoreo cercanas a las 7 fundiciones de cobre, más algunas estaciones de la Región Metropolitana y Rancagua.

Las variables de calidad del aire y meteorología consideradas en el análisis estadístico básico son detalladas a continuación y corresponden a los siguientes parámetros:

MP2.5 :	Material particulado con diámetro aerodinámico $\leq 10 \mu\text{m}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
SO ₂ :	Dióxido de Azufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
VV :	Velocidad del viento (m/s)
DV :	Dirección del viento (Rosa de los Vientos)
T :	Temperatura ambiental (°C)
HR :	Humedad Relativa (%)

Respecto de los parámetros monitoreados en las estaciones circunscritas al dominio de modelación, y señalados en la Tabla siguiente, se debe indicar que existe disparidad en la disponibilidad de la data, ya que si bien existe una completa base de datos para el contaminante SO₂, se tiene que la data para MP_{2.5} casi no existe. Para el caso de los datos meteorológicos, hay varias estaciones que no tienen datos para el año 2008. Los parámetros medidos en las estaciones meteorológicas y de calidad del aire se detallan en Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros medidos en las estaciones de monitoreo circunscritas al dominio geográfico de modelación.

Fundición	Nombre de la Estación	Contaminantes		Meteorología			
		SO ₂	MP2.5	DV	VV	HR	T
Chuquicamata		X		X	X	X	
	Hospital El cobre	X		X	X		X
	San José	X		X	X		X
Alto Norte	Inacesa	X					
	Playa Blanca						
	Rendic						
Paipote	Paipote	X					
	Copiapó	X					
	San Fernando	X					
Potrerillos	CAP	X					
	Doña Ines	X					
Ventanas	La greda	X					
	Los Maitenes	X					
	Puchuncavi	X					
	Sur	X			X		
	Valle Alegre	X			X		
	Principal				X	X	X
Chagres	Chagres			X	X	X	X
	Catemu	X					
	Romeral	X		X	X		
	Santa Margarita	X		X	X		
Caletones	Cauquenes	X		X	X		
	Cipreses	X		X	X		
	Coya Club	X		X	X		
	Coya Población	X		X	X		
	Sewell	X		X			
	Rancagua	X	X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia.

Respecto de análisis de datos asociados a calidad del aire, este se orienta a la evaluación en el cumplimiento de las Normas Primarias de Calidad del Aire, data que es proporcionada por la red de monitoreo, y contempla:

- Norma Anual de material particulado (MP2.5), D.S. N°12/2011.
- Norma Diaria de material particulado (MP2.5), D.S. N°12/2011.
- Norma Anual de dióxido de azufre (SO₂), D.S. N°113/02
- Norma Diaria de dióxido de azufre (SO₂), D.S. N°113/02

Para ver el detalle del análisis asociado a MP_{2.5}, ver Anexo Análisis Meteorología y calidad del aire, donde el consultor muestra el análisis de calidad del aire y análisis de estadística descriptiva para cada una de las estaciones que disponían de datos históricos.

- ii. Base de datos “Emisiones compiladas”: respecto de este archivo, facilitado por el Ministerio de Medio Ambiente, es preciso señalar que:
 - corresponde a un archivo en formato Access con varias hojas de trabajo, en que se presentan variados datos asociados a fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos.
 - contiene catastro de fuentes industriales, fuentes móviles y fuentes de área, desagregadas a nivel de según subcategorías en algunos casos.
 - contiene el inventario de emisiones para todo Chile, para el año base 2008.
 - el inventario incluye una gran variedad de contaminantes, entre ellos: CO, NH₃, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, VOC.

El equipo consultor trabajó en filtrar la data disponible, cruzando bases de datos para llegar a la información de interés para el estudio contenida en un solo archivo.

- iii. Estudio “Evaluación de beneficios de una norma de emisión para fundiciones de cobre”: respecto de ese estudio, corresponde señalar se trata de una consultoría contratada por el Ministerio de Medio Ambiente para contar con un análisis y evaluación de los beneficios sociales de los escenarios regulatorios para las fundiciones de cobre de Chile.

Respecto de la calidad de información presentada, cabe señalar que esta fue preparada por el consultor a cargo de dicho estudio, a partir de datos levantados o conseguidos por diferentes mecanismos, tales como la aplicación de encuestas a las diferentes fundiciones. En este caso, se obtuvo una caracterización de las

instalaciones existentes, así como las emisiones históricas de SO₂, MP y As. Es importante señalar también, que para el estudio en cuestión se trabajó con año base 2010.

Para el presente estudio, se utilizaron algunas de las estimaciones asociadas a las emisiones de SO₂ y MP realizadas según escenario base, y escenarios regulatorios, los cuales fueron contrastados con resultados o estimaciones obtenidas en otros estudios realizados para este mismo fin, y que se detalla más adelante. Algunas estimaciones utilizadas fueron:

Tabla 4. Emisiones de SO₂ por Fundición de Cobre, año 2010.

GEOAIRE 2010	Globales	Chimenea	Fugitivas
Chuquicamata	108.214	41.687	66.527
Altonorte	39.958	31.250	8.708
Poterillos	65.280	13.679	51.601
HVL_ Paipote	21.344	10.810	10.534
Ventanas	15.590	1.714	13.876
Chagres	13.944	3.374	10.570
Caletones	128.468	41.844	86.624

Fuente: Sanhueza, P. 2012.

- iv. Base de datos “BD_Mediciones chim”: respecto de este archivo, facilitado por el Ministerio de Medio Ambiente, es preciso señalar que corresponde a un análisis realizado a observaciones de las mediciones realizadas en las chimenea de diferentes fundiciones para determinar si existe una tendencia a la reducción de eficiencia en sus procesos. Algunas observaciones del consultor respecto de la información facilitada son:
- corresponde a un archivo en formato Excel con varias hojas de trabajo, en que se presentan datos de concentración para las emisiones de SO₂ en cada fundición.
 - los datos corresponden a concentraciones horarias en cada una de las chimeneas de las fundiciones, según Plantas de Ácido.
 - los datos corresponden a concentraciones para el año 2011.
 - el inventario incluye una gran variedad de contaminantes, entre ellos: CO, NH₃, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, VOC.

- v. Base de datos “BD_Filtros”: corresponde a un archivo en formato Excel, el cual no fue de utilidad para el estudio.
- vi. Base de datos “BD_RETC2009”: Corresponde a una base de datos en archivo Excel que muestra datos de emisiones de MP para cada una de las fundiciones. Los datos provienen de la declaración oficial que deben realizar las empresas de acuerdo al D.S. 138 en el “Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes”. Esta base de datos fue clave para intervenir los datos de entrada asociados a MP, ya que las emisiones entregadas en el inventario 2008 no se acercan en absoluto a los datos estimados en los estudios utilizados en el anteproyecto de norma.
- vii. Estudio “Evaluación de costos de escenarios regulatorios para una norma de emisión para fundiciones de cobre”: Este estudio cuyo informe final fue facilitado en un archivo .pdf y respaldos en archivos Excel fue de gran utilidad para determinar y/o ajustar las emisiones a modelar. El estudio en cuestión se enfocó en realizar un análisis de la infraestructura disponible en cada fundición y cómo esta se asocia a la generación, captura, tratamiento y evacuación de emisiones a la atmosfera.

De esta manera, una tarea fue identificar cuáles son las etapas o procesos responsables de la generación de emisiones al interior de cada Fundición (COPRIM, 2011), a efecto de poder distribuir según requerimientos de la evaluación.

Fundición Hernán Videla Lira:

Recepción de concentrados	: Buzones, canchas y mezclas de concentrado
Secado	: un secador rotatorio Fuller (55 t/h)
Horno de fusión	: 1 convertidor Teniente (3,9m x 16m)
Limpieza de escoria	: 1 horno eléctrico Demag (10m. Ø x 5m alto)
Convertidores	: 2 Pierce-Smith (3m x 7,2m), uno caliente
Hornos de retención	: 1 rotatorio (3m x 25m)
Hornos de ánodo	: 1 rotatorio (4m x 9m)
Plantas de ácido	: 2 de simple contacto, 50.000 y 80.000 Nm ³ /h.

Fundición Chuquicamata:

Secado	: 5 silos de almacenamiento y mezcla de conc. 2 secadores rotatorios (130 t/h y 150 t/h)
Horno de fusión	: 2 convertidores Teniente (5m x 22m y 5m x 23m) 1 horno Flash (8,4m x 22,4m)
Limpieza de escoria	: 1 horno basculante HLE (4,5m. x 12,7m alto) 1 horno eléctrico HELE)
Convertidores	: 4 Pierce-Smith (4,5m x 13,2m)
Hornos de ánodo	: 6 rotatorios
Plantas de ácido	: 2 de simple contacto, 50.000 y 80.000 Nm ³ /h.
Otros	:

Fundición Caletones:

Recepción de concentrado	: Sobre correa, tolvas, canchas.
Secado	: 2 secadores Fluo-sólido Fuller (80 t/h), Metso (120 t/h)
Horno de fusión	: 2 convertidores Teniente (5m x 22m)
Limpieza de escoria	: 4 hornos basculantes limp. Escoria Teniente (4,6m Ø x 12,7 y 10m L)
Convertidores	: 4 Pierce-Smith (tres de 4,6m Ø x 10,6m y 1 de 4m Ø x 10,7 mL)
Hornos de ánodo	: 5 basculantes (4m Ø x 11,7m), dos ánodos, tres RAF
Plantas de ácido	: 2 de simple contacto, 50.000 y 80.000 Nm ³ /h.
Otros	:

Fundición Ventanas:

Recepción de concentrado	: Buzones, canchas y mezcla de concentrado.
Secado	: 1 secador rotatorio Fuller (60 t/h)
Horno de fusión	: 1 convertidor Teniente (4m x 15m)
Limpieza de escoria	: 1 horno eléctrico Demag (10m Ø x 5m alto)
Convertidores	: 3 Pierce-Smith (3m x 9,4m)
Hornos de ánodo	: 1 rotatorio (4m x 9m), 2 hornos reverbero (6,5m x 16m)
Plantas de ácido	: 1 Peterson de doble contacto.

Fundición Potrerillos:

Recepción de concentrado	: Cancha, buzones, y sistema de mezcla de concentrados en correas.
Secado	: 1 secador Fluosólido (120 t/h) 9% a 0,2% hd.
Horno de fusión	: 1 convertidor Teniente (5m Ø x 22 mL)
Limpieza de escoria	: 2 hornos basculantes HLE de (4,5m Ø x 12,7mL) + 1 HLE de 4,5 m Ø x 10,5 mL
Convertidores	: 3 Pierce-Smith (4m Ø x 9,1m L) + CT4
Hornos de ánodo	: 2 hornos basculantes refino (4m Ø x 9,1m L),
Plantas de ácido	: 1 simple contacto- volumen 200 kNm ³ /h -9,5% SO ₂ .
Otros	:

Fundición Chagres:

Secado	: 4 silos de almacenamiento 1.700 t 2 secadores rotatorios a vapor (65 t/h c/u)
Horno de fusión	: 1 horno Flash OK (5,7m x 19m x 3,3m)
Limpieza de escoria	: 2 hornos basculantes HLE de (4,5m x 7,9m)
Convertidores	: 4 Pierce-Smith (3m x 6,6m)
Hornos de ánodo	: 2 rotatorios (4m x 7m)
Plantas de ácido	: 1 Lurgi/Fenco doble contacto (1.200 t/d)
Otros	:

Con estos antecedentes fue posible identificar las emisiones asociadas a las fundiciones de cobre, disponibles en la base de datos del inventario nacional

2.2 Metodología de modelación de dispersión utilizada.

a) Modelo utilizado

La Unidad de Calidad del Aire de la Universidad Católica de Temuco trabaja con un sistema de modelación conformado por los modelos: de meteorología WRF (Weather Research and Forecasting), de procesamiento de emisiones SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emission) y de fotoquímica y dispersión de contaminantes CMAQ (Community Multiscale Air Quality). Estos modelos han sido adaptados a las condiciones de diferentes zonas del país, por lo cual son perfectamente aplicables a las condiciones del área de estudio.

Se aplicó el modelo de predicción meteorológica WRF, se elaboraron escenarios de campos de vientos que sirvieron de base para el entendimiento de la meteorología del área de estudio, luego se utilizó un modelo de procesamiento espacial de inventarios de emisiones y finalmente se usó un modelo de dispersión fotoquímica de contaminantes.

Respecto de la aplicación de CMAQ, cabe señalar que este es un modelo Euleriano tridimensional de química atmosférica y modelación del transporte, el cual es capaz de simular ozono, deposición ácida y material particulado fino a través de la troposfera. Diseñado como un modelo de atmosfera única, que puede dirigir acoplamientos complejos entre variados temas de calidad del aire simultáneamente a través de escalas espaciales oscilando desde locales hasta hemisféricas. CMAQ es la tercera generación de modelos de calidad del aire que está diseñado para la aplicación de políticas y regulaciones, su funcionamiento está definido por diversos módulos que entregan las condiciones de borde, iniciales y de radiación.

La siguiente Figura muestra el protocolo de modelación utilizado en el presente estudio.

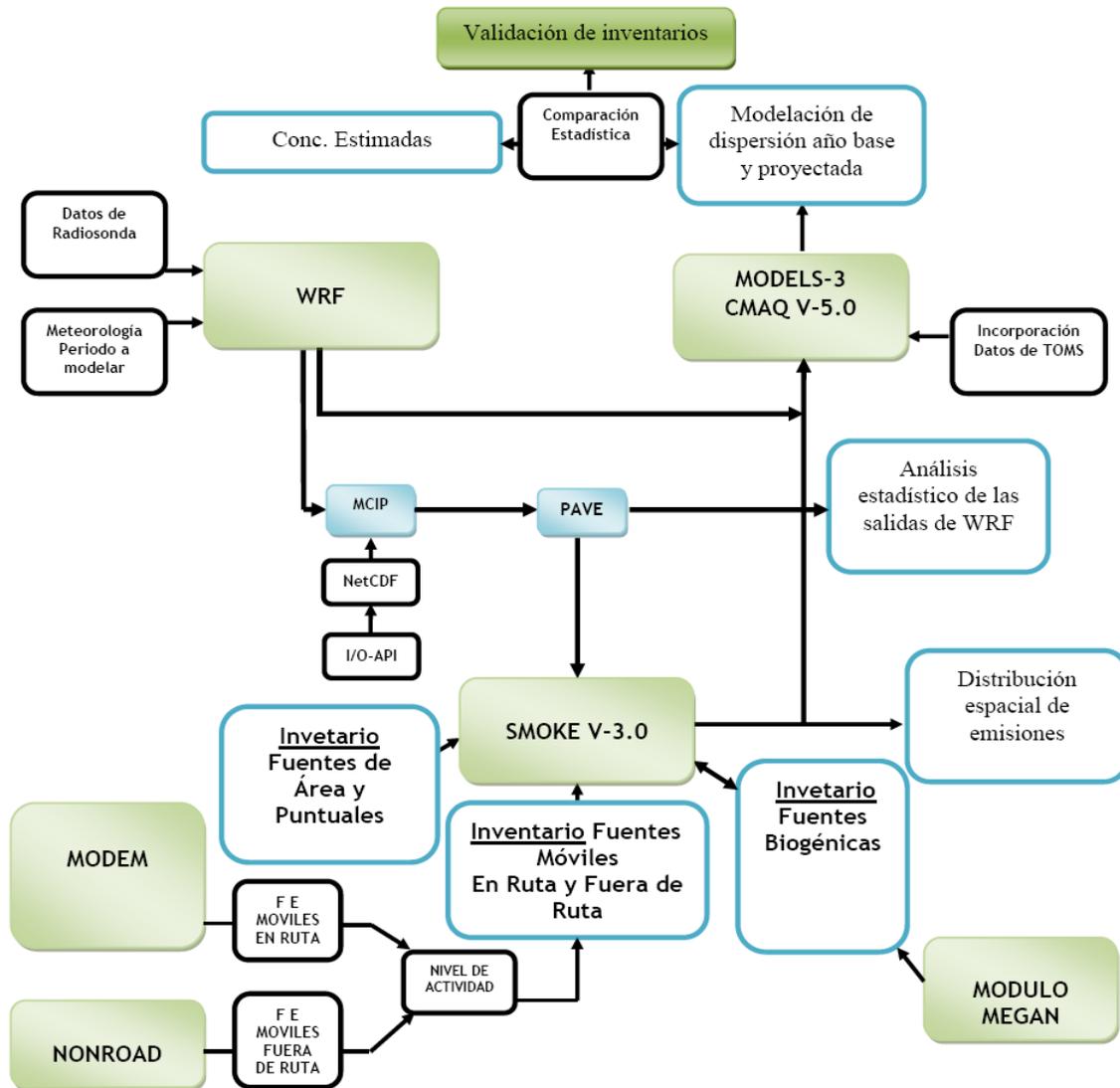


Figura 2. Protocolo de Modelación Fotoquímica.

b) Alcance del modelo

Modelación Meteorológica:

La modelación meteorológica se realizó utilizando WRF (Weather Research and Forecasting Model, por sus siglas en inglés) en base a los criterios y recomendaciones establecidos por la US EPA (Guidance on the Use of Models and Other Analyses for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM2.5, and Regional Haze,

2007), utilizando el Cluster de la Universidad de Tennessee (117 nodos) y el Cluster de la Universidad Católica de Temuco (8 nodos), cabe destacar que actualmente en el país no existe una capacidad de cómputo superior, permitiendo de este modo el adecuado cumplimiento de los objetivos planteados.

Esquema de funcionamiento del modelo meteorológico WRF

En términos esenciales, el modelo WRF consta de tres módulos principales, WPS, WRF-Var y ARW-WRF, tal como se aprecia en el esquema de la Fig. 3 (esta figura adaptó la información tomada del manual del usuario de WRF).

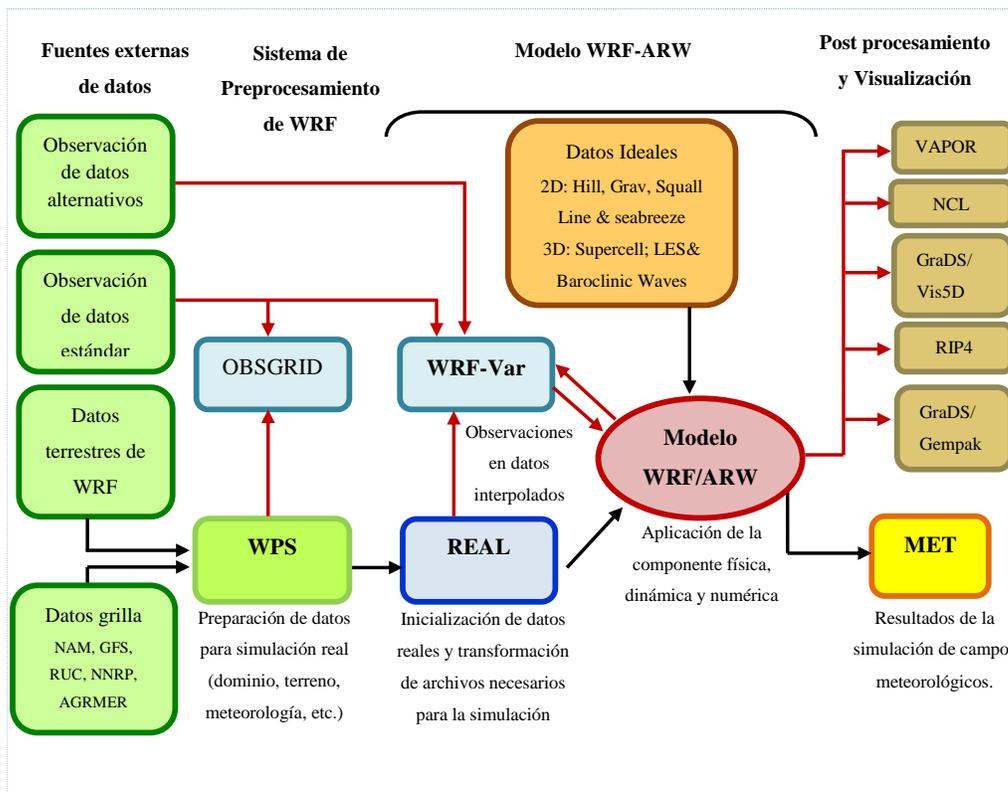


Figura 3. Esquema de Funcionamiento Modelo WRF.

Modelo de Procesamiento de Inventarios y Modelo Fotoquímico

Para el caso del modelo de procesamiento de emisiones SMOKE, las bases de datos con las que se contó para el estudio, fueron preparadas y transformadas a un formato compatible con los requerimientos de entrada del modelo. Para aquellas fuentes de emisión que

requirieron georreferenciación previo a su uso como datos de entrada en SMOKE, se elaborarán estos archivos bajo plataforma SIG (ArcView, ArcGIS). Las salidas entregadas por SMOKE correspondieron a un formato compatible con CMAQ, permitiendo un acoplamiento sin previa transformación de los datos obtenidos.

Finalmente, CMAQ que procesa la información proveniente de WRF y SMOKE no requiere de un tratamiento previo a su ejecución, esto por las características de acople que existe entre estos modelos, lo que permite una lectura directa de la información obtenida por estos modelos.

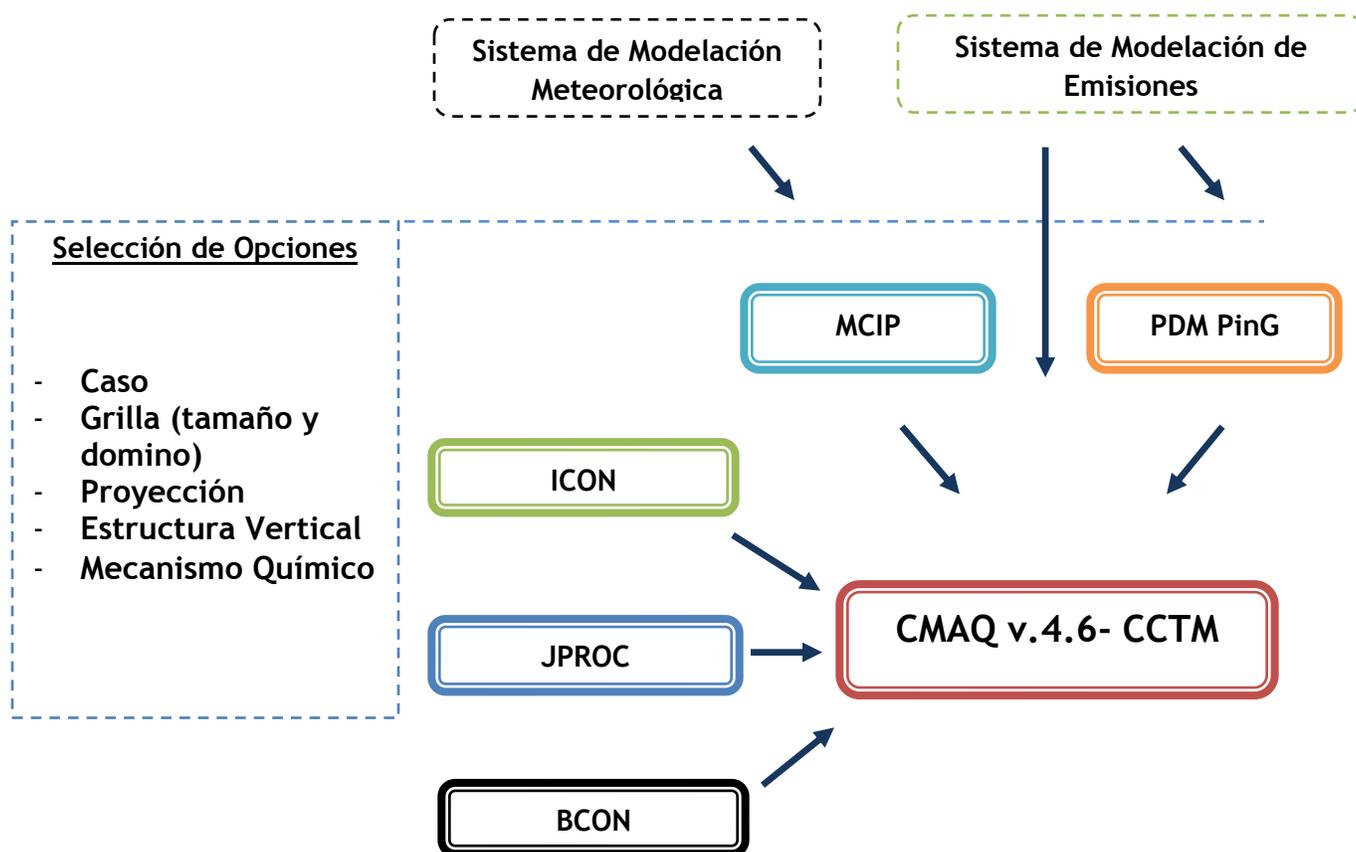


Figura 4. Esquema de Funcionamiento Modelo CMAQ.

El modelo CMAQ cuenta con cuatro módulos de preprocesamiento, BCON que entrega las condiciones de borde para el dominio de modelación, ICON que entrega las

condiciones iniciales (concentraciones) y JPROC que calcula la radiación respecto de una base de datos interna del modelo., finalmente y habiendo procesado los modulos previos se ejecuta CCTM que es el encargado de hacer la modelación fotoquímica utilizando para ello diversos mecanismos que serán variados respecto de los contaminantes a modelar, en particular se realizarán todos los cambios en la estructura necesarios para permitir las reacciones de formación de SO₂ y Material particulado fino y grueso.

c) Resolución espacial (grillas) del modelo a utilizar (resolución 5x5 km o menor)

Con WRF se determinó la grilla de modelación, respecto al cual se trabajaron 2 dominios, uno a escala sinóptica y uno anidado (mesoescala), lo cual evita las condiciones de borde. Se realizó un análisis de la complejidad meteorológica y topográfica de cada área, el nivel de detalle requerido, los recursos computacionales disponibles y, la calidad, precisión y cobertura de las bases de datos disponibles para las área de estudio (inventarios de emisiones, datos de estaciones de monitoreo y datos meteorológicos). Lo anterior tomando en cuenta que toda modelación debe contar con información apropiada de los datos de entrada que permita una mejor evaluación de los impactos de las fuentes de emisión y distinguir los efectos de una gama de opciones de estrategias de control.

d) Información de base utilizada

En primer lugar, mediante la utilización de WRF se elaboraron escenarios de campos de vientos que sirvieron de base para el entendimiento de la meteorología asociada a los episodios de mayor concentración de contaminantes en la atmósfera, además de todas las variables meteorológicas necesarias para la modelación fotoquímica. Para el buen funcionamiento del modelo meteorológico, se recopiló, con la ayuda de la contraparte, toda la información necesaria para la correcta aplicación de las herramientas de modelación. En particular, la meteorología de superficie (estaciones monitoras), y bases de datos meteorológicas para validación.

2.3 Resultados de modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos de las 7 fundiciones de cobre de Chile.

A continuación se describe un análisis asociado al comportamiento de la pluma contaminante proveniente de las 7 fundiciones presentes en el área de estudio. Se consideró el uso de imágenes espaciadas cada 6 horas con el fin de poder caracterizar con la mayor representatividad posible los desplazamientos del SO₂ y MP2.5 sobre ambos dominios de modelación.

Los datos de entrada utilizados para el caso base del año 2008, fueron determinados a partir de información disponible en el inventario de emisiones correspondiente a dicho año, y otros datos disponibles en el RETC, y en el estudio de COPRIM.

Tabla 5. Emisiones de SO₂ y MP2.5 para cada Fundición de Cobre (Ton/año), de acuerdo a porcentaje (%) de captura estimado para el escenario base del año 2008.

Fundición	% Captura	Emisiones de SO ₂			Emisiones de MP2.5		
		Globales	Chimenea	Fugitivas	Globales	Chimenea	Fugitivas
Chuquicamata	88,6	89.339	27.265	62.074	6.994	2.652	4.342
Altonorte	92,6	59.848	15.411	44.437	9.603	4.040	5.562
Paipote	86,0	32.152	9.773	22.379	600	484	116
Potrerosillos	76,4	102.703	21.374	81.329	6.084	3.348	2.735
Ventanas	89,2	29.497	1.956	27.541	680	597	84
Chagres	95,9	15.675	1.872	13.803	830	194	635
Caletones	84,3	139.864	23.624	116.241	3.321	551	2.770

Fuente: Elaboración propia

Dominio de modelación 2.

Concentraciones de SO₂

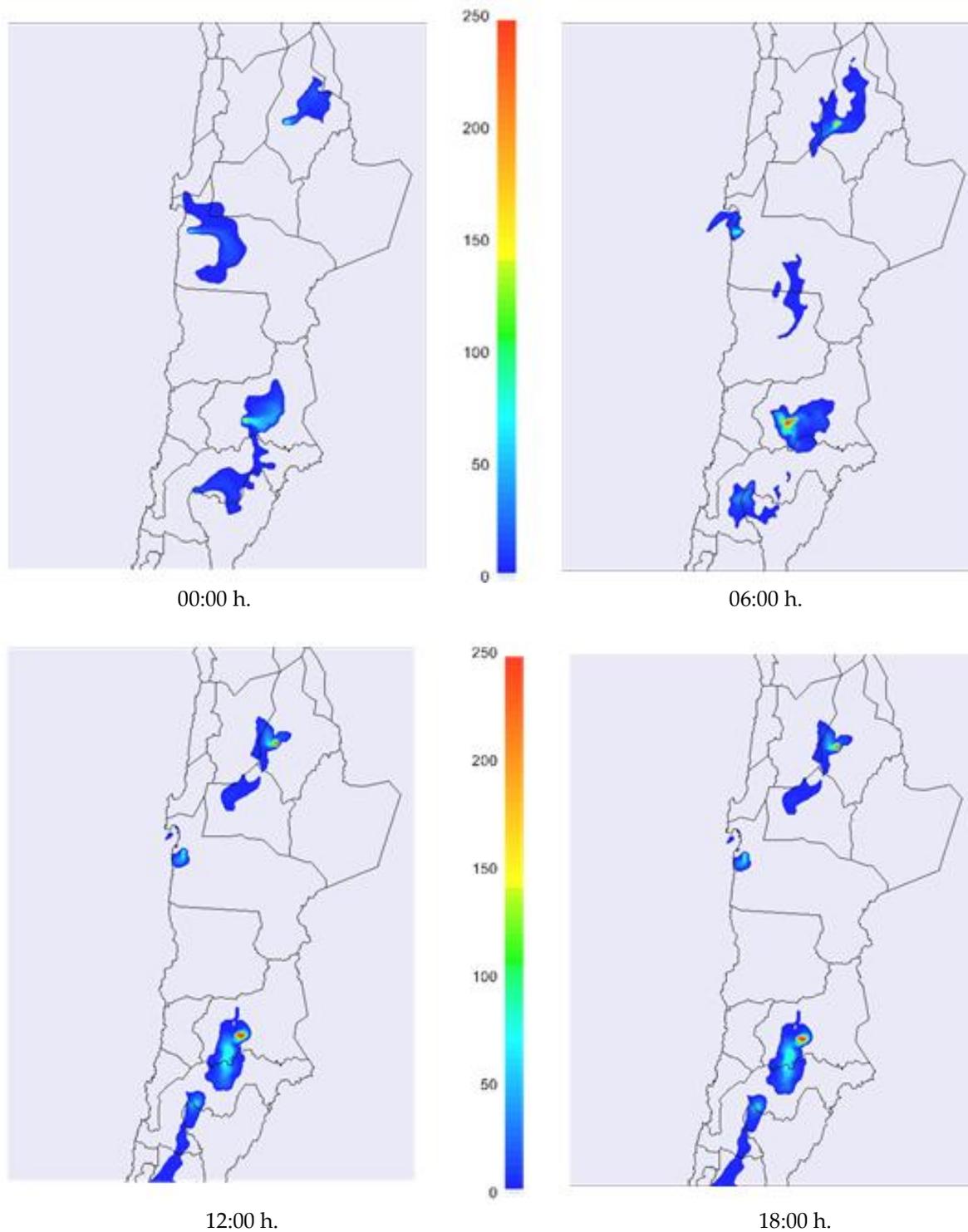


Figura 5. Comportamiento diario de las Concentraciones de SO₂ (µg/m³). Enero 2008.

Concentraciones de MP2.5

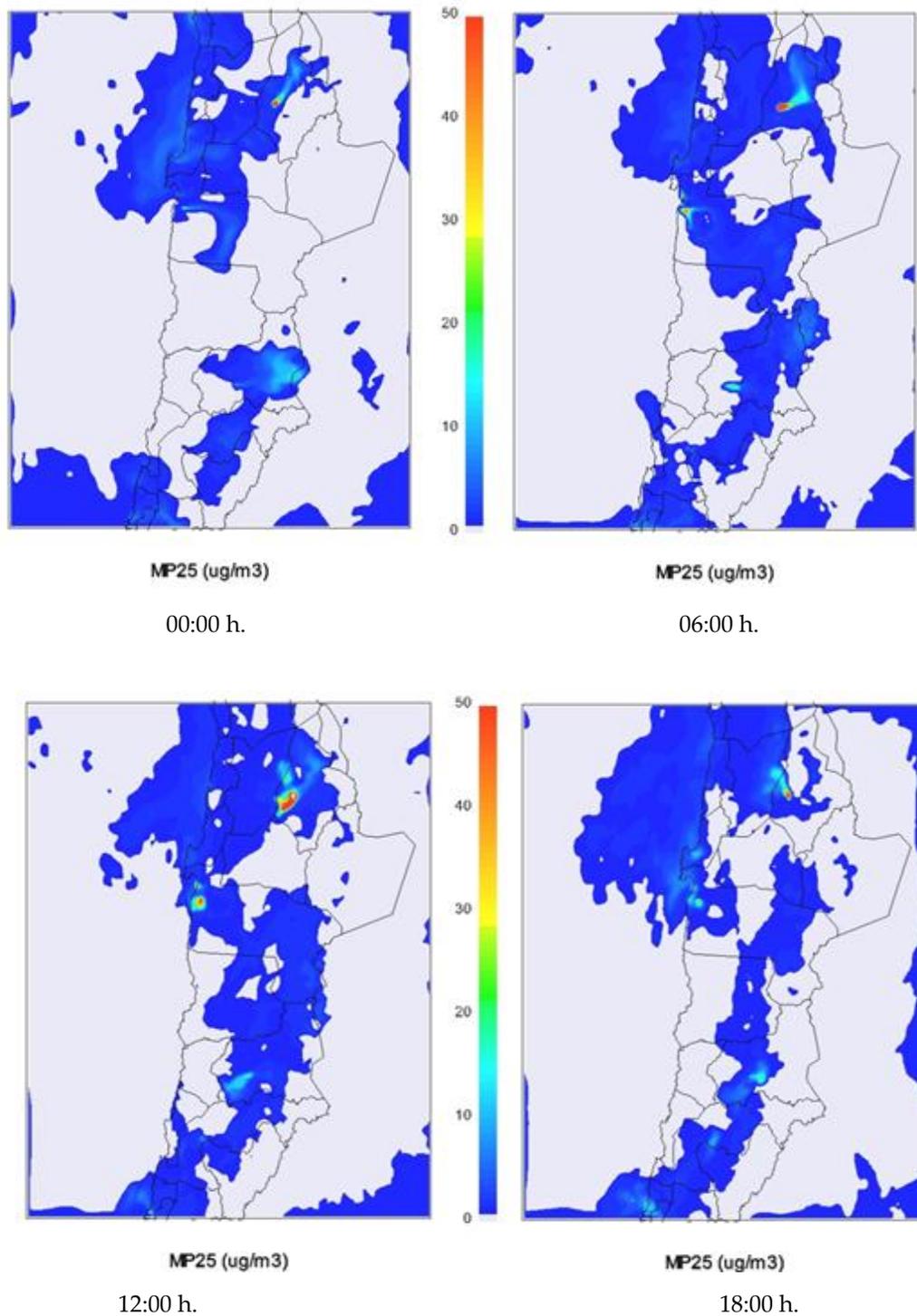


Figura 6. Comportamiento diario de las Concentraciones de MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
Enero 2008.

Una perspectiva general de las concentraciones observadas en el dominio de modelación 2, que incluye las fundiciones de Chuquicamata, Alto Norte, Potrerillos y Hernan Videla Lira (HVL), da cuenta de la poca interacción que existe entre las plumas contaminantes de las 4 fundiciones, dejando de manifiesto que las distancias involucradas juegan a favor de una manifestación local de los efectos.

En términos de dispersión, para el periodo nocturno se observa un comportamiento similar en la dirección de la pluma de SO₂ para todas las fundiciones, siendo la dirección Este, la más marcada. Para el periodo diurno la dirección de la pluma tiene una inclinación Sur, con presencia de "Hot Spot" con concentraciones superiores a 250 µg/m³, en las proximidades de las Fundiciones de Chuquicamata y HVL (radio inferior a 8 km.). La modelación de la pluma de Alto Norte da cuenta de una condición de ventilación desfavorable, puesto que no existe una tendencia clara en la dirección.

Para el caso de las concentraciones de PM_{2.5} es posible observar para todo el periodo de modelación una concentración baja, no superándose en ningún caso la normativa de 50 µg/m³. En el dominio se observan además aportes de concentraciones de la condición de borde, y sales marinas.

Influencia de SO₂ sobre ciudades del dominio

Retomando el análisis mostrado al inicio de la página, en atención a una influencia más bien local de las emisiones de SO₂ generadas por las fundiciones de cobre, se trabajaron imágenes a una menor escala, con el propósito de observar con una mayor resolución la influencia en sectores colindantes. Esto, ya que para el Dominio de modelación 2, existen importantes asentamientos urbanos que están a una distancia relativamente corta de la fuente emisora.

Se utilizó una escala de 0 a 50 µg/m³, en un periodo de tiempo de 1 hora.

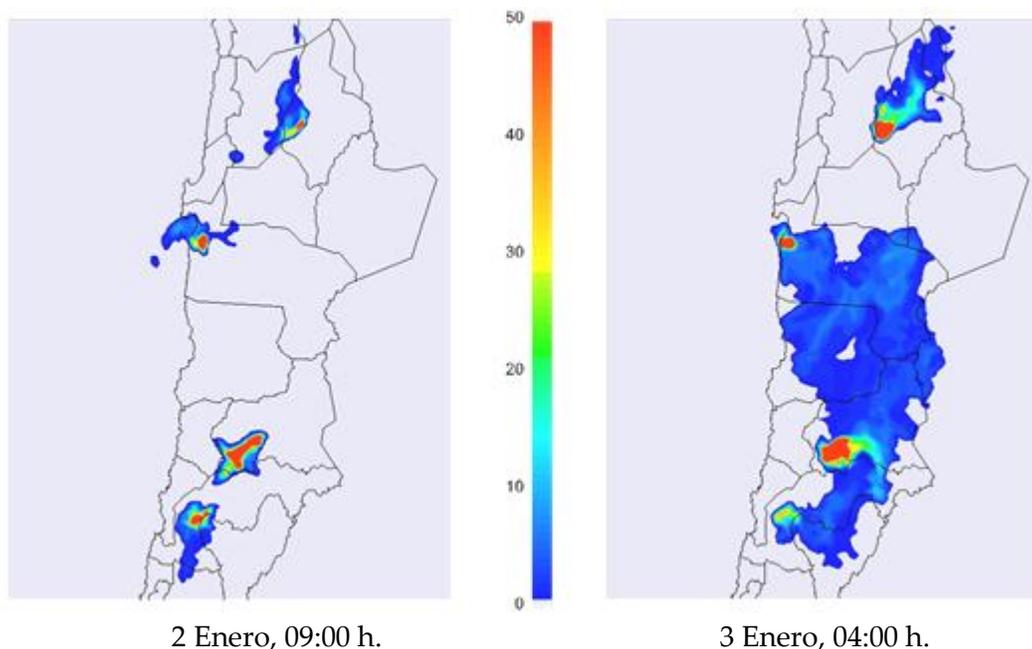


Figura 7. Influencia de la pluma de SO₂ (µg/m³) en las concentraciones de sectores ubicados en la corriente de transporte. Enero 2008.

Para el análisis, se debe tener en consideración que por ejemplo, la ciudad de Calama se encuentra a una distancia aproximada de 15 km. al Sur de la Fundición de Chuquicamata, dejándola expuesta a concentraciones importantes de SO₂, lo cual queda en evidencia en ambas imágenes.

La Fundición Alto Norte, se encuentra a una distancia aproximada de 20 km. al Sur-Este de Antofagasta, quedando expuesta a las emisiones de SO₂ generadas por esta fuente. La Fundición de Potrerillos se ubica a 60 Km de Diego de Almagro y a 115 km. al Este de Chañaral, dejando un mayor impacto sobre Diego de Almagro. HVL se ubica a 5 km de Copiapó y a la misma distancia de Tierra Amarilla.

Dominio de modelación 3.

Concentraciones de SO₂

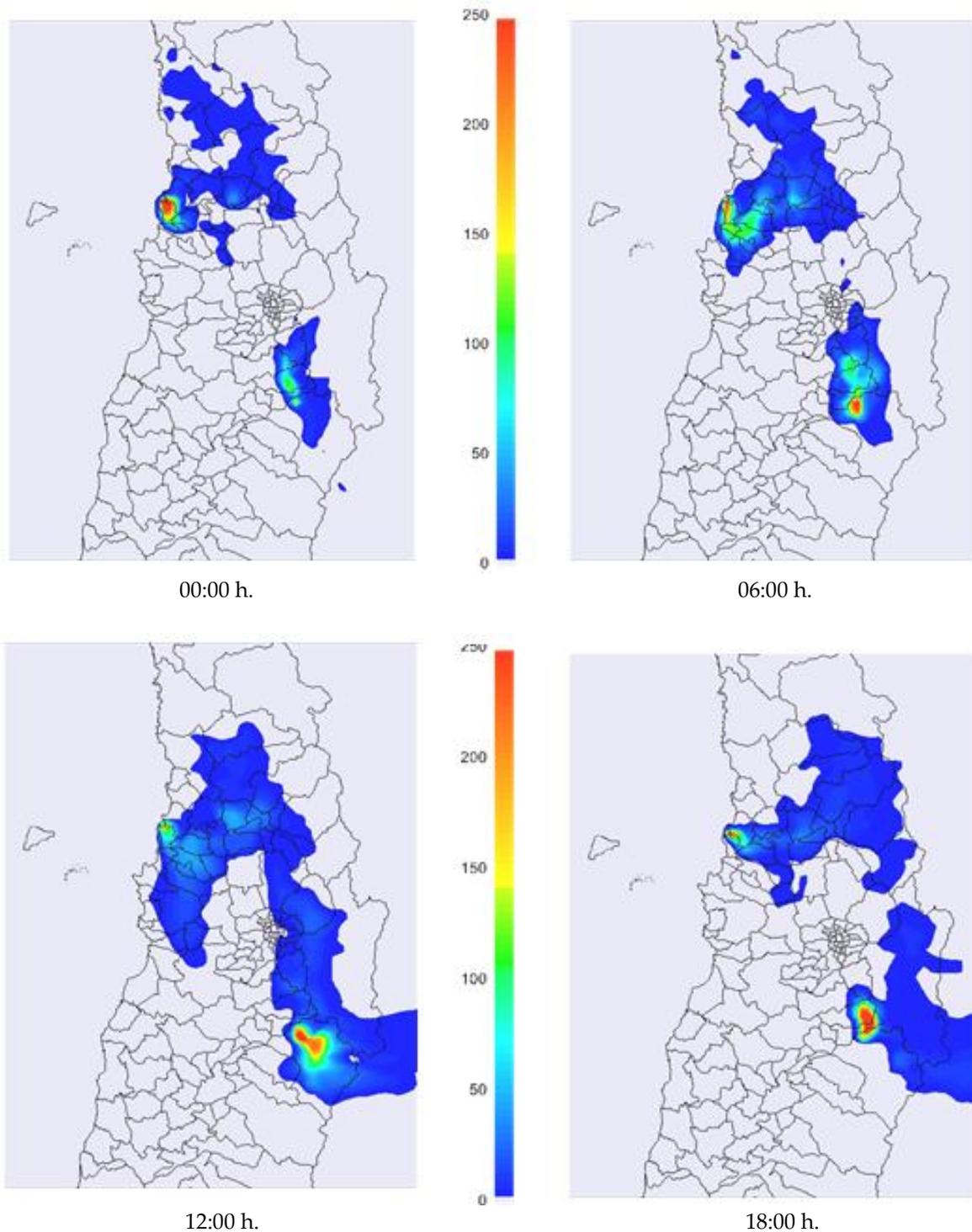


Figura 8. Comportamiento diario de las Concentraciones de SO₂ (µg/m³). Enero 2008.

Concentraciones de MP2.5

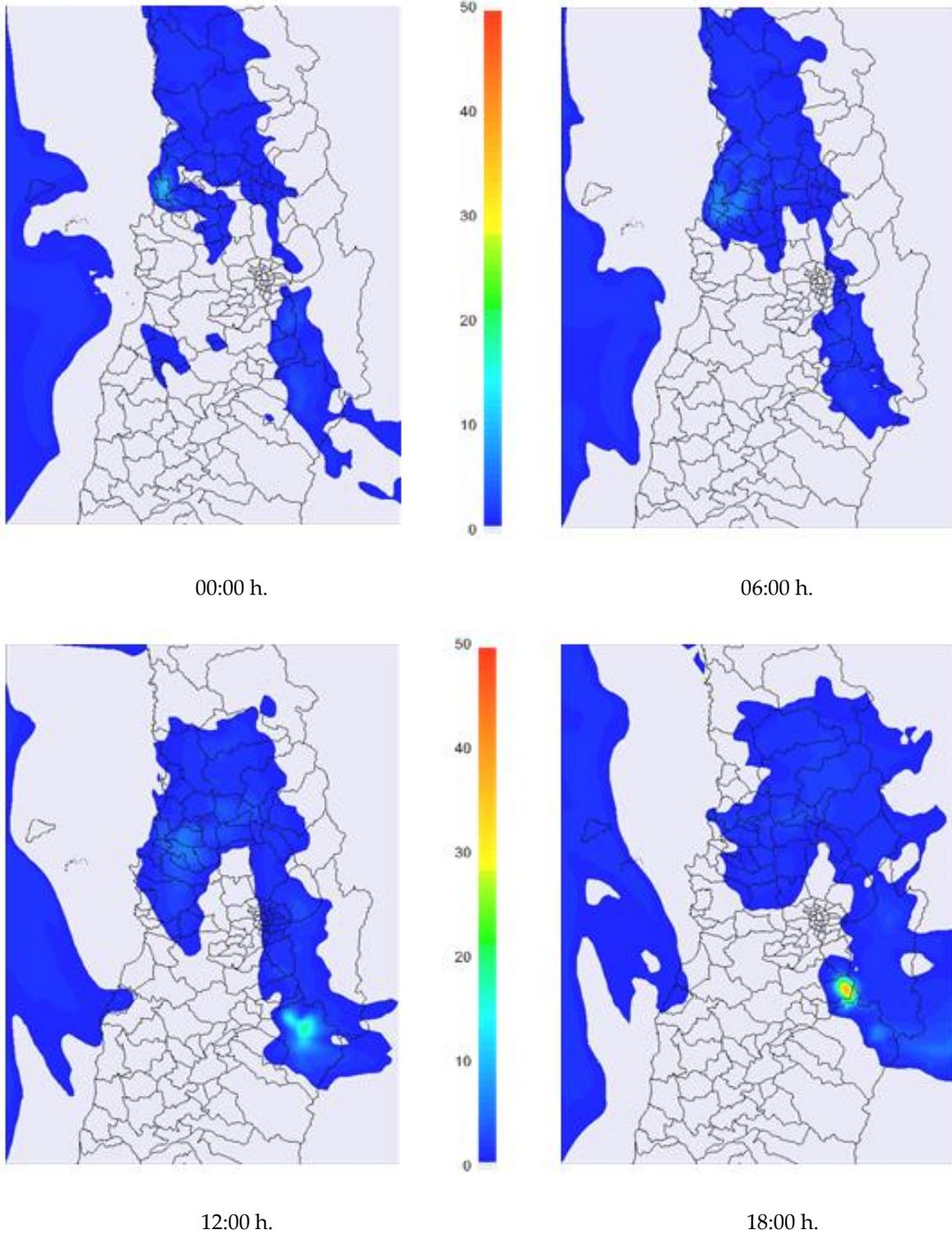


Figura 9. Comportamiento diario de las Concentraciones de MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

A diferencia de lo observado en el Dominio de modelación 2, para el caso del Dominio de modelación 3 se observa una mayor interacción de las plumas contaminantes de las diferentes Fundiciones, principalmente entre Chagres y Ventanas, por la cercanía de las fuentes. Esto puede repercutir de diferentes maneras, siendo la más importante la formación de contaminantes secundarios. Sin embargo, cabe destacar que en esta modelación no se incorporaron todas las fuentes de emisiones, en particular no se incorporaron las fuentes móviles, las biogénicas y las fuentes de área. Esta decisión tomada en conjunto con la contraparte técnica de no considerar todas las fuentes de emisión, genera mayor nivel de incertidumbre en la formación de contaminantes secundarios, tal es el caso del MP2.5 secundario (Sulfatos y nitratos de amonio y aerosoles orgánicos secundarios).

Al observar el comportamiento se advierten situaciones de impactos contrapuestos, ya que por un lado, en el periodo nocturno las emisiones tienen una menor dispersión, que atenta contra los niveles de calidad del aire de la zona circundante a cada punto de emisión, no producen arrastres importantes de contaminantes hacia zonas alejadas. Por otra parte, para el periodo diurno se aprecia una mayor dispersión de cada pluma, alcanzándose una mayor interacción entre las distintas fuentes, lo que provoca en primer lugar la posibilidad de formación de contaminantes secundarios, y en segundo la posibilidad de que estos se trasladen hacia zonas más alejadas, llegando incluso a la región metropolitana.

El caso del MP2.5, se observa un comportamiento similar de la pluma al del SO₂, sin embargo las concentraciones no superan la normativa diaria para el contaminante, destacando solo las concentraciones en Caletones. Cabe destacar que mayores concentraciones de MP2.5 se pudieran generar si la mayoría de las fuentes de emisión de material particulado y sus precursores se incorporan al inventario de emisiones.

Influencia de SO₂ sobre ciudades del dominio 3.

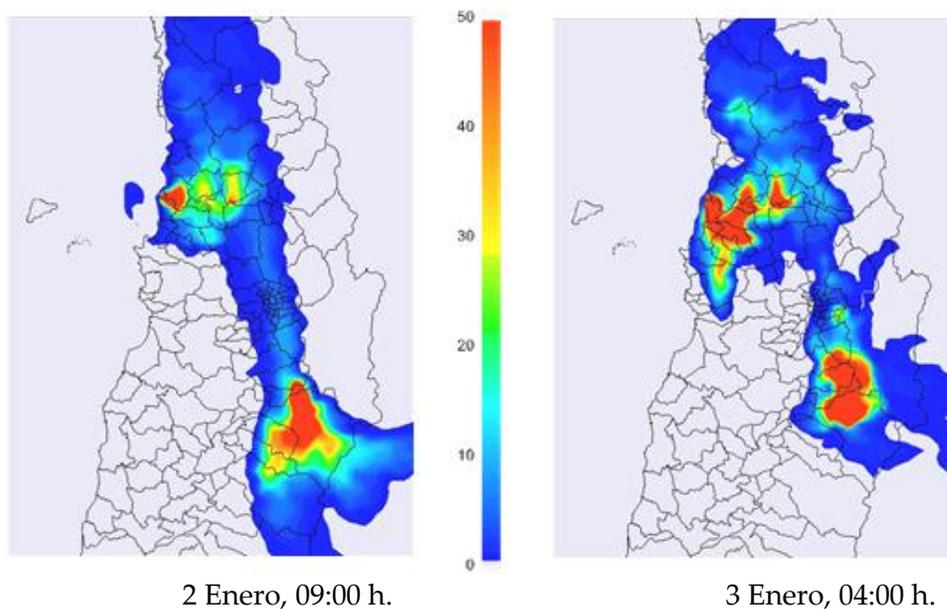


Figura 10. Influencia de la pluma de SO₂ (µg/m³) en las concentraciones de sectores ubicados en la corriente de transporte. Enero 2008.

Al disminuir la escala de proyección para las concentraciones de SO₂, es posible observar con mayor claridad las interacciones e influencias de las fundiciones del dominio 3, sobre centros poblados de interés. Trascendental es la marcada influencia de Caletones sobre Santiago, observándose concentraciones que claramente dan cuenta de un efecto sobre la calidad del aire de la Capital. Es importante mencionar que dicho efecto no se observa de manera continua, pero sí existen días del periodo de modelación en que existe una dispersión Norte de la pluma proveniente de Caletones que aportará al deterioro de la Calidad del Aire por SO₂. Cabe destacar que en futuras modelaciones es imprescindible incluir en el inventario de emisiones todas las fuentes de contaminantes criterio, especialmente para analizar y evaluar el aporte de contaminantes secundarios,

Se observa además un importante radio de influencia de Caletones sobre la calidad del aire de Rancagua y otros centros poblados, con un aporte a las concentraciones sobre 50 µg/m³.

Tanto Chagres como Ventanas muestran una influencia sobre la concentración del contaminante de la quinta región, observándose influencias sobre ciudades como Viña del Mar, Valparaíso y Los Andes, además de otros centros poblados de la quinta región.

3. Validación del modelo de dispersión para el escenario base.

3.1 Validación de la modelación obtenida

Por medio de las concentraciones observadas en la red de monitoreo de calidad del aire, ubicadas en puntos cercanos a cada una de las fundiciones, y por otro lado, utilizando los datos obtenidos de la modelación, fue posible proyectar la capacidad de ajuste del modelo y su desempeño para simular condiciones reales.

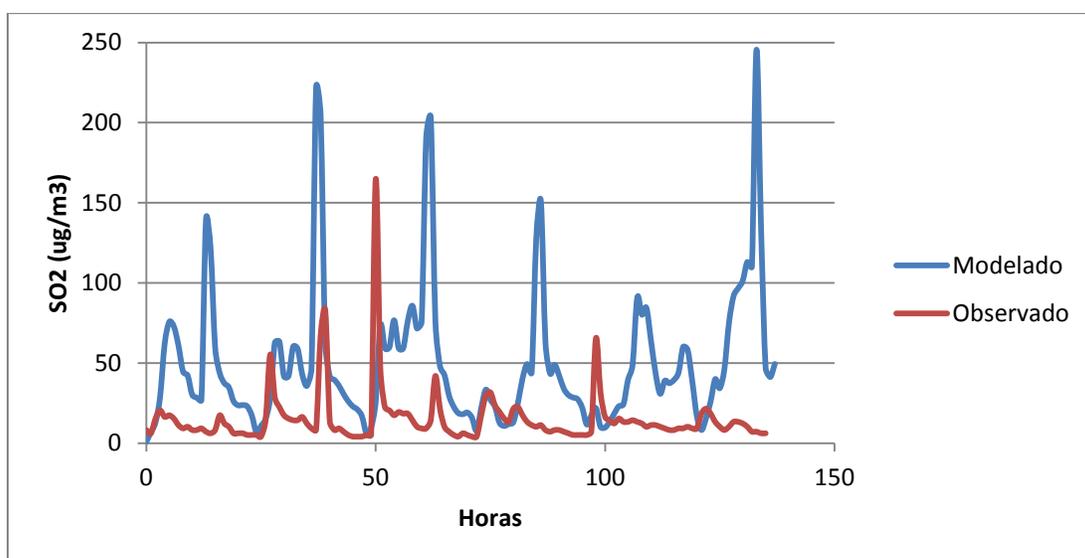


Figura 11. Curvas de ajuste-respuesta de resultados horarios de concentración de SO₂ modelados, contra datos observados (µg/m³). Estación La Greda.

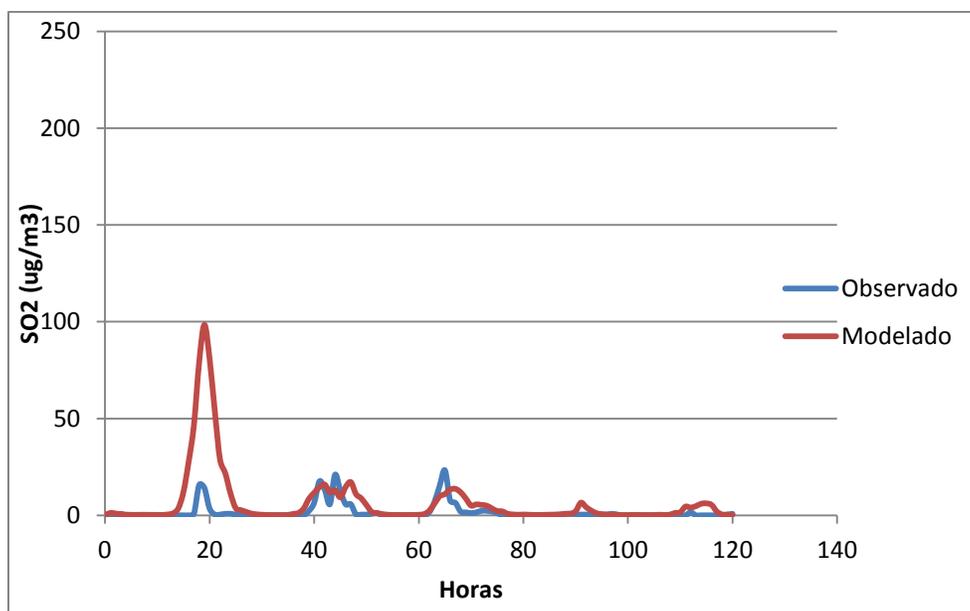


Figura 12. Curvas de ajuste-respuesta de resultados horarios de concentración de SO₂ modelados, contra datos observados (µg/m³). Estación Cauquenes.

Al observar el ajuste de las concentraciones de SO₂ observadas y modeladas, es posible apreciar que el modelo en general, sobrestima las concentraciones de SO₂, teniendo una tendencia similar en algunos periodos, lo anterior da cuenta de una sobrestimación de las emisiones del contaminante, un posible inadecuado perfil temporal de las emisiones para la fuente en estudio, debido a la inexistencia de un perfil que represente fielmente la realidad de la operación de la fundición, y finalmente, el modelo sobre estimó los niveles de SO₂ porque no se incluyeron fuentes de emisiones que permiten reflejar la formación secundaria de contaminantes. Para el caso del SO₂, es importante incorporar fuentes que emiten amonio y fuentes biogénicas; esos químicos reaccionan con sulfatos y por lo tanto, el modelo genera menores concentraciones de SO₂.

El caso del perfil diario da cuenta de un acercamiento entre ambos valores, existiendo una brecha menor, sin embargo la concentración modelada sigue siendo superior al valor observado.

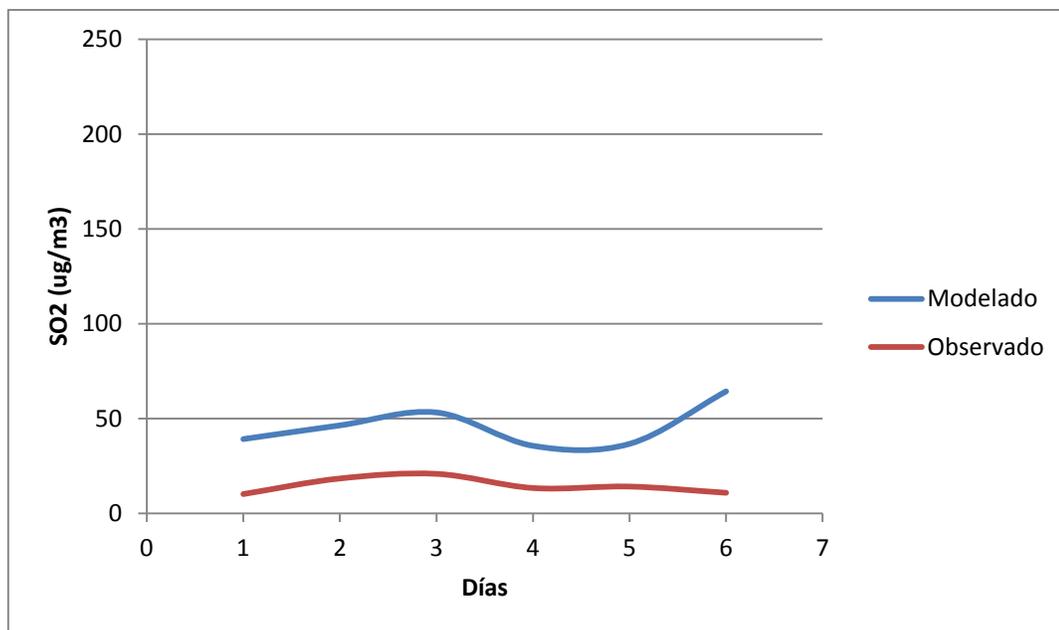


Figura 13. Curvas de ajuste-respuesta de resultados diarios de concentración de SO₂ modelados, contra datos observados (µg/m³). Enero 2008. Estación La Greda.

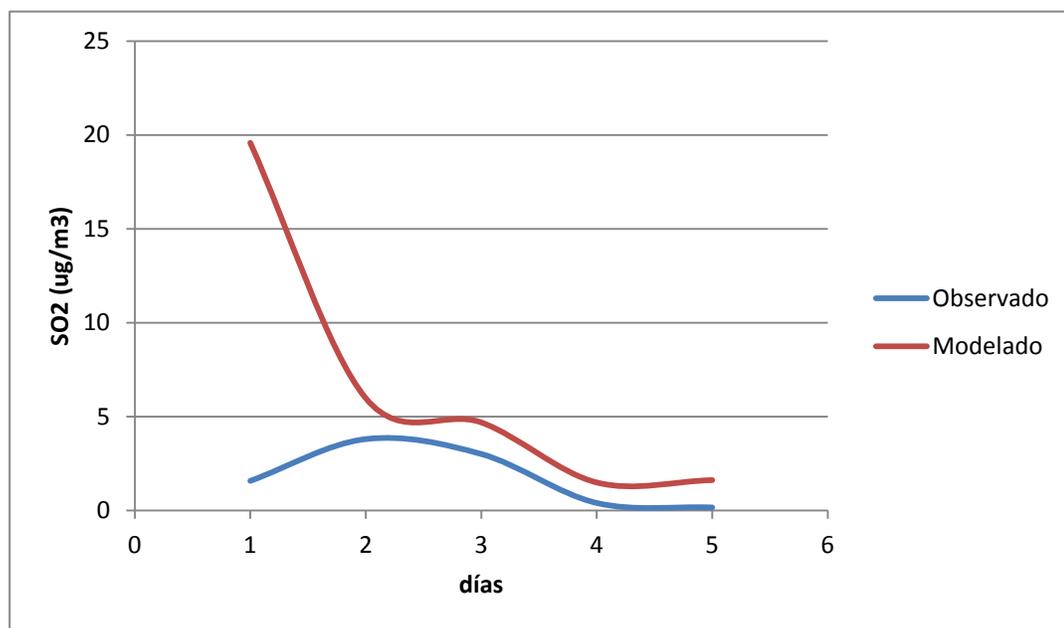


Figura 14. Curvas de ajuste-respuesta de resultados diarios de concentración de SO₂ modelados, contra datos observados (µg/m³). Enero 2008. Estación La Greda.

Para el caso del PM2.5 existe en general una diferencia importante entre los valores observados y los modelados (25 ug/m3 promedio 24 hrs.), esto debido a las características del contaminante, el cual no solo es emitido directamente desde las fuentes sino que es formado por acción de otros compuestos. Para el caso de esta modelación se han considerado las fuentes puntuales de toda el área de estudio, más las fundiciones. Sin embargo, no se incluyeron fuentes tan importantes como las fuentes móviles, biogénicas y las de área.

3.2 Metodología de ajuste de datos observados vs simulados, e intervalo de confianza de los resultados.

Los modelos de calidad del aire son valiosas herramientas de gestión. Ellos estiman las concentraciones de contaminantes en muchos sitios y el número de esos sitios en un modelo supera con creces el número de monitores de una red de monitoreo de calidad del aire típica. Por lo tanto, la integración de metodologías avanzadas de modelación es muy potente para la gestión de la calidad del aire, aportes en políticas públicas y antecedentes para elaboración de normas, principalmente para analizar los escenarios de emisiones, las nuevas estrategias y los efectos futuros de crecimiento en un área espacial más amplia. Sin embargo, siempre existe incertidumbre en este tipo de modelaciones. En efecto, los modelos de calidad del aire son herramientas robustas para predecir el destino y concentración de los contaminantes después de su liberación a la atmósfera. La dispersión se controla por la turbulencia en la capa límite de la atmósfera. Debido a que la turbulencia es aleatoria por naturaleza, no se puede predecir con precisión por medio de los modelos básicos de estadística. Por lo tanto, hay una variabilidad espacial y temporal que se produce naturalmente en el área de estudio observada que podría generar incertidumbres en los modelos de calidad del aire. La incertidumbre en el modelo también puede ser debido a posibles errores en los datos de entrada, tales como inventarios de emisiones, perfiles temporales de las emisiones, las condiciones de borde e iniciales, etc. Toda esta incertidumbre y aleatoriedad hacen que un modelo de calidad del aire no sea perfecto, y por lo tanto, siempre hay un ruido que no se puede eliminar. El desarrollo de un procedimiento consistente para la evaluación de la incertidumbre sigue siendo un reto para la comunidad científica.

La modelación de la calidad del aire de SO₂ y MP2.5 puede utilizarse para evaluar el impacto de los cambios en las contribuciones relativas de diferentes escenarios de

emisiones en las fundiciones de cobre de Chile. Tal evaluación puede ser útil en establecer prioridades regulatorias y el mejoramiento de la toma de decisiones en un área que aún tiene una gran brecha para reducir emisiones contaminantes. Las contribuciones relativas de diferentes escenarios de emisiones permiten establecer que el nivel de incertidumbre afecta de la misma manera y magnitud a todos los escenarios que se analizaron en este estudio y que se compararon al escenario base. En otras palabras, aunque el desempeño del modelo no fue tan bueno para el caso base, es posible establecer que los resultados son confiables considerando las contribuciones relativas de los diferentes escenarios de emisiones que se estudiaron.

4. Estimación de los efectos en la concentración ambiental de SO₂ y MP2.5, según escenarios normativos de reducción de emisiones de fundiciones de cobre.

4.1 Reducción de emisiones de SO₂ y MP2.5 para 3 escenarios normativos respecto del escenario base.

4.1.1 Reducción de emisiones de SO₂ y MP2.5 para Escenario 1 (95%).

A continuación se presentan los datos empleados en los escenarios de modelación correspondientes al escenario de regulación con 95% de captura de SO₂ y MP2.5 respectivamente.

Tabla 6. Emisiones de SO₂ (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 1, regulado al 95% de captura.

Fundición	Globales	Chimenea	Fugitivas	% Captura
Chuquicamata	38.768	10.909	27.860	95,0
Altonorte	34.388	9.062	25.326	95,7
Paipote	8.987	187	8.800	96,1
Potrerrillos	22.949	3.189	19.760	94,7
Ventanas	12.735	308	12.427	95,3
Chagres	15.675	1.872	13.803	95,9
Caletones	41.132	7.122	34.010	95,4

Fuente: Elaboración propia.

Notar que para la mayoría de las fundiciones, el % de captura es mayor al 95% definido para el escenario 1. Esto ocurre, ya que para el presente estudio se trabajó en alinear las emisiones del caso base, a un escenario de regulación consistente con la capacidad de producción, y tecnologías de abatimiento factibles de implementar en cada fundición. El resultado de captura definido fue determinado por el estudio desarrollado por COPRIM, 2011 “Evaluación de costos de escenarios regulatorios para una norma de emisión para fundiciones de cobre”.

Tabla 7. Emisiones de MP_{2,5} (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 1, regulado al 95% de captura.

Fundición	Globales	Chimenea	Fugitivas
Chuquicamata	3.025	1.151	1.874
Altonorte	5.522	2.323	3.199
Paipote	166	134	32
Potrerosillos	1.359	748	610
Ventanas	296	276	20
Chagres	830	194	635
Caletones	976	162	814

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Reducción de emisiones de SO₂ y MP_{2,5} para escenario 2 (97%).

A continuación se presentan los datos empleados en los escenarios de modelación correspondientes al escenario de regulación con 97% de captura de SO₂ y MP_{2,5} respectivamente.

Tabla 8. Emisiones de SO₂ (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 2, regulado al 97% de captura.

Fundición	Globales	Chimenea	Fugitivas
Chuquicamata	23.674	4.430	19.244
Altonorte	24.258	9.062	15.196
Paipote	6.924	187	6.737
Potrerosillos	13.069	3.189	9.880
Ventanas	7.822	308	7.514
Chagres	11.596	370	11.226
Caletones	25.827	7.122	18.706

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Emisiones de MP_{2,5} (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 2, regulado al 97% de captura.

Fundición	Globales	Chimenea	Fugitivas
Chuquicamata	1.835	701	1.134
Altonorte	3.887	1.635	2.252
Paipote	127	102	25
Potreriillos	776	428	348
Ventanas	191	183	8
Chagres	610	194	416
Caletones	636	115	521

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Reducción de emisiones de SO₂ y MP2.5 para escenario 3 (98%)

A continuación se presentan los datos empleados en los escenarios de modelación correspondientes al escenario de regulación con 98% de captura de SO₂ y MP_{2,5} respectivamente.

Tabla 10. Emisiones de SO₂ (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 3, regulado al 98% de captura.

Fundición	Globales	Chimenea	Fugitivas
Chuquicamata	15.814	3.555	12.259
Altonorte	15.900	9.062	6.838
Paipote	4.536	187	4.350
Potreriillos	8.623	3.189	5.434
Ventanas	5.420	308	5.112
Chagres	7.679	370	7.309
Caletones	17.410	7.122	10.288

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Emisiones de MP_{2.5} (Ton/año) por Fundición de Cobre en Escenario 3, regulado al 98% de captura.

Fundición	Globales	Chimenea	Fugitivas
Chuquicamata	1.085	612	473
Altonorte	2.311	1.458	853
Paipote	101	88	13
Potrerosillos	462	381	81
Ventanas	126	119	8
Chagres	154	58	96
Caletones	335	83	252

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Concentraciones de SO₂ y MP_{2.5} por grilla definida para el escenario base y 3 escenarios normativos.

A continuación se muestra un análisis asociado al comportamiento de las concentraciones de SO₂ y MP_{2.5} en el aire. El análisis se realiza para las 7 fundiciones de cobre mediante la identificación de las concentraciones modeladas para una grilla particular, la cual es definida según representatividad de alguna estación de monitoreo ubicada en las inmediaciones, y para la cual pudiese resultar relevante conocer el aporte a la calidad del aire, de las normas en evaluación. Los escenarios regulados son 95%, 97% y 98% respectivamente.

4.2.1 Concentraciones de SO₂

Tabla 12. Concentraciones de SO₂ y porcentajes de reducción de emisiones por grilla definida en cada Fundición de Cobre, para cada escenario regulado respecto del escenario base.

Fundición	Estación	Escenario base µg/m ³ (%)	Escenario 1 µg/m ³ (%)	Escenario 2 µg/m ³ (%)	Escenario 3 µg/m ³ (%)
Chuquicamata	San Jose	305,98	183,84 (39,9 %)	108,49 (64,5 %)	73,16 (76,1 %)
Altonorte	Inacesa	37,09	36,58 (1,4%)	36,58 (1,4 %)	36,58 (1,4 %)
Paipote	HVL	143,29	50,97 (64,4 %)	40,74 (71,6 %)	28,90 (79,8 %)
Potrerillos	Doña Inés	469,68	103,99 (77,9 %)	54,82 (88,3 %)	32,65 (93,0 %)
Ventanas	La Greda	180,03	118,84 (34,0 %)	97,38 (45,9 %)	88,55 (50,8 %)
Chagres	Catemu	51,78	49,01 (5,4 %)	38,44 (25,8 %)	27,28 (47,3 %)
Caletones	Sewell	82,72	27,14 (67,2 %)	19,64 (76,3 %)	16,48 (80,1 %)

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla se puede inferir que hay fundiciones para las cuales la normativa aplicada genera un mayor impacto. Esto es evidente, por cuanto existen fundiciones como Chagres, que cuentan con la infraestructura necesaria y configuración tecnológica, tales como una planta de ácido de doble contacto y alta eficiencia afinada. El caso contrario ocurre en Potrerillos, Caletones y Paipote, puesto que si se implementa la normativa, la brecha tecnológica de abatimiento de emisiones generaría una mayor reducción de éstas, reflejándose el efecto positivo en la reducción de las concentraciones de SO₂.

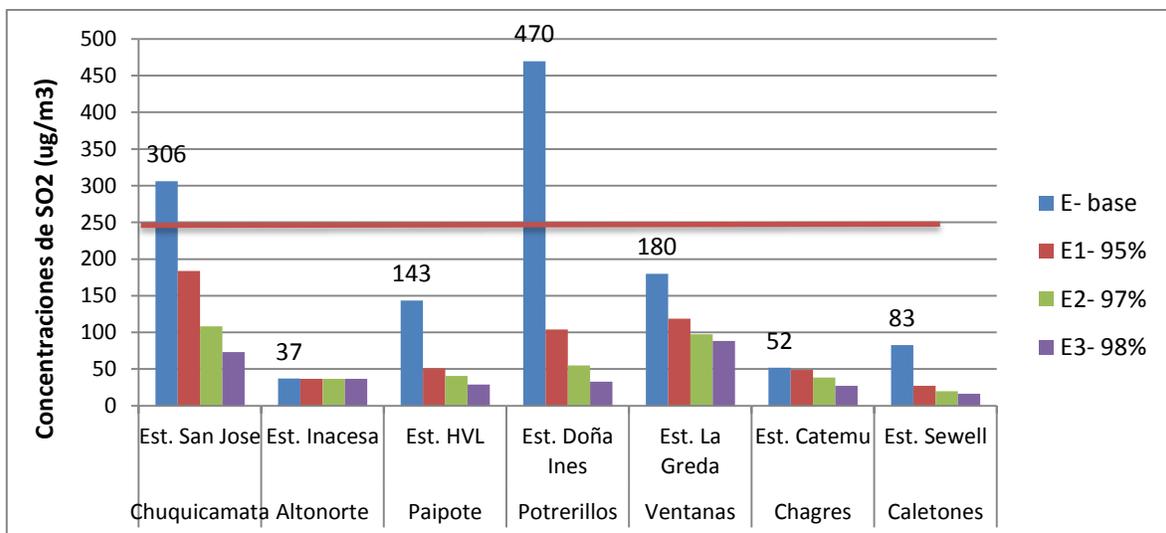


Figura 15. Concentraciones de SO₂ para escenario base y escenarios regulados.
Fuente: Elaboración propia.

Es evidente que al aplicar un 97% en la reducción de emisiones, el efecto en la reducción de concentraciones de SO₂ es importante en aquellas fundiciones con mayor brecha tecnológica de control de contaminantes, tales como Potrerillos, Caletones y Paipote. En Chuquicamata la reducción también sería importante. En el caso de Ventanas, la principal reducción se reflejaría en las emisiones fugitivas de SO₂.

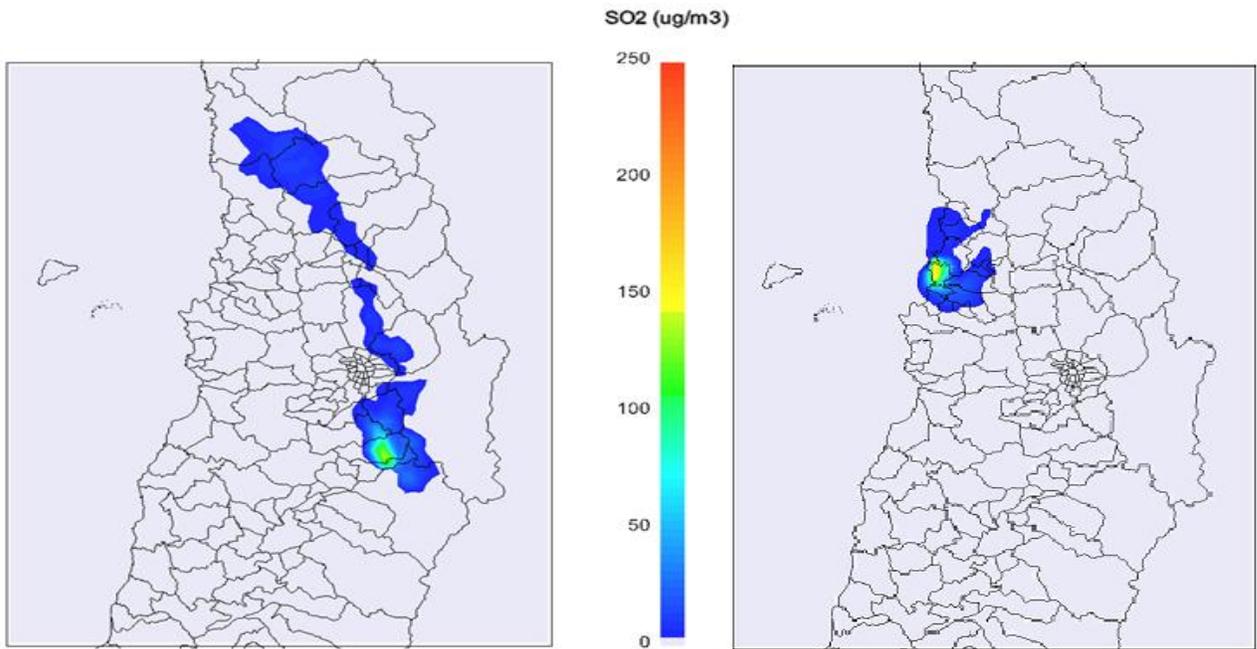


Figura 16. Concentraciones de SO₂ (µg/m³) evitadas, según escenario regulatorio de 95% en Fundiciones de Caletones y Ventanas, imagen derecha e izquierda

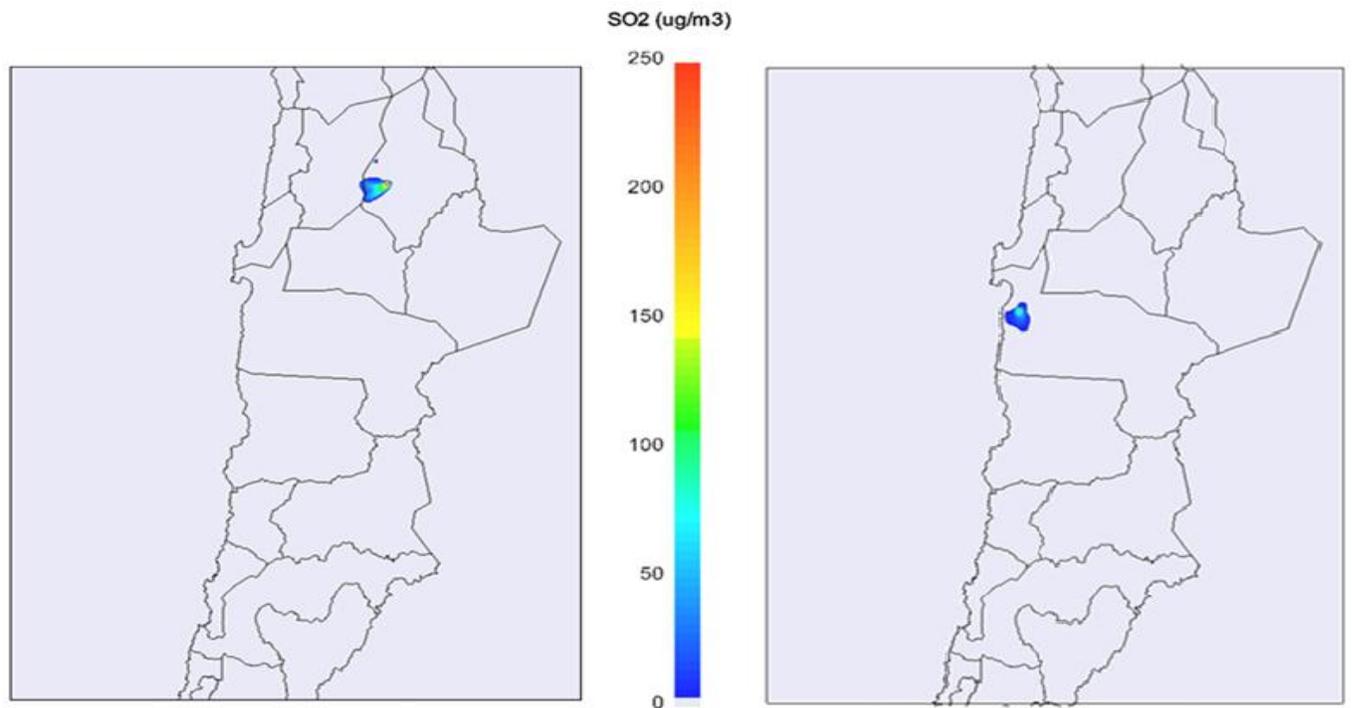


Figura 17. Concentraciones de SO₂ (µg/m³) evitadas, según escenario regulatorio de 95% en Fundiciones de Chuquicamata y Altonorte., imagen derecha e izquierda

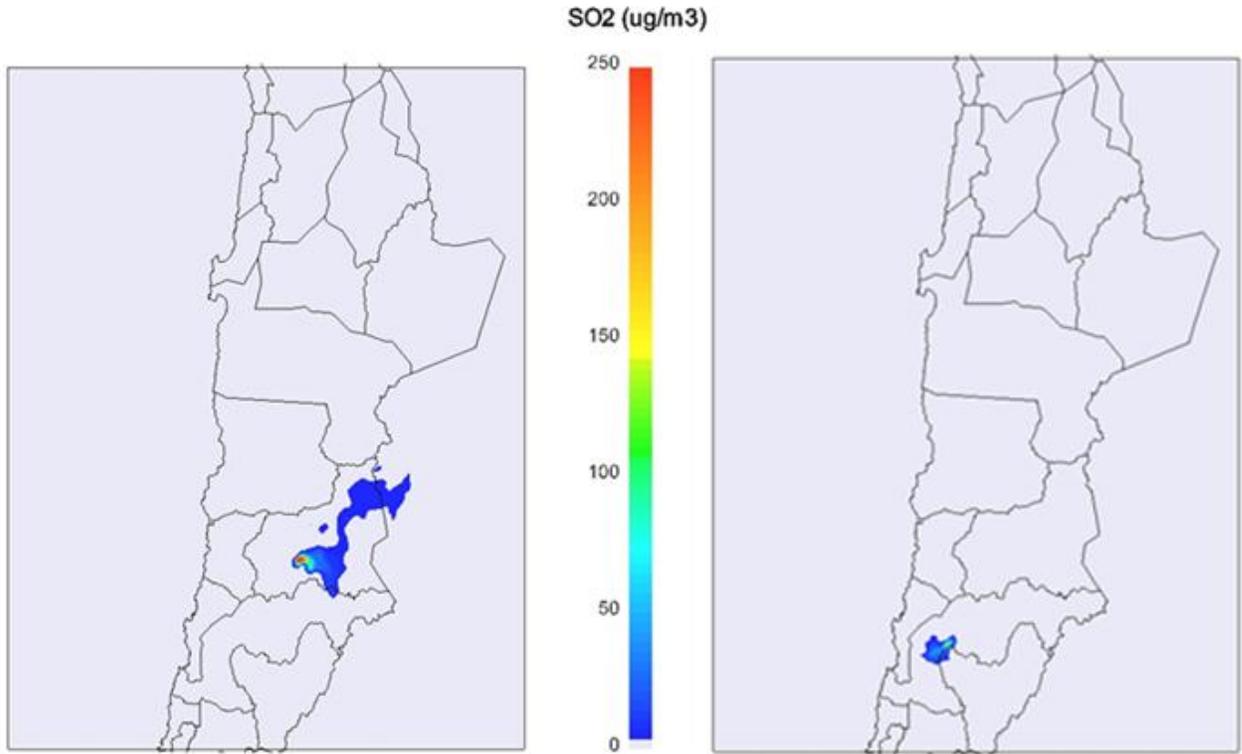


Figura 18. Concentraciones de SO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) evitadas, según escenario regulatorio de 95% en Fundiciones de Potrerillos y Paipote., imagen derecha e izquierda respectivamente.

4.2.2 Concentraciones de MP2.5

Tabla 13. Concentraciones de MP2,5 y porcentajes de reducción de emisiones por grilla definida en cada Fundición de Cobre, para cada escenario regulado respecto del escenario base.

Fundición	Estación	Escenario base µg/m ³ (%)	Escenario 1 µg/m ³ (%)	Escenario 2 µg/m ³ (%)	Escenario 3 µg/m ³ (%)
Chuquicamata	San Jose	80,69	73,44 (8,99 %)	68,12 (15,58%)	65,91 (18,32%)
Altonorte	Inacesa	6,74	4,33 (35,76%)	3,38 (49,85%)	2,64 (60,83%)
Paipote	HVL	5,29	3,71 (29,87%)	3,56 (32,70%)	2,32 (56,14%)
Potrerillos	Doña Inés	16,79	4,32 (74,27%)	2,90 (82,73%)	1,93 (88,51%)
Ventanas	La Greda	10,37	8,80 (15,14%)	8,33 (19,67%)	8,05 (22,37%)
Chagres	Catemu	5,35	5,35 (0%)	4,24 (20,75%)	3,49 (34,77%)
Caletones	Sewell	6,20	3,47 (44,0%)	2,58 (58,39%)	2,37 (61,77%)

Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar aquí la significativa reducción en las concentraciones de MP2.5 debido a las fundiciones de Potrerillos, Caletones y Altonorte, aunque en el inventario de emisiones no se incluyeron todas las fuentes que pudieran haber reflejado un mayor aporte de MP2.5 secundario.

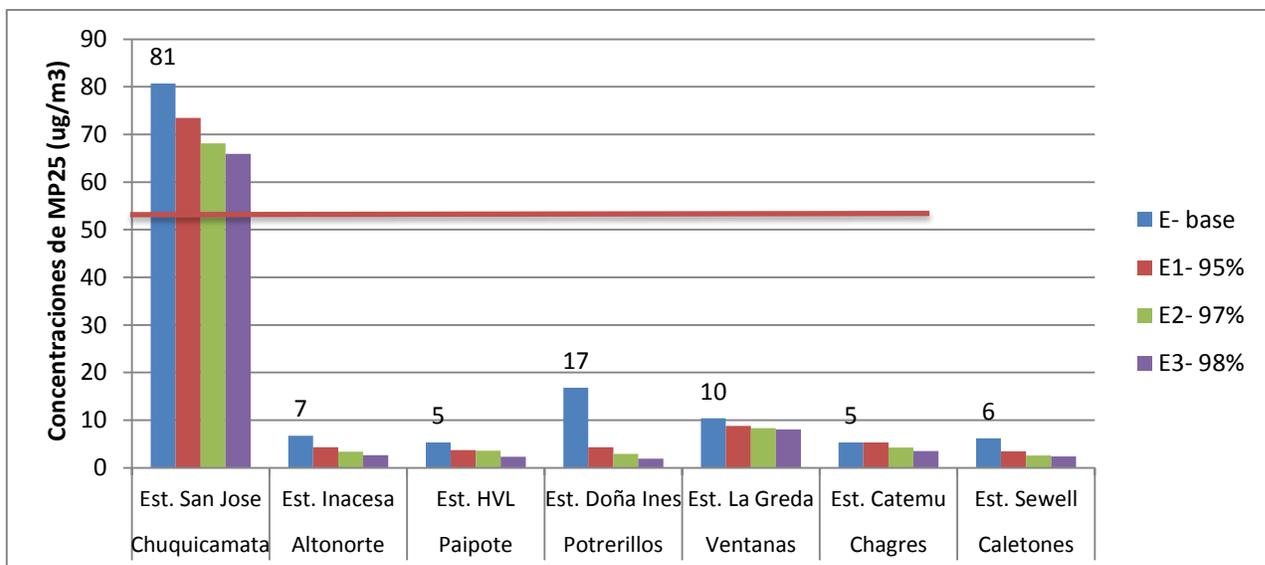


Figura 19. Concentraciones de MP2,5 para escenario base y escenarios regulados.
Fuente: Elaboración propia.

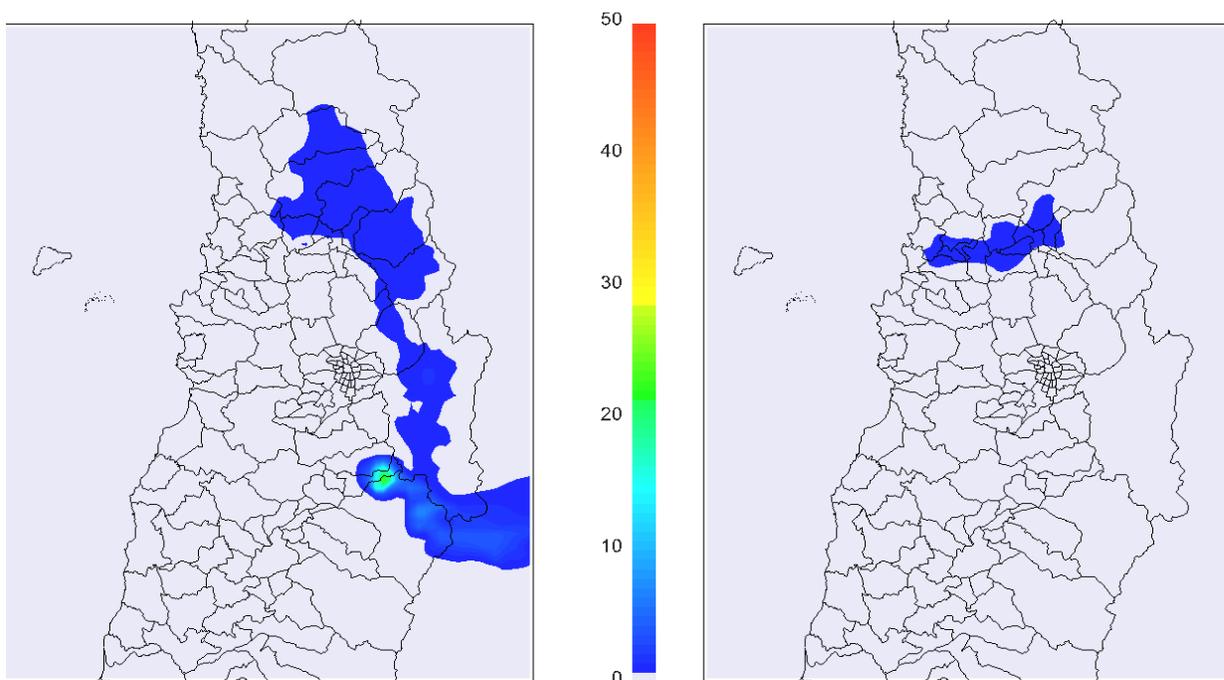


Figura 20. Concentraciones de MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) evitadas, según escenario regulatorio de 95% en Fundición Caletones. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Ventanas, imagen derecha e izquierda respectivamente.

5. CONCLUSIONES

La validación de información asociada a fundiciones de cobre, que constituye la base para la validación del modelo meteorológico y fotoquímico, no entrega garantías para el desarrollo de estudios de precisión. Esto, ya que existe disparidad en la disponibilidad de la data, existiendo por un lado una completa base de datos para el contaminante SO₂, se tiene que la data para MP_{2.5} casi no existe. Para el caso de los datos meteorológicos, hay varias estaciones que no tienen datos para el año 2008.

En relación a proyectos de esta naturaleza, que consideran modelaciones fotoquímicas, corresponde señalar que no existen bases de datos consolidadas, útiles para ser incorporadas a modelos de estas características. Esto enfrentó al equipo consultor con un importante contratiempo, que afectó seriamente el desarrollo del proyecto en los plazos inicialmente contemplados. Entre otros, dichos inconvenientes guardan relación con:

- La no disponibilidad de inventarios de emisiones en los formatos requeridos por el modelo SMOKE 3.1, debido a su especificidad para su incorporación.
- El requerimiento de un procesamiento anual para tres dominios que incorporan las regiones más densamente pobladas de Chile, se convierte en un objetivo inviable en los plazos inicialmente estipulados (3 meses).

A pesar de los inconvenientes presentados, cabe mencionar que se implementó de manera óptima el protocolo de modelación WRF/SMOKE/CMAQ, herramienta única a nivel nacional, actualmente utilizada por la USEPA para regulación y evaluación de normativa atmosférica.

Respecto del desempeño del modelo, es preciso señalar que este presentó resultados dispares, ya que las zonas costeras, representadas por estaciones de monitoreo tales como La Greda en la quinta región, el desempeño horario no permitió una correlación satisfactoria, existiendo si un ajuste en los perfiles diarios. El desempeño en zonas del interior presentó buenos ajustes, tanto en sus perfiles horarios como diarios. Respecto a la validación del desempeño del contaminante PM_{2.5}, no fue posible llevarla a cabo en el dominio 2 (norte), debido a la inexistencia de monitoreo para el contaminante para el año base modelado.

Respecto de la normativa, es posible establecer que la incorporación de escenarios para el contaminante SO₂ resultará en un cumplimiento de los límites permitidos para el caso de las fundiciones Chuquicamata y Potrerillos.

Las mayores reducciones en concentraciones de SO₂, se registran en las fundiciones Potrerillos, HVL y Caletones, puesto que el nivel de mejora en la capacidad de abatimiento requerido por normativa es sustancialmente mayor al existente en las demás plantas en estudio.

La reducción en concentraciones de MP2.5, presenta sus valores más altos en el caso de Potrerillos.

La fundición Chuquicamata a pesar de los niveles de reducción, mantiene valores de SO₂ y PM_{2.5} por sobre lo presentado por las demás fundiciones, debido a su alto nivel de producción.

Si bien Caletones, Ventanas y Chagres no poseen las emisiones más importantes, son las que poseen mayores impactos debido a su cercanía a grandes centros poblados.

Las fundiciones ubicadas en la II y III región tienen un efecto local debido a las distancias sobre centros urbanos densamente poblados.

6. REFERENCIAS

1. DICTUC, Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Calidad del Aire VI Región, 2008.
2. CENMA, Mejoramiento del Inventario de Emisiones de la región Metropolitana, 2000.
3. SERNAGEOMIN, D.S. N° 185. Decreto que regula a los establecimientos y fuentes emisoras de anhídrido sulfuroso, material particulado o arsénico, 1991.
4. <http://www.biblioredes.cl/BiblioRed>, 2005.
5. <http://www.observatoriorurbano.cl/>, 2010.
6. <http://www.munipuchuncavi.cl/index.htm>, 2009.
7. <http://sinca.mma.gob.cl>
8. Sanhueza P. and Vargas C., Torreblanca M., Análisis de Efectos en Mortalidad y Morbilidad por Material Particulado Respirable (PM10), Dióxido de Azufre (SO2) y Ozono (O3) en la V Región, 2007.
9. DICTUC, Inventario de Emisiones de la Zona de Ventanas y Estimación de su Impacto en la Calidad del Aire, 2008.
10. Wark K., Warner C., Davis W.; Air Pollution It's Origin and Control 1998.
11. Meso-scale & Micro-scale Meteorology Division, NCAR; ARW Version 3 Modeling System User's Guide, 2008.
12. Biung J., Cheng.; Operacional Guidance CMAQ v-4.6, 2006.
13. The Institute for the Environment -The University of North Carolina at Chapel Hill; SMOKE User's Manual 2.4, 2007.
14. Rew R., NetCDF User's Guide for C, An Interface for Data Access, Version 3. 1997.
15. Wang Z., Tonnensen G.; Chemistry Interface Processor (MCIP); UCR Regional Modeling Center Training, 2002.
16. Sanhueza, Evaluación de beneficios de una norma de emisión para fundiciones de cobre, 2012