

UCH-FC
Q. Ambiental
H565
C.1



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS-ESCUELA DE PREGADO

“DETERMINACION DE VALIDEZ ESTADISTICA DE FACTORES DE EMISION PARA MATERIAL PARTICULADO Y DIOXIDO DE AZUFRE EN FUNDICIONES DE COBRE”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

María José Herrera Cabrera

Director del Seminario de Título: Sr. Luis Tapia Leighton
Profesor Patrocinante: Dr. Richard Toro Araya

Octubre de 2016
Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la Srta:

María José Herrera

"DETERMINACION DE VALIDEZ ESTADISTICA DE FACTORES DE EMISION PARA MATERIAL PARTICULADO Y DIOXIDO DE AZUFRE EN FUNDICIONES DE COBRE"

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

Director Seminario de Título: Sr. Luis Tapia Leighton

Profesor Patrocinante: Dr. Richard Toro Araya



Comisión Revisora y Evaluadora

Presidente Comisión: Dr. Raúl Morales Segura

Evaluador: Julio Hidalgo Carvajal

Santiago de Chile, Octubre de 2016



María José Herrera, nacida el 25 de marzo de 1988 en la comuna de Licantén, donde cursó todos sus estudios de educación básica. Luego, en busca de mayores expectativas, fue matriculada en el colegio Hispano-Chileno "El Pilar" en la ciudad de Curicó para ingresar al primer año de educación media, desde donde egreso el año 2006.

Una vez que terminó su educación media, decidió matricularse en la carrera de Ingeniería Comercial en la Universidad Adolfo Ibáñez para continuar el rubro en el cual se desempeñó su abuelo y su padre, sin embargo, la carrera no cumplió con sus expectativas y se dio cuenta que sus aficiones eran otras y que se prepararía para ingresar a una carrera afín con el medio ambiente. Fue así como en el año 2008 se matriculó en la carrera de Química Ambiental en la Universidad de Chile.

El año 2014, en los meses de verano, decide realizar una práctica profesional en la empresa Licancel, perteneciente al Grupo Arauco, ubicada en la comuna de Licantén para observar desde cerca las prácticas industriales y el impacto que desencadena el rubro en su comuna. Ese mismo año, egresa de la carrera de Química Ambiental en el mes de Julio.

En noviembre del año 2014 queda seleccionada para iniciar una nueva práctica profesional en el Ministerio del Medio Ambiente, oportunidad que aprovecha con la expectativa de desarrollar su seminario de título en dicha institución. Debido al buen desempeño demostrado durante su práctica, fue contratada en el mes de febrero como consultor a cargo de uno de los proyectos ambientales que dirige el Ministerio del Medio Ambiente, el cual se prolongó hasta noviembre del año 2015.

Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a mi familia, en especial a mi padre y mi abuela por darme siempre su apoyo en esta importante etapa de mi vida estudiantil, y por transmitirme tranquilidad y paciencia cada vez que lo necesité.

A mis amigas de la universidad y del colegio porque siempre conté con ellas cuando requerí de algún consejo o tuve algún mal momento que impidió el normal desarrollo de este trabajo.

A todo el Departamento de Estadísticas e Información Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, en especial a mi director Luis Tapia por guiarme en el tema para este seminario, proporcionarme la información y por su buena disposición al momento de enseñar.

Por otro lado, quisiera agradecer al señor Walter Folsh del Ministerio de Salud por brindarme su ayuda y entregarme información acerca de las fundiciones. A Vicente Guzmán de la Fundición Ventanas de CODELCO por permitirme visitar las instalaciones de la planta y además, compartirme informes para la realización de este seminario.

A mi profesor patrocinante Richard Toro, quién me guió y alentó durante todo el transcurso de este seminario con la mejor disposición. Gracias por transmitir esa inteligencia y sabiduría que ha adquirido con su vocación y años de experiencia.

A la profesora Cecilia Labbe que siempre estuvo apoyándome y procurando que este proceso se extendiera el menor tiempo posible. Mil gracias a usted y felicitaciones por lo bien que lo ha hecho como jefa de carrera, creo que la mayor parte de los alumnos estamos muy contentos con su desempeño.

También quisiera agradecer a la inigualable Marisol Aravena, quién responde a cada una de nuestras solicitudes con la mayor dedicación y eficiencia, nos guía y explica todas las veces que sea necesario todos los pasos a seguir en este arduo proceso. Por último, quisiera agradecer a todos los docentes de la universidad, que destacan por su buena voluntad y su amplia vocación de servicio.

INDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contaminación del aire en Chile.....	1
1.2 Fundiciones de cobre y sus emisiones.....	1
1.3. Proceso productivo de las fundiciones.....	4
1.4. Tecnologías de abatimiento utilizadas en fundiciones.....	10
1.5. Normativa asociada a las fundiciones de cobre.....	12
1.6. Planteamiento del problema.....	25
1.7 Hipótesis.....	25
1.8 Objetivos.....	26
1.8.1 Objetivo General.....	26
1.8.2 Objetivos Específicos.....	26
II. METODOLOGÍA.....	27
2.1. Obtención de datos e informes de emisiones.....	27
2.1.1. Plataforma del RETC MMA.....	27
2.1.2. Reunión Walter Folsh. Encargado de Programa de Contaminación Atmosférica del Ministerio de Salud.....	27
2.1.3. Visita a fundición Ventanas.....	28
2.2. Fundiciones seleccionadas para el estudio.....	28
2.2.1. Fundición Ventanas.....	29
2.2.2. Fundición Potrerillos.....	30
2.3. Metodología de estimación de emisiones a través de FE.....	31
2.4. Mediciones Isocinéticas de gases.....	33
2.4.1. Fundición Ventanas.....	33
2.4.2. Fundición Potrerillos.....	34
2.5. Estimaciones a través de mediciones isocinéticas para el MP.....	35
2.6. Estimaciones a partir de mediciones isocinéticas para el SO ₂	36
2.7. Eficiencia de tecnologías de abatimiento.....	36
2.8. Análisis Estadístico.....	38
III. RESULTADOS Y DISCUSION.....	41
3.1. Mediciones.....	41
3.1.1. Fundición Ventanas.....	41
3.1.2. Fundición Potrerillos.....	42
3.1.3. Eficiencia de los equipos de abatimiento.....	48
3.2. Estimaciones de emisiones a partir de Factores de emisión (FE).....	50

3.2.1 Estimaciones para el secador rotatorio- Ventanas.....	50
3.2.1.1 Estimaciones para el Secador de Lecho Fluidizado-Potrerillos.....	52
3.2.1.2.Estimaciones para el Convertidor Teniente-Potrerillos	53
3.2.1.3.Estimaciones para el Convertidor Pierce Smith-Potrerillos	55
3.3. Análisis estadístico comparativo.....	56
3.3.3. Análisis estadístico con eficiencia experimental	60
3.4. Análisis sobre la calidad de los informes de mediciones.....	62
IV. CONCLUSIONES	65
V.RECOMENDACIONES	67
VI. REFERENCIAS	69
VII. ANEXOS.....	72

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Planes de descontaminación vigentes en torno a las fundiciones de cobre	17
Tabla 2: Cuadro resumen de las mediciones semestrales en fundición Ventanas.	34
Tabla 3: Resumen de estimaciones para determinar si existen diferencias significativas entre ambos grupos de datos.	38
Tabla 4: Mediciones isocinéticas de MP en secador rotatorio, fundición Ventanas	42
Tabla 5: Emisión mensual de MP calculada para el secador de lecho fluidizado.....	43
Tabla 6: Emisión mensual de SO ₂ calculada para el secador de lecho fluidizado.....	44
Tabla 7: Emisiones mensuales de MP calculadas para el convertidor Teniente	45
Tabla 8: Emisiones mensuales de SO ₂ calculadas para el convertidor Teniente	45
Tabla 9: Emisiones mensuales de MP calculada para el convertidor Pierce Smith	46
Tabla 10: Emisiones mensuales de SO ₂ calculada para el convertidor Pierce Smith.....	47
Tabla 11: Resumen de todos los porcentajes de EA del PEE del CT- fundición Potrerillos.	48
Tabla 12: Resumen de todos los porcentajes de EA del PEE del CPS-fundición Potrerillos.	49
Tabla 13: Porcentaje de eficiencias experimentales anuales en el CT y CPS	49
Tabla 14: Estimaciones de MP determinadas a partir del factor de emisión para MP	51
Tabla 15: Capacidad nominal de concentrado por fundición, año 2010.....	51
Tabla 16: Resumen de estimaciones de material particulado.....	52
Tabla 17: Resumen de estimaciones de Dióxido de Azufre.	53
Tabla 18: Estimaciones mensuales de Material Particulado en el CT	54
Tabla 19: Estimaciones mensuales de dióxido de azufre en el convertidor Teniente.....	54
Tabla 20: Estimaciones mensuales de Material Particulado en el convertidor Pierce Smith	55
Tabla 21: Estimaciones mensuales de Dióxido de azufre en el convertidor Peirce Smith	56
Tabla 22: Emisiones de MP estimadas en el secador rotatorio.	56
Tabla 23: Valores de p crítico resultantes de las pruebas de hipótesis.....	57
Tabla 24: Tabla resumen con todos los valores p resultantes de los análisis estadísticos.....	58
Tabla 25: Probabilidad de error resultante de los test estadísticos.....	61
Tabla 26: Condiciones básicas que deben cumplir los informes de mediciones	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución porcentual del arsénico producido en el proceso de fundición.....	3
Figura 2: Horno Convertidor Teniente.....	6
Figura 3: Convertidor Pierce Smith	8
Figura 4: Formularios a completar para la declaración de emisión de fuentes fijas	14
Figura 5: Formulario para el cálculo de estimaciones	15
Figura 6: Factores de emisión para partículas y Dióxido de Azufre definidos por la U.S EPA.	19
Figura 7: Factores de emisión para las fundición primaria de cobre.....	20
Figura 8: Diagrama operacional fundición Ventanas.....	29
Figura 9: Diagrama operacional fundición Potrerillos	30
Figura 10: Mediciones isocinéticas de MP en planta de secado mediante método CH-5.	34
Figura 11: Puntos de muestreo efectuados antes y después de los PEE del CT y CPS	37

LISTA DE ABREVIATURAS

MP: Material Particulado

SO₂: Dióxido de Azufre

FE: Factor de Emisión

MMA: Ministerio del Medio Ambiente

SMA: Superintendencia del Medio Ambiente

MINSAL: Ministerio de Salud

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos)

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

FE: Factor de Emisión

EA: Eficiencia de Abatimiento

PEE: Precipitador Electrostático

CCF8: Código de Clasificación de Fuentes

CPS: Convertidor Pierce Smith

CT: Convertidor Teniente

MMA: Ministerio del Medio Ambiente

CHX: Métodos Chilenos para medir contaminantes

PPDA: Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica

CODELCO: Corporación Nacional del Cobre

RETC: Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes

CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente

SERCOAMB: Servicios Ambientales e Higiene Ocupacional

RESUMEN

En el presente seminario se evalúan las metodologías existentes en Chile para estimar las emisiones de contaminantes por parte de las fundiciones primarias de cobre, específicamente para material particulado (MP) y Dióxido de Azufre (SO₂). Para ello, se compararon los valores de emisiones resultantes de mediciones isocinéticas horarias (extrapoladas a emisiones mensuales) con las estimaciones a partir del uso de factores de emisión definidos por la USEPA, adoptados en Chile mediante una guía de estimación de emisiones para dar cumplimiento al D.S.N°138 que obliga a declarar sus emisiones de contaminantes a todas las fuentes fijas existentes. Los factores de emisión se consideraron una herramienta válida en dicha comparación cuando no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los resultados obtenidos con ese método y las mediciones isocinéticas extrapoladas.

Las unidades de emisión estudiadas fueron los secadores de concentrado, donde se consideraron: un secador rotatorio para la fundición Ventanas en la V Región de Valparaíso y un secador de lecho fluidizado para la fundición Potrerillos en la III Región de Atacama. Además, se analizaron los convertidores Teniente y Pierce Smith de la fundición Potrerillos. Entre los datos disponibles se incluían mediciones realizadas antes y después de los precipitadores electrostáticos que forman parte de la fundición Potrerillos, por lo que fue posible calcular la eficiencia experimental de abatimiento de material particulado para los precipitadores electrostáticos de los convertidores Teniente y Pierce Smith.

Los resultados muestran una sobreestimación de las emisiones de material particulado calculadas a partir de los factores de emisión con respecto a las mediciones isocinéticas extrapoladas mensualmente en los secadores de concentrado de cobre de ambas fundiciones. Estas diferencias perjudican a las fundiciones, ya que declaran más de lo que emiten en la práctica, lo que no favorece el uso de dicha metodología de estimación, sobre todo cuando comience a regir la norma de emisión para las fundiciones de cobre, ya que se exigirán límites de emisión en este equipo.

Caso contrario se evidenció en los convertidores, donde las estimaciones de material particulado vía factores de emisión resultaron inferiores.

Para el convertidor Teniente las emisiones estimadas con los factores de emisión representaron en promedio un 19,4% y un 64,7% de las mediciones extrapoladas para MP y SO₂, respectivamente. Mientras que, en el convertidor Pierce Smith, estos valores correspondieron a 17% y 38,6%, respectivamente. Estas amplias diferencias ocasionan que los factores de emisión no sean una metodología válida de estimación de emisiones en ambos equipos, sobre todo si se considera que en las etapas del proceso desarrolladas en ellos ocurre gran cantidad de las emisiones, provocando que éstas no representen el real impacto que causan las fundiciones de cobre en las áreas circundantes a sus instalaciones, especialmente porque tanto Potrerillos como la zona aledaña al complejo industrial Ventanas, están catalogadas como zonas saturadas por MP y SO₂.

El análisis comparativo de la estimación de las emisiones de SO₂ en el secador de lecho fluidizado fue el único caso donde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambas metodologías, por lo que se asume que el factor de emisión aplica correctamente en este caso.

La eficiencia de abatimiento experimental, relativa al periodo 2011-2014 resultó ser de un 78,84 ±6,46 % para el PEE del convertidor Teniente y 69,31± 9,73% para el convertidor Pierce Smith, ocasionando que las estimaciones de emisiones de material particulado estén siendo subestimadas cuando aplica el factor de emisión, ya que dentro del cálculo, se incluye un porcentaje de abatimiento teórico de 98% para estos equipos, valor que no corresponde a su eficiencia real.

Se concluye que ninguna de las metodologías de cuantificación de emisiones de MP y SO₂ en fundiciones son válidas para ser usadas como prueba de cumplimiento de normativa de emisiones, ya que por una parte los factores de emisión presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto a los valores reales de emisiones en chimeneas, y por otro lado la calidad de las mediciones isocinéticas, en

cuanto a su extensión temporal resulta insuficiente, lo que dificulta estimar con certeza la variabilidad de las mismas.

ABSTRACT

In this seminar we analyzed different methodologies existing in Chile to estimate pollutant emissions from primary copper smelters, particularly for particulate matter (PM) and sulfur dioxide (SO₂). For this purpose, the values of emissions resulting from time isokinetic measurements (extrapolated to monthly emissions) was compared with the estimates from the use of emission factors defined by the USEPA, adopted in Chile through a guide emission estimation to give compliances to DSN ° 138 which forces to declare their emissions of pollutants to all existing stationary sources. The emission factors could be considered as a valid tool in this comparison, if no statistically significant differences between the results obtained with this method and extrapolated isokinetic measurements are found.

The emission units studied were copper concentrated dryers: a rotary dryer in Ventanas Smelter, located in the Valparaiso Region, and a fluidized bed dryer in Potrerillos Smelter, at III Atacama Region. Moreover, we analysed Teniente and Pierce Smith converters of the Potrerillos Smelter. The available data includes measurements before and after electrostatic precipitators in Potrerillos Smelter, so later, it was possible to quantify experimental efficiency of PM abatement for precipitators of Teniente and Pierce Smith Converters.

The results obtained in this Seminar shows an overestimation of emission of PM calculated from emission factors compared with the extrapolated isokinetic measurements in copper concentrate dryers for both smelters. This methodology of estimation do not favor Smelters, because they are declaring more than they are really emitting and it takes special relevance now, when the legal Norm for Emissions in Copper Smelters begin to be used, limiting the functioning of this and other equipments. In the contrary, as evidenced in this Seminar, data of PM by emission factor of Converters where under estimated.

For the Teniente Converter the data obtained with emission factors accounted for an average 19.4 % and 64.7 % of the extrapolated measurements for MP and SO₂,

respectively. While, in the Pierce Smith Converter, these values were 17 % and 38.6%, respectively. These large differences evidenced that emission factors are not a valid emission estimation methodology on both equipment. This is especially relevant because large amount of emissions occurs in the aforementioned analyzed steps, and the emission data available is not representing the real impact that Copper Smelters have in surrounding areas; even more considering that areas near Ventanas complex and Potrerillos are listed as MP and SO₂ saturated zones.

The comparative analysis of the estimated emissions of SO₂ in the fluidized bed dryer was the only case where no statistically significant differences were found between the two methods, so it is assumed in this case that the emission factor applied is correct and functional.

The experimental abatement efficiency covering the period 2011-2014 turned out to be a $78.84 \pm 6.46\%$ for Teniente Converter PEE, and $69.31 \pm 9.73 \%$ for the Pierce Smith Converter. This causes an under estimation of particulate emissions by applying the emission factor calculation, and moreover, this is in clear opposition with the Theoretical abatement percentage of 98% for these equipment, not corresponding with the measured efficiency.

In this seminar concluded that none of the methodologies for quantifying emissions of PM and SO₂ in copper smelter are valid to be used as proof of compliance with emission standards, because on the one hand the emission factors show statistically significant differences from the actual values emissions in chimneys, and secondly isokinetic quality measurements in terms of the time extension is insufficient, making it difficult to reliably estimate variability thereof.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Contaminación del aire en Chile

Chile ha experimentado un fuerte crecimiento económico en los últimos años, asociado principalmente a actividades productivas dentro de las que se cuentan: la minería, la pesca, la agricultura y la silvicultura. Sin embargo, la elevada dependencia de dichas actividades a los recursos naturales ha generado impactos significativos sobre el medio ambiente, especialmente sobre la calidad del aire y, en algunas zonas, en la disponibilidad de agua (OECD, 2013).

Dentro de las actividades productivas que han sido determinantes en dicho crecimiento se consideran: la minería, la pesca, la agricultura y la silvicultura. Por su parte, la minería es considerada como uno de los sectores productivos que trae consigo mayores externalidades negativas sobre el medio ambiente, ya sea a nivel local en ciudades aledañas a las faenas y actividades agrícolas como también a nivel global, considerando la contaminación atmosférica producida por las fundiciones de cobre, que representan uno de los impactos más serios de este rubro.

Por otra parte, las centrales termoeléctricas, la combustión residencial de leña y los grandes centros urbano-Industriales también constituyen fuentes antrópicas emisoras de contaminantes, que por años han sido determinantes en la calidad del aire de nuestro país.

1.2 Fundiciones de cobre y sus emisiones

Tradicionalmente, el tratamiento de concentrado de Cobre Sulfurado ha quedado bajo el mando de las fundiciones (Dreisinger, 2004). Actualmente en Chile existen 7 fundiciones primarias de cobre, dentro de las cuales 5 son estatales: Chuquicamata, Potrerillos, Ventanas, Caletones (CODELCO) y Hernán Videla Lira (ENAMI), mientras que Chagres y Altonorte, pertenecen a las empresas privadas Angloamerican y Xstrara, respectivamente.

Las fundiciones constituyen el pilar económico de algunas ciudades ubicadas mayoritariamente en la zona norte del país, sin embargo, impactan de manera negativa al medio ambiente. Tanto es así que, las fundiciones Caletones, Ventanas y Chagres son consideradas como las responsables de parte de la contaminación que afecta ciudades y actividades agrícolas de las regiones V,VI y metropolitana (Figuroa y col. 1999).

Las actividades extractivas y fundiciones de cobre han ocasionado un efecto sinérgico junto a las características naturales del sector, con significativas emisiones de Arsénico, material particulado, y gases e incluso, vertiendo residuos líquidos en los distintos cuerpos de agua. Hay antecedentes que indican que la fundición Potrerillos estuvo depositando sus relaves por años al Río Salado, ocasionando la contaminación de la Bahía de Chañaral. Caso similar al de la fundición Paipote (HVL) (Sancha, 1998)

1.2.1. Dióxido de azufre

El principal contaminante generado en el proceso de fundición es el Dióxido de Azufre, debido a que una gran proporción del concentrado de cobre que es procesado, contiene Azufre, el que es eliminado casi en su totalidad como SO_2 por las reacciones de oxidación que se llevan a cabo durante el proceso. El contenido de SO_2 en los gases emanados, va desde un 10% a un 60% dependiendo específicamente de tres factores: cantidad de aire de soplado, el tipo de concentrado y el grado de mata o eje producido que a su vez, está determinado por el contenido de Azufre en la carga de los hornos, ya que el Cobre es el primero que toma el Azufre necesario para formar Cu_2S (Berríos, 2010). Este compuesto es emitido a la atmósfera en forma fugitiva o bien, por medio de las chimeneas de la planta de ácido que no alcanzaron a transformar este gas en Ácido Sulfúrico.

1.2.2. Material Particulado

Por otro lado, el material particulado, que puede ser de origen primario, al formar parte del concentrado (principalmente Cobre y Hierro), corresponde a partículas de polvo que no alcanzan a reaccionar y son arrastradas por los gases hacia la salida de la unidad de emisión, o de origen secundario, producto de la condensación de los

compuestos volátiles que contiene el concentrado (Arsénico, Cinc, Bismuto y otro metales volátiles) a medida que se enfrían los gases en los sistemas de limpieza, o bien, gotas de mata/escoria que no sedimentaron (Wiertz,2004).

1.2.3 Arsénico

Por último, se encuentra el Arsénico, el cual es liberado principalmente en forma gaseosa durante las primeras etapas del proceso de fundición; fusión y conversión, ya que gran parte de los compuestos con arsénico son volátiles a las altas temperaturas en que se llevan a cabo estas etapas (Wiertz,2004).

En la figura.1 se representa la distribución porcentual del Arsénico en el proceso de fundición.

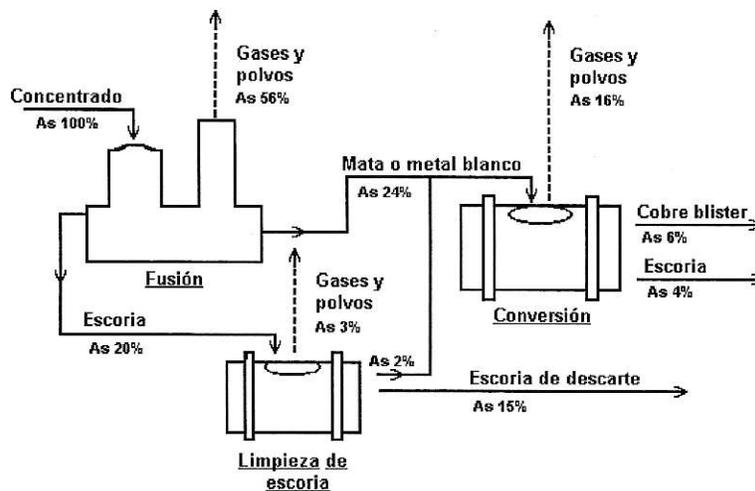


Figura 1: Distribución porcentual del Arsénico producido en el proceso de fundición (Fuente: Wiertz, 2004)

En Chile, se considera que la totalidad de las emisiones de Arsénico proviene exclusivamente de las fundiciones de cobre. Diversos estudios han señalado que el norte es una de las zonas del país donde se presentan las mayores concentraciones de Arsénico, no solamente por causas artificiales, ya que en sí, esta área presenta mayores cantidades de este metaloide de manera natural. Las ciudades con mayor exposición a Arsénico corresponden a Antofagasta, Calama, Santiago, Rancagua, Taltal, Tocopilla, San Pedro de Atacama (Sancha, 1998).

1.3. Proceso productivo de las fundiciones

La fundición del Cobre es un proceso pirometalúrgico de la industria de la minería que tiene por objeto la producción de Cobre metálico. Para ello, los concentrados de Cobre provenientes de las actividades extractivas mineras, son tratados para separar el Cobre de otros minerales como Azufre, Hierro y Sílice.

El proceso de fundición se desarrolla en cinco etapas: extracción del mineral, chancado, concentración, fundición y electrorefinación. Hoy en día, la fundición de concentrados de Cobre en Chile, es del orden de las 5.000 millones de toneladas, considerando la producción total por las 7 fundiciones existentes, las cuales utilizan diversas tecnologías en cada una de las etapas: hornos secadores donde se extrae la humedad del concentrado, convertidor Teniente, hornos flash u hornos Noranda en los cuales se lleva a cabo la fusión, convertidores Pierce-Smith para la conversión; y finalmente, hornos eléctricos para el tratamiento de las escorias(COCHILCO, 2002).

De manera general, previo al proceso de fundición, el mineral procedente de las actividades extractivas mineras, debe pasar por etapas de chancado, molienda y flotación, de manera de convertir el mineral en concentrado de cobre de un 30% de Ley. El concentrado, será descargado directamente en las canchas de concreto y almacenado en pilas de almacenamiento hacia un domo. Este concentrado posee un porcentaje de humedad cercano al 9%.

El proceso de fundición de cobre se desarrolla en distintas etapas operacionales dependiendo de la configuración de sus equipos, las que serán descritas a continuación.

- **Secado del concentrado.** En esta etapa, el concentrado húmedo es descargado a los hornos secadores de la fundición, los cuales según la fundición, pueden ser secadores de lecho fluidizado, vapor o rotatorios. En el secador de lecho fluidizado, es sometido a una corriente de aire caliente, a una temperatura cercana a los 100°C, eliminando la humedad hasta un 0,4% o 0,2%.

El concentrado seco se recupera desde los gases de secado mediante un filtro de mangas, provisto de un ventilador para la extracción de los gases.

Luego, es transportado a los buzones de almacenamiento del convertidor Teniente (CT) o bien directamente al convertidor (Schwarse y Queirolo, 1998).

- **Fusión de concentrados en el convertidor Teniente.** El CT es un horno amplio formado por un cilindro metálico dispuesto en posición horizontal, cuyas dimensiones varían de 14 a 22 m de largo por 4 a 5 m de diámetro, constituido principalmente por:
 - Toberas de inyección de concentrado seco: permiten el ingreso del concentrado de cobre seco.
 - Toberas de aire de proceso(soplado): producen la inyección de Oxígeno necesario para las reacciones de fusión-conversión del concentrado de Cobre.
 - Gar gun: cañón que se utiliza para inyectar fundente, carga fría y carbón.
 - Placa y pasaje de escoria: orificio a través del cual se evacúa la escoria. La placa de escoria permite dirigir el flujo de escoria hacia fuera del horno.
 - Boca del CT: evacúa los gases generados, encontrándose al extremo opuesto al pasaje de metal blanco.
 - Campana y tren de gases: encargados de captar y preparar los gases generados en el proceso de fusión-conversión para posteriormente enviarlos a la planta de limpieza de gases. Generalmente, los equipos del tren de gases son: enfriadores radiantes, cámaras de enfriamiento que disminuyen la temperatura del gas, precipitadores electrostáticos que capturan los polvos arrastrados en el proceso y ventiladores que impulsan los gases hacia la planta de limpieza.

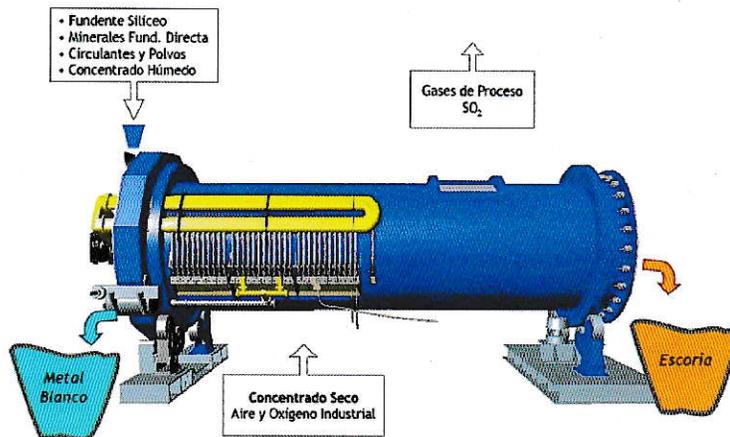


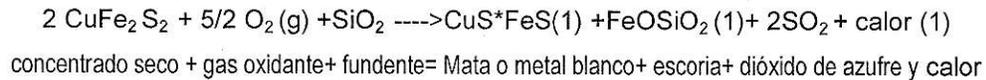
Figura 2: Horno convertidor Teniente (Fuente: Hernán Vives Navarro, USACH.)

El proceso comienza con la inyección de concentrado de Cobre seco, en forma neumática, por medio de toberas al baño fundido de reactor y Sílice (SiO_2) como fundente a través del Gar gun. Junto con ello, se inyecta aire enriquecido de Oxígeno o aire de soplado, que favorece la reacción de los Sulfuros de Hierro y Cobre presentes en el concentrado, produciendo el calor necesario para que se fundan las partículas de la carga, generando un eje de alta ley o metal blanco que contiene alrededor de 75% de Cobre, una escoria (FeOSiO_2) con un 4 a 8% de Cobre y una corriente continua de gases con un 25 a 35% de SO_2 que saldrá a través de la boca del convertidor, concentración que depende principalmente del Oxígeno contenido en el aire de soplado (Schwarse y Queirolo, 1998).

Los productos formados, se separan por diferencia de densidad, siendo el metal blanco el más pesado y sedimentado, mientras que la escoria representa la capa más superficial. Es preciso mencionar que el efecto de la SiO_2 en la separación entre la mata sulfurada y la escoria oxidada es determinante, ya que de no ser por ella, no existiría una separación real entre la fase sulfurada y oxidada, sino una mezcla homogénea (Berríos, 2010).

Finalmente, el metal blanco resultante de este proceso, es transferido periódicamente, mediante ollas a los convertidores Pierce Smith que se describirán más adelante.

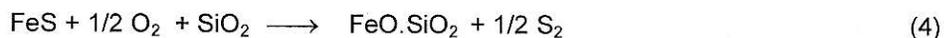
La reacción general del proceso de fusión es:



Descomposición térmica:



Formación de escoria:



Oxidación parcial:



La escoria (FeOSiO_2), por su parte, es transportada a los hornos eléctricos de limpieza donde el Cobre es recuperado de las escorias de alta ley. El Cobre queda retenido en la escoria por dos mecanismos: atrapamiento físico o mecánico y químico. El más común es el atrapamiento físico, que se produce cuando hay una mala separación entre la escoria y el metal blanco, quedando este último en la capa más superficial. El químico se produce por efecto de la solubilidad del Cobre en esta fase (Gutiérrez, 2000).

Los gases, ricos en SO_2 emanados por la boca del convertidor, no son emitidos directamente a la atmósfera, sino que pasan previamente a una cámara de enfriamiento, la que disminuye la temperatura de los gases hasta el rango de 300°C a 350°C , donde las partículas más grandes (polvos de arrastre) quedan sedimentadas al disminuir su velocidad al momento de entrar a la cámara. Luego, deben pasar por otra etapa de limpieza en el precipitador electrostático que mediante corriente eléctrica, permite recuperar las partículas en relación a su carga superficial, provocando que a medida que los gases avanzan en las distintas etapas de limpieza, se van enfriando y disminuyendo los polvos de arrastre, aumentando los polvos por condensación (Wiertz, 2004).

- **Conversión del metal blanco en hornos convertidores Pierce Smith.** El convertidor Pierce Smith (CPS) es un reactor semicontinuo de burbujeo en el

que se produce la conversión de matas o metal blanco; Sulfuros de Cobre y Hierro a Cobre Blíster. El propósito de la conversión del metal blanco es eliminar el Hierro, Azufre y otras impurezas mediante un proceso de oxidación selectiva a altas temperaturas.

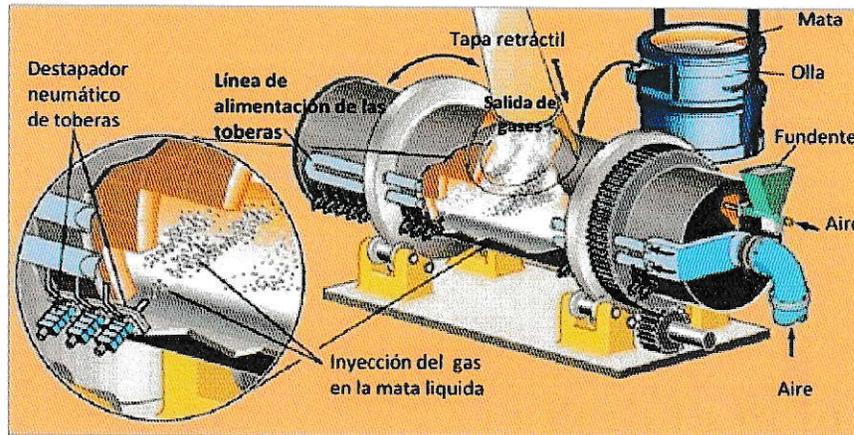
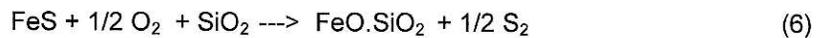


Figura 3: Convertidor Pierce Smith (Fuente: Hernán Vives Navarro, USACH.)

El proceso de conversión se realiza generalmente en forma batch y cada ciclo se divide en dos etapas: soplado a escoria y soplado a Cobre. La primera etapa del proceso desarrollado en el CPS es el soplado a escoria, donde con el fin de acomplejar el FeO presente en la escoria, se le agrega Sílice como fundente, para así acomplejar al Hierro formando magnetita (formación de escoria).



Una vez terminada la etapa anterior, se encuentran en equilibrio dos fases líquidas inmiscibles: escoria, casi saturada de magnetita y una cierta cantidad de Cobre disuelto químicamente (Cu_2O) o atrapado físicamente (CuS) y una fase sulfurada rica en Cobre denominado metal blanco (Gutierrez,2002).

Luego, en la segunda etapa, denominada soplado a Cobre, se continúa inyectando aire para eliminar el Azufre remanente, dando como resultado la producción de Cobre Blíster (Cobre metálico) y Dióxido de Azufre, mediante las siguientes reacciones.



La ecuación general que describe el proceso es:



Mata de Cobre + gas oxidante + fundente = Cobre metálico + escoria + Dióxido de Azufre

- **Refinación horno anódico o RAF.** El Cobre Blíster contiene impurezas dependiendo del yacimiento de donde provenga que impiden que sea empleado en los procesos de transformación para la obtención de productos finales. Es por esto, que debe someterse a una última etapa de refinación, la cual se puede desarrollar en hornos anódicos u hornos de refinación a fuego (RAF), dependiendo de las necesidades del producto que se desea obtener.

En los hornos anódicos, el Azufre contenido en el Cobre Blíster se elimina por oxidación, inyectando aire y petróleo por tobera al baño. La concentración de Oxígeno puede llegar a 4500 ppm, mientras que el Azufre presenta una baja a menos de 30 ppm. Por su parte, el Arsénico se elimina por reducción utilizando Carbonato de Calcio y de Sodio como fundente (Gutiérrez, 2002).

Por otro lado, en los hornos RAF, el Oxígeno aumenta a 2000 ppm y el Azufre es reducido a 30 ppm por agitación del Cobre fundido con aire inyectado por tobera.

Los gases metalúrgicos ricos en Dióxido de Azufre son captados a la salida de los equipos de fusión y conversión, limpiados y tratados en plantas de ácido donde el Dióxido de Azufre es convertido a Ácido Sulfúrico (Wiertz, 2004).

En el presente seminario, se abordarán en profundidad las etapas de secado de concentrado desarrolladas en los secadores rotatorio y de lecho fluidizado para el caso de la fundición Ventanas y Potrerillos respectivamente. Además, se considerarán a los convertidores Teniente y Pierce Smith en la fundición Potrerillos.

En relación al secador rotatorio existente en la fundición Ventanas, éste corresponde a un cilindro de acero recubierto interiormente con material refractario y aislante. Opera poniendo en contacto directo el concentrado de cobre con gases de combustión para realizar el secado. Los gases son evacuados a la atmósfera previo al paso por un filtro de mangas, por lo tanto, las mediciones isocinéticas se llevan a cabo justo a la salida del equipo de abatimiento. Este secador opera con gas natural como combustible, en su defecto se dispone de Fuel 6 y Diésel (CODELCO, 2011b).

Por otra parte, la planta de secado de la Fundición Potrerillos está conformada por un secador de lecho fluidizado o flúosólido que a diferencia del secador rotatorio de la fundición Ventanas no contiene una parte móvil, sino que está constituido por un lecho que se mantiene en constante agitación, gracias a un caudal de fluidización. La principal ventaja de este tipo de hornos es que se pueden minimizar las emisiones de SO₂ por adición de reactivos en el propio lecho (Elías, 2012).

1.4. Tecnologías de abatimiento utilizadas en fundiciones

Las tecnologías o equipos de abatimiento de las fundiciones están centrados en mitigar las emisiones de material particulado que emanan principalmente en las primeras etapas del proceso. Para el enfriamiento de los gases provenientes tanto del convertidor Teniente, como del Pierce Smith, se encuentran instalados enfriadores radiantes que disminuyen la temperatura hasta los 400° C y una vez que los gases pasan a través de los enfriadores estos son dirigidos hacia los precipitadores electrostáticos secos que representan una de las principales tecnologías de abatimiento de material particulado (COPRIM, 2012).

Formarán parte de este estudio los filtros de mangas, que capturan las partículas emanadas en la corriente de gas del proceso de secado y los precipitadores electrostáticos secos que recogen gran parte de las partículas que son emanadas en los procesos de fusión-conversión desarrollados en el convertidor Teniente y convertidores Pierce Smith.

- **Precipitador electrostático seco (PEE):** dispositivo cilíndrico vertical que contiene un número de etapas de precipitación en sucesión que van ocurriendo a través de sus espacios verticales. Contiene electrodos ubicados en el centro del plano del flujo, manteniéndose un alto voltaje y generando un campo eléctrico que fuerza a las partículas hacia las paredes recolectoras. Los electrodos recolectores son golpeados por medio de métodos mecánicos para desprender las partículas, las cuales se deslizan descendiendo hacia una tolva en donde son acumuladas. La tolva es vaciada periódicamente a medida que se llena.

El polvo se retira por medio de una válvula, tal como una cinta neumática para después ser desechada (EPA, 1999).

Es importante, que las partículas pasen por cámaras de enfriamiento antes de entrar al PEE, ya que las partículas más grandes deben ser removidas de la corriente de gas donde producto de la disminución de la velocidad de los gases por expansión de la sección de los ductos, que provoca su sedimentación (Wiertz, 2004).

- **Filtro de manga:** las partículas en el secador de concentrados, deben separarse de los gases antes que sean descargados hacia la atmósfera. En el filtro de manga el gas pasa a través de una tela de tejido o fieltro, cartucho o bolsa, donde quedan las partículas de polvo retenidas producto de los mecanismos de impacción inercial, difusión por movimiento browniano e interjección (Woodard,1998). Estos están configurados por un número de unidades individuales de cartuchos albergados juntos en grupo, normalmente abiertos por el fondo y cerrados en la parte superior donde el gas fluye desde la parte inferior hacia la superior de estas bolsas, cartuchos o mangas.

La tela es responsable de parte de la filtración, pero actúa mayormente como soporte para la capa de polvo que se acumula (INE, 2002) Los filtros de manga presentes en las fundiciones de cobre, cuentan con un sistema de auto limpieza llamado pulse jet que consiste en enviar un pulso de Nitrógeno en contracorriente al flujo normal de gases, con el fin de producir una vibración que desprenda el material adherido en las mangas (Fernández, 2008).

1.5. Normativa asociada a las fundiciones de cobre

En Chile, las primeras normas de calidad y emisión de aire, se dictan en 1978 y 1961 respectivamente, debido a la constante preocupación por la contaminación atmosférica provocada en el país (MMA, 2011). Actualmente la legislación obliga a algunos rubros industriales a cuantificar la emisión de los contaminantes emanados al medio ambiente y los subsistemas que lo componen, como respuesta a la concientización que ha desarrollado la sociedad por la importancia del medio ambiente y su protección.

Por su parte, las empresas o fuentes fijas que poseen la obligación legal de reportar sus emisiones, lo hacen a través de un sistema denominado Ventanilla Única que se encuentra inserto dentro del portal electrónico del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) administrado por el Ministerio del Medio Ambiente, a través del cual se accede a los sistemas de declaración de los órganos fiscalizadores (MINSAL, SISS, DIRECTEMAR, entre otros) para dar cumplimiento a las obligaciones estipuladas en la normativa ambiental para establecimientos emisores o generadores de contaminantes.

1.5.1. Decreto Supremo N° 138

El 17 de noviembre del año 2011 entra en vigor el Decreto Supremo N° 138 con su publicación en el Diario Oficial, en el cual se establece como obligación, la declaración de emisiones por parte de fuentes fijas, aquellas que operan en un lugar puntual, descargando sus emisiones por medio de chimeneas o ductos. Dentro de estas, se especifican los siguientes rubros, actividades o tipos de fuentes:

- Calderas generadoras de vapor y/o agua caliente
- Producción de celulosa
- Fundiciones primarias y secundarias
- Centrales termoeléctricas
- Producción de cemento, cal o yeso
- Producción de vidrio
- Producción de cerámica

- Siderurgia
- Petroquímica
- Asfaltos
- Equipos electrógenos.

Año a año, los distintos rubros y/o actividades industriales deben declarar sus emisiones a través del formulario electrónico referido a la Circular N°23/2006, que señala las instrucciones para la declaración de emisiones de fuentes fijas, administrado por el Ministerio de Salud. A partir de la declaración de niveles de actividad de las fuentes, el MINSAL estima las emisiones atmosféricas generadas por cada una de las fuentes declaradas. Estas estimaciones son publicadas en el portal WEB del RETC.

La forma de cuantificar los contaminantes emanados a la atmósfera, puede ser por medio de estimaciones a partir de factores de emisión o bien, en el caso que haya una obligación de la fuente a realizar muestreos puntuales periódicos o continuos, se utilizarán dichos muestreos (CONAMA, 2009). En el caso de las estimaciones a través de coeficientes que cuantifican las emisiones o absorciones por actividad unitaria o factores de emisión (FE), se deben seguir los protocolos establecidos en la “Guía Metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes” (CONAMA, 2009).

Las declaraciones se realizan por unidad emisora, la que corresponde a la operación unitaria o equipo físico en donde se generan las emisiones de contaminantes, el cual posee un código de identificación.

El portal electrónico donde los titulares de fuentes fijas realizan sus declaraciones, a través de formularios que contienen información detallada sobre las unidades de emisión y los niveles de actividad de las industrias se muestra en la figura 4.



F138 Declaración de Emisiones de Fuentes Fijas
FORMULARIOS DE INGRESO DE LA DECLARACION

USUARIO: Administrador Establecimiento EIND000120-4
ESTABLECIMIENTO: PLANTA ELEVADORA DE AGUAS SERVIDAS PAHUANO Nros (EIND000120-4)

AÑO DECLARACION: 2009
TIPO / ESTADO DECLARACION: Tipo: DS138/COV Estado: En desarrollo en el establecimiento

OPCIONES DISPONIBLES PARA EL ESTADO ACTUAL DE LA DECLARACION

FORMULARIOS DE INGRESO DE LA DECLARACION
BITACORA DE ESTADOS
OBSERVACIONES (Ingresadas por la autoridad)

Nro.	Usuario	Fecha Observacion
FORMULARIO 1	Datos de la empresa y el establecimiento	
FORMULARIO 2	Información asociada a cada actividad industrial (CIIU) 2.1 Niveles de actividad. 2.2 Unidades de emisión. 2.3 Ductos de descarga. 2.4 Equipos de control asociados a cada actividad industrial (CIIU) del establecimiento.	
FORMULARIO 3A (Se accede desde el interior del formulario 2, Punto 2.2)	Fuentes asociadas a cada unidad de emisión 3.1 Calderas industriales, generación eléctrica y calefacción. 3.2 Fuentes tipo hornos de panadería. 3.3 Proceso CON Combustión. 3.4 Proceso SIN Combustión. Emisiones correspondientes a fuentes asociadas a Unidades de Emisión declaradas en formulario 3A. Las mediciones son agregadas por los Laboratorios autorizados por el establecimiento.	
FORMULARIO 4		

Figura 4: Formularios a completar para la declaración de emisión de fuentes fijas (Fuente: "Manual de usuario para declaración de fuentes fijas", RETC. 2014)

A continuación, se describe brevemente la información asociada a cada uno de los formularios de declaración.

- **Formulario N°1:** se declara la información asociada a la empresa y a los establecimientos que forman parte de la misma.
- **Formulario N° 2:**
 - [2.1] Se deben ingresar materias primas y productos para la actividad industrial seleccionada previamente de forma mensual.
 - [2.2] Las unidades de emisión (tipo, marca, modelo y año), los ductos o chimeneas existentes (diámetro interno, diámetro externo, altura, coordenadas, temperatura y velocidad de los gases).
 - [2.3] Se deben mencionar los equipos de control (N° de registro, tipo, N° interno, marca)
- **Formulario N° 3:** para cada fuente de cada unidad de emisión se debe declarar: combustible utilizado, consumo de combustible mensual y horas de

funcionamiento mensual de la fuente seleccionada. Además, se debe incluir una descripción de la descarga de emisiones partiendo desde la fuente seleccionada hasta el punto de descarga final (descripción de los dispositivos que se encuentran aguas abajo de la salida de los gases).

- **Formulario N° 4:** Ingresar las mediciones oficiales históricas, no oficiales y además las estimaciones. Para las estimaciones hay una especie de calculadora en línea. (Figura 5)

Por lo tanto, con los niveles de actividad por cada unidad de emisión, expresados en toneladas mensuales de la materia prima procesada en cada equipo, recogidos por medio del formulario N°2, se estiman las emisiones resultantes de las primeras etapas del proceso de fundición que son abordadas en esta investigación: secado del concentrado de cobre y etapas posteriores de fusión-conversión, ambas desarrolladas en la planta de secado y hornos convertidores respectivamente, las que presentan factores de emisión definidos por la USEPA, plenamente vigentes a nivel de normativa, como método de cuantificación de contaminantes.

ESTIMACION DE EMISIONES	
	<input type="button" value="GUARDAR"/>
NRO CORRELATIVO	6509
(*) Nro registro fuente	CA000146M01-9
(*) Contaminante	Arsenico
(*) Tipo de descarga	DESCARGA POR CHIMENEA
(*) Método de estimación	1-FACTOR DE EMISION
VALOR DEL FACTOR	77
UNIDAD DE MEDIDA DEL FACTOR DE EMISION	77
	<p>Ejemplos de Unidad de medida del factor de emisión.</p> <p>- Factor de Caldera = 0,00017, en este caso la unidad de medida es kg/Lt de Petróleo diesel</p> <p>- Horno de secado de concentrado = 2,4, en este caso la unidad de medida es kg/Ton de concentrado.</p>
Origen del factor de emisión	777
	Ejemplo: AP-42 de la EPA, LPG Combustion, Industrial Boilers, Quinta Edición/1998
(*) EMISION ESTIMADA ==>	77 (ton/año)
DOCUMENTOS ASOCIADOS	<input type="button" value="Seleccionar nuevo documento"/>
<input type="button" value="E"/>	prueba.php
	(*) Dato Obligatorio

Figura 5: Formulario para el cálculo de estimaciones
(Fuente: "Manual de usuario para declaración de fuentes fijas", RETC. 2014)

Por otra parte, a través del formulario N°3, se recogen los datos de horas de funcionamiento de cada equipo o unidad emisora, lo que es de suma importancia al momento de estimar las emisiones a través de las mediciones isocinéticas contenidas en los informes.

Es preciso mencionar que cada unidad de emisión posee un código característico, llamado código de clasificación de fuente (CCF) que es análogo en estructura a la clasificación Source Classification Code de la USEPA. Las fuentes individuales, se clasifican de acuerdo al CCF8 donde su categorización va de lo general a lo particular y está compuesto por el CCF1 (1 dígito), CCF3 (3 dígitos), CCF6 (6 dígitos) y finalmente CCF8 (8 dígitos).

Por ejemplo, para los hornos convertidores el código de clasificación de fuente (CCF8) corresponde a **30300504**

CCF1: **3** (Procesos industriales)

CCF3:**303** (Producción primaria del metal)

CCF6:**303005** (Producción primaria de cobre)

CCF8: **30300504** (horno convertidor)

La Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) generó una calculadora de fuentes fijas atmosféricas para agilizar y facilitar el procesamiento de dichas declaraciones (CONAMA, 2009). Esta herramienta permite estimar las emisiones asociando el CCF8 de la unidad de emisión con un parámetro previamente definido para realizar el cálculo anual. Cada CCF8 está asociado a un FE en particular y a un parámetro determinado que tiene que ver con el nivel de actividad declarado por cada titular.

1.5.2 Planes de descontaminación de aire

La mayor parte de las fundiciones tiene asociada algún tipo de plan de descontaminación (González, 2014), que corresponde a un instrumento de gestión ambiental que contempla medidas para reducir la cantidad de contaminantes en una zona latente o saturada. Esto ha sucedido en respuesta a la alta carga contaminante

que emiten las fundiciones de cobre, ocasionando que las áreas circundantes a sus instalaciones estén siendo constantemente deterioradas.

Hoy en día 5 de las 7 fundiciones tienen un plan de descontaminación asociado.

Tabla 1: Planes de descontaminación vigentes en torno a las fundiciones de cobre (Fuente: "Análisis valor estratégico de las fundiciones", Francisco González, 2014)

Fundición	Decreto Supremo que establece plan	Límite SO ₂ (ton/año)	Límite de MP (ton/año)	Año establecido para alcanzar el límite
Ventanas	D.S 252/1992	90.000	1.000	1999
Hernán Videla Lira	D.S 180/1995	40.000	600	1999
Potrerrillos	D.S 179/1998	100.000	5.500	2000
Caletones	D.S 81/1998	230.000	1.987	2001
Chuquicamata	D.S 206/2000	56.600	1.850	2003

En los planes de descontaminación se exige a las empresas reducir sus emisiones a la atmósfera, a través de la mejora de las tecnologías de captura de contaminantes, optimizando su proceso o bien, disminuyendo la emisión de agentes que alteren o deterioren la calidad del aire. Además, se presentan exigencias a nivel de normativa, donde las distintas fuentes involucradas, deben presentar informes de mediciones isocinéticas a la autoridad ambiental, con la frecuencia que se explicita para cada fundición en particular.

Una manera de garantizar el cumplimiento de los planes de descontaminación, es el control de la calidad del aire por parte de las estaciones de monitoreo más cercanas a las fundiciones, donde además, se debe realizar un seguimiento de las características ambientales de la zona aledaña a cada industria.

1.5.3. Norma de emisión para fundiciones de Cobre y fuentes emisoras de Arsénico

El año 2005 la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en la evaluación de desempeño ambiental mostró su preocupación por la gran cantidad de contaminantes emitidos por parte de las fundiciones de cobre, catalogando a esta industria como causantes del grueso de las emisiones de SO₂ y Arsénico. Por lo que se planteó a modo de recomendación, la necesidad de dictar normas más estrictas

para estas industrias, de manera de proteger la salud de las personas y el medio ambiente, en todo el territorio nacional (OCDE, 2005a). De esta forma, se comenzó a evaluar los costos y beneficios que traería la promulgación de una nueva norma de emisión.

En diciembre de 2013 se publica en el diario oficial el decreto N°28 para fundiciones y fuentes emisoras de Arsénico que incluye fuentes existentes y nuevas, donde se "congelan" las emisiones de SO₂ para fuentes existentes y se plantean límites de emisión por fuente emisora (en toneladas/año) para Dióxido de Azufre y Arsénico, en función de un 95% de fijación y captura, para lo que establece un plazo máximo de cumplimiento de 5 años para las fuentes existentes (González, 2014).

Por su parte, para las fuentes nuevas, se establecen límites de emisión en toneladas/año del orden del 98% de captura para SO₂ y 99,76% en el caso del Arsénico. La norma además, plantea límites de emisión en chimeneas para la planta de ácido, horno secador y horno de limpieza de escoria (emisiones con concentración de MP inferior o igual a 30 mg/Nm³) y obliga a efectuar actividades de fiscalización por parte de la Superintendencia de Medio Ambiente, como por ejemplo, exigir la implementación de un sistema de monitoreo continuo en torno a la planta de ácido y la realización de auditorías en terreno, al menos una vez por año (González, 2014).

1.5.4. Factores de emisión (FE)

El primer compilado de factores de emisión, que ha sido ampliamente divulgado y usado en la mayor parte de los inventarios de emisiones a nivel internacional, nace a finales de los años 80 y fue desarrollado por la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos, el cual corresponde a un promedio de los resultados de mediciones de emisiones realizadas en un gran número de fuentes, con diferentes tecnologías de combustión, considerando entre otros la antigüedad, calidad de combustible y tamaños, los que ha permitido que sean representativos para todas las instalaciones en la categoría de una fuente (CONAMA, 2009). El manual lleva por nombre AP-42 y en su primer volumen, se definen fuentes puntuales y fuentes de área.

Los factores de emisión para el material particulado están definidos de acuerdo a la configuración de los equipos de la fundición, como muestra la Fig. N° 6

Table 12.3-2. (Metric Units). EMISSION FACTORS FOR PRIMARY COPPER SMELTERS^{a,b}

Configuration ^c	Process	Particulate	EMISSION FACTOR RATING	Sulfur Dioxide ^d	EMISSION FACTOR RATING	References
Reverberatory furnace (RF) followed by converter (C) (SCC 3-03-005-23)	RF	25	B	160	B	4-10
	C	18	B	370	B	9,11-15
Multiple hearth roaster (MHR) followed by reverberatory furnace (RF) and converter (C) (SCC 3-03-005-29)	MHR	22	B	140	B	4-5,16-17
	RF	25	B	90	B	4-9,18-19
	C	18	B	300	B	8,11-13
Fluid bed roaster (FBR) followed by reverberatory furnace (RF) and converter (C) (SCC 3-03-005-25)	FBR	ND	ND	180	B	20
	RF	25	B	90	B	— ^e
	C	18	B	270	B	— ^e
Concentrate dryer (CD) followed by electric furnace (EF) and converter (C) (SCC 3-03-005-27)	CD	5	B	0.5	B	21-22
	EF	50	B	120	B	15
	C	18	B	410	B	8,11-13,15

12.3-6

EMISSION FACTORS

(Reformatted 1/95) 10/86

Figura 6: Factores de emisión para partículas y Dióxido de Azufre definidos por la U.S EPA.

Si bien, en Chile la disposición de los equipos no coincide completamente con ninguna de las configuraciones definidas en el manual, se definieron los FE de acuerdo a las similitudes de cada equipo con las características descritas en dicho documento.

En relación a los FE para el SO₂ están definidos para cualquier configuración dada, excepto para los hornos de reverbero seguido de convertidores, que eran hornos donde ocurría la fusión tradicional y que actualmente es reemplazado sólo por el convertidor Teniente que es donde se produce el proceso de fusión y conversión en una sola operación (CODELCO,2015a).

No obstante, en algunos países han decidido calcular sus propios factores de emisión en base a resultados de mediciones en sus procesos productivos y balance de material establecido dentro de los mismos, debido a que es difícil encontrar instrumentos que midan en línea en las fuentes de las fundiciones de cobre y, por otra parte no resulta factible económicamente contratar laboratorios para que midan constantemente cada fuente de emisión.

En vista de las diferencias existentes en las técnicas de fabricación de los distintos equipos y en las materias primas utilizadas en una fundición, en China,

consideraron necesario desarrollar sus propios factores de emisión, representativos del área y tecnología específicas estableciendo comparaciones entre el porcentaje de abatimiento de los equipos de control explicitado en la literatura en relación al obtenido de manera experimental en las mismas mediciones. Sin embargo, los resultados arrojaron que los FE determinados en este estudio se encontraban dentro del rango dentro de los del manual AP-42 (Zhang, 2013).

Los factores de emisión se definen por rubro, unidad emisora, metodología de combustión y por contaminantes, como se muestra en la figura 7. En el caso de las fundiciones de cobre, estos valores poseen unidades de kg. por tonelada de concentrado de cobre producido

Fuente	Contam.	Factor de Emisión	Unidad	Fuente/Edición/Año de Publicación
Horno de secado de concentrado (SCC 30300506)	MP	5	(kg/ton de concentrado)	AP-42 de la EPA, Primary Copper Smelting, October 1986.
	MP ₁₀	2,4		
	SO _x	0,5		
Horno eléctrico de refinación (SCC 30300510)	MP	50	(kg/ton de concentrado)	AP-42 de la EPA, Primary Copper Smelting, October 1986.
	MP ₁₀	29		
	SO _x	45		
Horno Convertidor (SCC 30300504)	MP	18	(kg/ton de concentrado)	AP-42 de la EPA, Primary Copper Smelting, October 1986.
	MP ₁₀	10,6		
	MP _{2,5}	5,8		
	SO _x	300		
	Plomo	0,135		
Horno Flash (SCC 30300512)	MP	70	(kg/ton de concentrado)	AP-42 de la EPA, Primary Copper Smelting, October 1986.
	MP ₁₀	41,5		
	SO _x	410		
Emisiones fugitivas de hornos convertidores (SCC 30300515)	MP	2,2	(kg/ton de concentrado)	AP-42 de la EPA, Primary Copper Smelting, October 1986.
	MP ₁₀	2,1		
	MP _{2,5}	1,9		
	Arsénico	0,087		
	SO _x	65		

Figura 7: Factores de emisión para las fundición primaria de cobre (CONAMA, 2009)

El enfoque metodológico, consiste en combinar la información sobre el alcance de una actividad humana en procesos productivos, denominados nivel de actividad en kg, ton o L del material utilizado en la unidad de emisión o bien, tasas de consumo de combustible como L o m³ por hora, con los factores de emisión. La ecuación básica para llevar a cabo este cálculo para una fundición o cualquier otro rubro, es:

$$E = Fe * Na * \left(1 - \frac{EA}{100}\right) \quad (10)$$

Dónde:

- E** : Emisión calculada;
- Fe**: Factor de emisión (kg/tonelada concentrado)
- Na**: Nivel de actividad (tonelada de concentrado/año)
- EA**: Eficiencia de abatimiento

En base a la fórmula (10), se calculará la variable E (Emisión calculada) correspondiente a la estimación de la emisión tanto para MP como SO₂ por cada fuente de emisión, la que será calculada con ayuda de los factores de emisión fijados por la EPA, adaptados en Chile en la guía metodológica, y el nivel de actividad declarado por cada fundición respecto a su producción en cada unidad de emisión (tonelada de concentrado de cobre/ año), por medio del formulario electrónico referido a la Circular N°23/2006.

Por otra parte, la eficiencia de abatimiento (EA) da una idea de la efectividad en la reducción de emisiones lograda mediante un equipo para el control de emisiones. Dicho valor, se representa en la fórmula mediante un porcentaje establecido, en relación a su efectividad y el tipo de tecnología utilizada. Estos antecedentes también pueden evidenciarse en la guía, sin embargo corresponden a un porcentaje promedio extraído de fichas técnicas de los equipos de abatimiento, disponibles en el Centro de Información sobre contaminación de Aire (CICA)¹, donde aparece en cada una de las fichas un apartado denominado “Límites de Emisión Alcanzables/Reducciones” en donde se explicita el límite de reducción en emisiones que puede alcanzar cada equipo, representados en porcentajes.

¹www.epa.gov/ttn/catc/cica/atech_s.html#333

Como en nuestro país no todas las empresas están obligadas a medir sus contaminantes, los factores de emisión son una herramienta que cobra importancia al momento de cuantificar las emisiones atmosféricas. Sin embargo, las estimaciones calculadas por medio de ellos podrían, ser inexactas dependiendo de las variaciones en condiciones de combustión, combustibles empleados y el tipo de minerales a los que se aplique.

1.5.5. Mediciones en las fuentes

Las mediciones o muestreos en la fuente representan otra alternativa para estimar emisiones, que incluso puede proporcionar mejores aproximaciones que los FE o los balances de materiales. Sin embargo, este método trae consigo una serie de complejidades técnicas que significan una inversión en tiempo, instrumentos y profesionales para obtener datos con una calidad aceptable (Radian Corporation, 1996).

Se entiende por **muestreo isocinético** a la técnica que permite extraer una muestra de gas desde un ducto de evacuación de gases de una fuente fija a una velocidad aproximadamente igual a su velocidad de evacuación. La muestra extraída pasa a través de un medio filtrante adecuado, donde quedan contenidas las partículas transportadas por el flujo gaseoso. Estas partículas y las adheridas a las partes del sistema en contacto con la muestra de gases, constituyen la masa total de partículas emitidas por la fuente.

La concentración de partículas se obtiene mediante el cociente de la masa de partículas obtenida mediante muestreo y el volumen de muestra expresado en condiciones estándar, es decir, 25°C, 760 mmHg y sin humedad.

En los muestreos realizados directamente en la fuente se reducen las suposiciones aplicadas cuando se utiliza el factor de emisión, como la eficiencia de los equipos de abatimiento, las características operacionales de los equipos de una industria o bien, la naturaleza del combustible con el que operan los equipos (Radian Corporation, 1996).

En el caso de las fundiciones de cobre, éstas realizan campañas de mediciones de manera de cuantificar la emisión de contaminantes y determinar las pérdidas

metalúrgicas ocurridas en sus chimeneas, por lo que estos informes son una realidad en el rubro. Sin embargo, para el Ministerio de Salud, estas mediciones no son oficiales, puesto que no se sujetan al cumplimiento del D.S 2467/94 MINSAL el cual aprueba el reglamento de laboratorios de medición y análisis de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes puntuales.

Los datos de emisión determinados a partir de las mediciones en la fuente, pueden extrapolarse para estimar mediciones mensuales o anuales solo si la operación no varía de manera significativa (Radian Corporation, 1996).

Las mediciones se efectúan, siguiendo los requerimientos y protocolos establecidos en los métodos de medición de emisiones de fuentes fijas publicados por la Environmental Protection Agency (EPA). Estos métodos han sido traducidos, aprobados y oficializados bajo la normativa Chilena, y se conocen como métodos Chilenos o CH-X. A continuación se describirá brevemente cada uno de ellos.

- **CH-1 "Localización de puntos de muestreo y de medición de velocidad para fuentes estacionarias"** Este método tiene como propósito, la selección de los puertos de muestreo y puntos transversales para el muestreo de contaminantes atmosféricos. La magnitud del flujo ciclónico de gas efluente en una chimenea o ducto es el único parámetro cuantitativamente medido. Fue diseñado para que las mediciones sean representativas de la emisión de contaminantes y/o la proporción total de flujo volumétrico de una fuente estacionaria. Se selecciona un punto de muestreo en donde la corriente de gas está fluyendo en una dirección conocida y el área de la chimenea se divide en dos secciones iguales. Cada punto de muestreo se ubica en un punto de cada subsección de modo tal que está a su vez sea dividida en otras 2 secciones iguales.
- **CH-2 "Determinación de la velocidad y flujo Volumétrico de gas en Chimenea"** Este método se utiliza con el fin de medir la velocidad y flujo volumétrico de una corriente de gas. La velocidad media de un gas en chimenea es determinada con la densidad del gas y el promedio de presión de velocidad con un tubo de Pitot tipo S. La metodología consiste en realizar un

barrido a través de cada travesa del ducto en los puntos previamente calculados y marcados en el instrumento de medición. En cada punto se debe registrar la presión de velocidad o presión dinámica, la presión estática y la temperatura. Con estos parámetros del flujo y composición promedio del flujo de gases de O₂ y CO₂ se calcula la velocidad.

$$\text{Presión total} = \text{presión estática} + \text{presión de velocidad} \quad (11)$$

- **CH-3 "Análisis de gas para la determinación del peso molecular seco"**. Se extrae una muestra seca del gas en la chimenea, para analizar los porcentajes de Dióxido de Carbono (CO₂), Oxígeno (O₂) y Monóxido de Carbono (CO). Con estos datos, se determina el peso molecular. Este método puede realizarse con un analizador de gases de combustión o equipo Orsat (Echeverry, 2006).
- **CH-4 "Determinación de la humedad en los gases de la chimenea"** Se extrae una muestra de gas de la chimenea a una velocidad constante, la humedad es removida de la muestra de la corriente y es medida de manera volumétrica o gravimétrica (Echeverry, 2006).
- **CH-5 "Determinación de la emisión de partículas desde fuentes estacionarias"** Esta metodología permite determinar y caracterizar el flujo de gases en cuanto a presión, T°, velocidad y caudal, junto con determinar la concentración de material particulado total a partir de una succión isocinética en la fuente y colectado sobre un filtro de fibra de vidrio, lo que determinará con gravimetría, la concentración de MP.

La validación de un muestreo isocinético se efectúa verificando los resultados contra los parámetros de calidad exigidos por la metodología. Estos son:

- Isocinetismo dentro de rango, es decir, $90 \leq I \leq 110$ %. El coeficiente de isocinetismo se determina a través del cociente entre la velocidad de los gases y la velocidad de succión de la Boquilla de muestreo. La velocidad de succión de la boquilla queda definida de la siguiente forma:

$$I = \frac{V_b}{V_g} \quad (12)$$

- Caudal de muestreo $\leq 0.021 \text{ m}^3/\text{min}$
 - Caudal de fugas $< 0.57 \text{ L}/\text{min}$ ó el 4% de la velocidad media de muestreo (el que sea menor)
 - Volumen de muestreo superior a $0.6 \text{ m}^3 \text{ N}$, o $1 \text{ m}^3 \text{ N}$ si la concentración de particulado es inferior a $20 \text{ mg}/\text{m}^3 \text{ N}$.
- **CH-8 "Determinación de neblina Ácida y Dióxido de Azufre en fuentes estacionarias"**. Por medio de este método, la neblina ácida (incluyendo el SO_3) Y el Dióxido de Azufre son separadas por medio de titulación.

1.6. Planteamiento del problema

Debido a las dificultades técnicas y a la falta de recursos para realizar mediciones de contaminantes emitidos por las fuentes fijas, son ampliamente utilizados los factores de emisión como metodología de estimación en el marco de las normas de emisión.

Los factores de emisión fueron fijados a finales de los años 80 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, de acuerdo a la configuración de los equipos que participan en el proceso de la fundición. Sin embargo, ninguna configuración coincide plenamente con la disposición de equipos que se da en Chile en dicho proceso productivo. Es por esto, que por medio del presente seminario, se pretende evaluar algunos de los factores de emisión como instrumento para estimar emisiones de las fundiciones primarias de cobre, contrastando los valores resultantes de esta herramienta con la extrapolación de mediciones isocinéticas puntuales realizadas en las chimeneas de las fundiciones Ventanas y Potrerillos.

1.7 Hipótesis

Existen diferencias estadísticamente significativas entre las emisiones (de MP y SO_2) estimadas a través de factores de emisión y a través de mediciones continuas en chimeneas de funciones de cobre.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo General

Constatar la validez estadística de los factores de emisión disponibles en la Guía Metodológica como herramienta para estimar las emisiones de material particulado y Óxidos de Azufre en fundiciones primarias de cobre

1.8.2 Objetivos Específicos

- Establecer si hay diferencias significativas entre las mediciones de SO₂ y MP realizadas directamente en chimeneas de fundición, con las calculadas mediante factores de emisión.
- Determinar la calidad de las mediciones isocinéticas que se desarrollan en Chile, por parte de laboratorios y/o empresas ambientalmente certificados.
- Identificar falencias y vacíos en la normativa chilena, con respecto a la declaración de emisión de las fundiciones de cobre por parte de las declaraciones realizadas, en el marco del D. S N° 138/05 MINSAL.
- Corroborar las diferencias porcentuales, en la efectividad de abatimiento teórico definidos para los precipitadores electrostáticos, en relación con la efectividad de abatimiento experimental, calculado a través de emisiones antes y después de cada precipitador presente en la fundición.

II. METODOLOGÍA

2.1. Obtención de datos e informes de emisiones

2.1.1. Plataforma del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes del MMA

Se realizaron reuniones con el personal del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes del Ministerio del Medio Ambiente para definir el traspaso de la información y los datos que serían utilizados para realizar este seminario. Para ello, se solicitaron las bases de datos asociadas a las declaraciones que realizan las fundiciones de cobre, a través del formulario electrónico para la declaración de emisiones de fuentes fijas, administrado por el Ministerio de Salud, entidad que año a año informa los datos al Ministerio del Medio Ambiente (MMA).

Se obtuvo desde el MMA una base de datos de las declaraciones, que incluían los niveles de actividad anuales declarados por cada unidad de emisión, y además, los informes de mediciones de las fundiciones Ventanas y Hernán Videla Lira. Sin embargo, la información provista era insuficiente para los objetivos que persigue este estudio, puesto que se trataba de dos informes de mediciones para fundición Ventanas y uno para la fundición Hernán Videla Lira, lo que dificultaría el número de mediciones para comparar.

Se revisó además la información disponible en el Ministerio de Salud, por medio de una reunión con el encargado de contaminación atmosférica, para determinar los datos de utilidad para el análisis del presente seminario, ya que se trabajó sólo con algunas de las unidades de emisión de la fundición.

2.1.2. Reunión Walter Folsh. Encargado de Programa de Contaminación Atmosférica del Ministerio de Salud

El Decreto Supremo N°138 pese a ser parte de la plataforma del RETC, corresponde a un sistema sectorial en el que gran parte de la información que allí se recopila, es administrada y fiscalizada por el Ministerio de Salud, específicamente por el Departamento de Salud Ambiental. Walter Folsh es el encargado del Programa de

Contaminación Atmosférica, por lo que tiene directa relación con el sistema sectorial asociado a la declaración de fuentes fijas.

Se investigó con el entrevistado acerca de algunas inconsistencias encontradas en las bases de datos presentes en el Ministerio del Medio Ambiente y además, acerca de la fiscalización que se desarrolla en cuanto al Decreto Supremo N° 138. Por otro lado se solicitó información más detallada, en cuanto a los niveles de actividad mensuales, horas de funcionamiento mensuales de cada unidad de emisión e incluso una mayor extensión temporal de mediciones isocinéticas por parte de las fundiciones de cobre existentes en el país.

2.1.3. Visita a fundición Ventanas

Luego de obtener información por parte de las autoridades ambientales, se contactó al encargado de medio ambiente de la fundición Ventanas de CODELCO con la finalidad de realizar una visita a terreno para conocer de forma práctica el proceso operativo de la fundición. Se autorizó una visita el día miércoles 20 de abril en las instalaciones de la fundición Ventanas, ubicada en Ruta F-30E N° 58270 Puchuncaví.

Se entrevistó al encargado de medio ambiente de la fundición acerca de detalles técnicos propios del proceso y de las mediciones isocinéticas enmarcadas en el plan de descontaminación dictado por medio del Decreto Supremo N° 252 en diciembre de 1992 por el Ministerio de Minería. Para colaborar con el análisis desarrollado en este estudio, la empresa de CODELCO entregó las mediciones isocinéticas desde el año 2012 al 2015.

Se recorrió las instalaciones de la fundición, principalmente los hornos convertidores, la planta de ácido y la planta de secado, con el objetivo de observar la configuración de los equipos y su forma de operar en terreno.

2.2. Fundiciones seleccionadas para el estudio

Se seleccionó dos fundiciones, por presentar declaraciones aceptadas por el Ministerio de Salud y contar con mayor cantidad de informes de mediciones isocinéticas.

2.2.1. Fundición Ventanas

El complejo CODELCO División Ventanas se encuentra ubicado en la bahía de Quintero, comuna de Puchuncaví en la Quinta Región, a una distancia de 150 km de Santiago. Esta industria inició sus operaciones el 30 de septiembre de 1964, como una de las principales industrias que formaban parte de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI). Sin embargo, el año 2005 se integra a la Corporación Nacional del Cobre.

2.2.1.1. Configuración tecnológica

Está constituida por:

- Horno secador rotatorio Fuller (60 ton/hora)
- Convertidor Teniente (4 m Ø y 15 m L)
- Tres Convertidores Pierce Smith (3 m Ø y 8 m L)
- Horno Eléctrico para el tratamiento de escoria del CT
- Tres unidades de refino (dos tipo reverbero y una basculante)
- Planta de ácido de doble contacto y absorción, potenciada recientemente en volumen y concentración.

Su configuración tecnológica se resume en el esquema representado en la

Fig.8

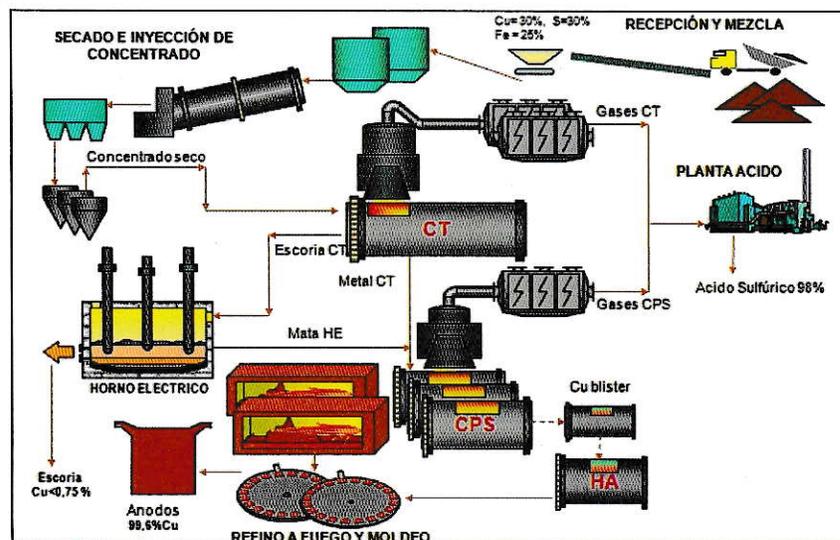


Figura 8: Diagrama operacional fundición Ventanas.
(Fuente: Presentación CODELCO, 2011)

2.2.2. Fundición Potrerillos

Parte de la División Salvador de CODELCO, está ubicada en la Región de Atacama, Chile. Esta fundición opera desde el año 1927 y cuenta con una capacidad de tratamiento de concentrado superior a 500.000 ton/año de Cobre (SMA, 2013).

2.2.2.1. Configuración tecnológica

Los equipos que componen esta fundición al año 2010 son:

- Secador: una planta de lecho fluidizado con un secador de 125 t/hr que disminuye la humedad de un 9% a un 0,2%
- Convertidor Teniente de 5 metros de diámetro y 22 m Largo.
- Tres Convertidores Pierce Smith de 4 m de diámetro y 9,1 m Largo
- Tres Hornos eléctricos de Limpieza de Escoria para el tratamiento de escoria
- Dos hornos basculantes Refino
- Una planta de ácido de simple contacto (COPRIM,2012)

El esquema operativo de la fundición Potrerillos se representa en la Figura 9.

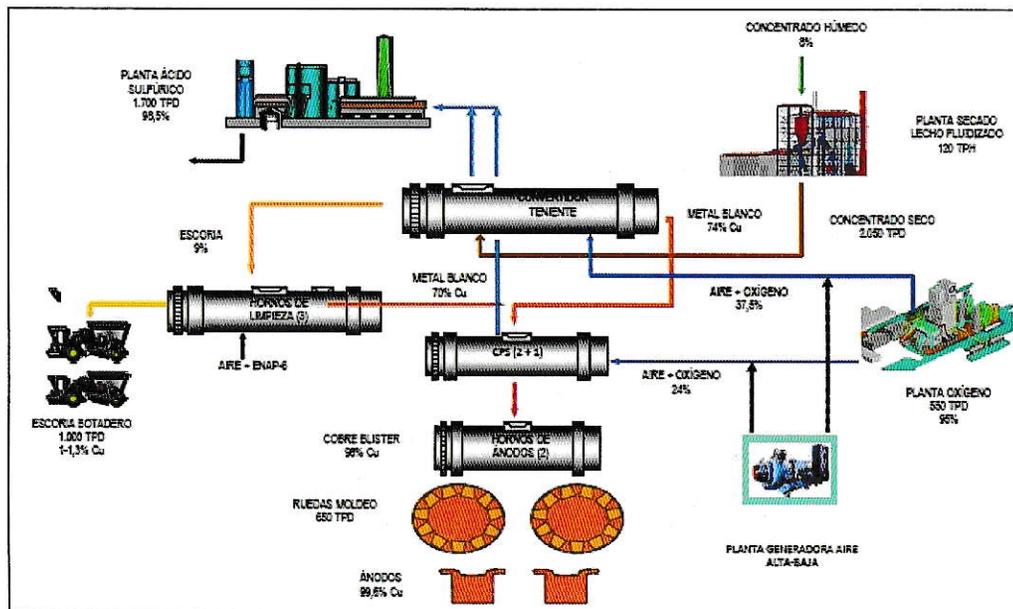


Figura 9: Diagrama operacional fundición Potrerillos. (Fuente: Presentación USACH)

2.3. Metodología de estimación de emisiones a través de FE

Los factores de emisión usados para calcular las emisiones que aparecen en la guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas, son los que se explicitan en la tabla N°14.

Tabla N°14: Factores de emisión utilizados en Chile para estimar emisiones.

Fuente emisora	Factor de emisión MP (kg/ton de concentrado)	Factor de emisión SO ₂ (kg/ton de concentrado)
Horno de secado de concentrado (CCF8 30300506)	5	0,5
Horno convertidor (CCF8 30300504)	18	300

Para realizar el cálculo de la estimación, se clasifica cada uno de los equipos que conforman la fundición con un código de clasificación de fuente o CCF8, dentro del cual, el horno secador de lecho fluidizado coincide con la clasificación del horno de secado de concentrado. El CT y el CPS, están dentro de la clasificación de hornos convertidores. Es preciso mencionar, que dichos códigos de clasificación de fuente no fueron asignados arbitrariamente para este estudio, sino que son los códigos con los que se declara cada unidad de emisión en el formulario electrónico para la declaración de emisiones de fuentes fijas.

Tal como se explicó anteriormente, en el sistema de declaración web, para estimar la emisión a través del factor de emisión y nivel de actividad, este último tiene definido un parámetro que, para la gran mayoría de las unidades de emisión, corresponde a "concentrado de cobre seco", lo que ocasiona dificultades cuando las fundiciones declaran para el convertidor Pierce Smith, "Cobre Blíster" o "metal blanco", ya que no se produce estimación automática en dicha unidad emisora, por lo que se deben estimar de forma manual.

Se estimó las emisiones de SO₂ y MP a través de la fórmula 10, utilizando el nivel de actividad (NA) mensual declarado por cada fundición de cobre, a través del formulario electrónico para la declaración de emisiones de fuentes fijas,

correspondiente a los meses en que datan las mediciones isocinéticas. Es decir, si la campaña de mediciones se realizó el mes de enero del año 2013, se utilizará para las estimaciones, el nivel de actividad declarado en éste mes. Las declaraciones realizadas en el formulario son anuales, pero los valores se informan de forma mensual.

Un ejemplo de aplicación del factor de emisión, utilizando la ecuación 10 mencionada en la introducción, es el siguiente:

Ejemplo de aplicación:

Fuente: Horno convertidor Teniente.

Equipo de control: Precipitador electrostático

Producción mensual declarada: 61.379 ton/mes

Desarrollo:

- Como se indica en la tabla 14 el FE para calcular la emisión de material particulado del horno convertidor es 18 kg/ton concentrado
- Debido a que la fuente cuenta con un Precipitador electrostático, a este equipo se le confiere un porcentaje de abatimiento teórico del 98%.

Por lo tanto, al aplicar los valores mencionados en la fórmula antes descrita, resulta lo siguiente:

$$E = ((FE * 61.379 \text{ ton/mes}) * (1 - 0,98/100)) / 1000 \text{ en t/año de emisión}$$

$$E = ((18 * 61.379 \text{ ton/mes}) * (1 - 0,98/100)) / 1000$$

$$E = 22,096 \text{ t/mes}$$

En relación al cálculo anterior, se estima que bajo las condiciones antes descritas, el convertidor Teniente emitirá **22,096 toneladas de material particulado al mes.**

2.4. Mediciones Isocinéticas de gases

2.4.1. Fundición Ventanas

Los informes de mediciones isocinéticas otorgadas para fines de este estudio son 6 desde el año 2012 al 2015. Sin embargo, como en la información otorgada por el Ministerio del Medio Ambiente no estaban incluidas las declaraciones del año 2015, se utilizaron los datos correspondientes hasta el año 2014 para fines de comparación.

Las chimeneas en torno a las cuales se desarrollan los muestreos isocinéticas son:

- Ducto a chimenea, después del precipitador electrostático de horno eléctrico.
- Ducto de salida de planta de secado de concentrado luego de filtro de mangas.
- Chimenea de planta de ácido.
- Ducto de evacuación Tolva 500
- Chimeneas hornos de Refino y Basculante
- Chimeneas de calderas generadoras de vapor, Kewanee.

En el marco del Plan de Descontaminación de Ventanas no se exige mediciones en ductos de los hornos convertidores CT ni CPS, ya que estos no descargan directamente a la atmósfera, sino que sus emisiones son dirigidas hacia la planta de ácido, desde donde serán emanadas a la atmósfera a través de la chimenea principal de la planta. Por lo tanto, se exigen mediciones en este punto de descarga.

Debido a que no se realizan mediciones isocinéticas directamente en los ductos de los hornos, solo se utilizarán los valores relativos al ducto de salida de la planta de secado, reconociendo que en esta fundición opera un horno de tipo rotatorio para eliminar la humedad del concentrado de cobre. En la Fig.10, se aprecia un profesional a punto de realizar la medición en un ducto inmediatamente después del filtro de mangas, instalado luego del secador rotatorio.

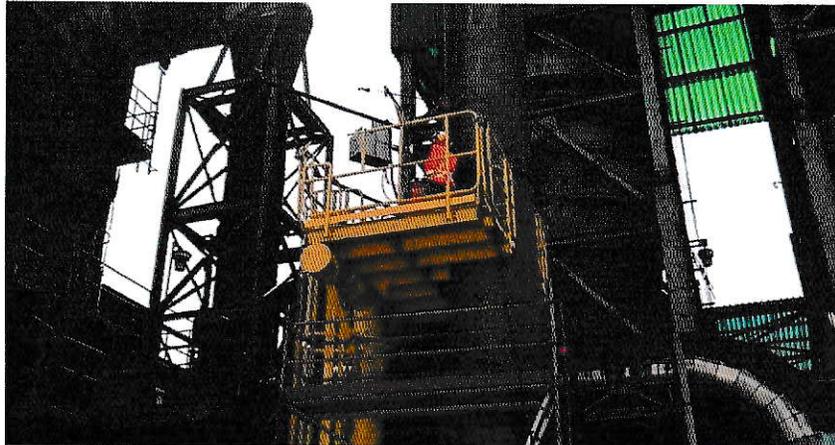


Figura 10: mediciones isocinéticas de material particulado en planta de secado mediante método CH-5.

Los cuadros que incluyen las mediciones se dividen por unidad emisora, donde cada una de las columnas contiene un resumen de los parámetros medidos cada semestre:

Tabla 2: cuadro resumen de las mediciones semestrales en fundición Ventanas.

HORNO SECADO		1_er SEM.	2° SEM.
FLUJO GASES (bs)	[Nm ³ /h]	45,545	36,261
CONC. POLVO EN GAS (bs)	[mg/Nm ³]	13,13	16,80
UTILIZACION p/SECADO	[%]	82,17	92,33
DÍAS DETENCIÓN	[c/u]	32,3	14,11
DÍAS SEMESTRE	[días]	181	184
Nº DÍAS AÑO	[días]	365	365
EMISIÓN HORARIA	[kg/h]	0,60	0,61
TOTAL EMITIDO POR DÍA	[kg/día]	14,3	14,62
EMISIÓN SEMESTRE	[ton/sem]	2,132	2,483
EMISIÓN ANUAL H. SECADO	[ton/año]		4,615

2.4.2. Fundición Potrerillos

Los muestreos isocinéticos de gases en la fundición Potrerillos fueron realizados por la unidad de Gestión Metalúrgica de CIMM T&S S.A hasta la primera campaña del año 2012. Las siguientes campañas fueron realizadas por la empresa de Servicios Ambientales e Higiene Ocupacional (SERCOAMB). Esta entidad también es la encargada de las mediciones realizadas en la fundición Ventanas, cuyo objetivo es

cuantificar la emisión de material particulado y caracterizar químicamente los gases y polvos generados por los equipos de la fundición en una jornada de trabajo normal.

Los informes de mediciones incluyen en su primera parte, un cuadro resumen donde aparece el valor promedio de todas las mediciones realizadas por cada campaña, en el periodo de tiempo en los que se realiza la campaña de mediciones.

Cada campaña de mediciones tiene una duración aproximada de 10 días, en los que el laboratorio o la empresa certificada dedica distintos días a cada equipo de la fundición.

Los equipos en los que se miden las emisiones de gases son: chimenea de convertidores, chimenea planta de ácido, chimenea de hornos de ánodos en etapa de oxidación y reducción, chimenea de los hornos de limpieza de escoria en etapa de reducción y chimenea de planta de secado flúosólido, con el propósito de cuantificar la emisión de material particulado e impurezas contenidas en los gases evacuados.

La caracterización de los gases consiste fundamentalmente en determinar: caudal, temperatura, presión estática, composición por SO₂, CO₂ y O₂, contenido de material particulado y humedad. Los resultados de caudal, concentración de Material Particulado e impurezas se normalizaron a 25°C y 1 atmósfera de presión.

En el cuerpo del informe aparece separada por equipo de emisión, cada una de las corridas de mediciones que se efectúan por equipo, las horas en las que fueron realizadas y un detalle de cada variable medida.

2.5. Estimaciones a través de mediciones isocinéticas para el MP

Para el material particulado, no se utiliza directamente los valores de emisión de la tabla, sino la concentración (mg/Nm³) y el caudal de gases seco (Nm³/h), de manera de calcular la emisión horaria, de manera más precisa.

$$EMP \left(\frac{\text{mg}}{\text{h}} \right) = [\text{MP}] * QNS \quad (13)$$

Dónde:

EMP=Emisión de Material Particulado

[MP]=Concentración de Material Particulado mg/ Nm³

QNS= Caudal Normal de gas seco Nm³/h

Tanto para el MP como SO₂, una vez que se obtiene el promedio de la emisión horaria medida en kg/h, a partir de las 3 corridas de mediciones realizadas por el laboratorio, se multiplica dicho valor por la cantidad de horas que el equipo opera al mes, y finalmente, se dividió por 1000 como factor de conversión para transformar de kg a ton.

2.6. Estimaciones a partir de mediciones isocinéticas para el SO₂

En relación al SO₂ hubo casos en que las concentraciones venían expresadas en %v y en PPM. Por lo tanto, para convertir a unidades de emisión se utiliza la siguiente formula.

$$E = \frac{C \cdot MM \cdot Q}{VM \cdot 1000} \quad (14)$$

Dónde:

E=Emisión de SO₂ (kg/h)

C= Concentración de SO₂

MM= Masa molar del SO₂ (64 g/mol)

Q= Caudal de gas seco (m³N/h)

VM=Volumen molar del SO₂ en condiciones normales (0,024 m³/mol aire)

2.7. Eficiencia de tecnologías de abatimiento

En general, las fundiciones de cobre disponen de un sistema de manejo de gases que consta de sistemas de captura de gases primario con succión de una planta de ácido con ayuda de Ventiladores de Tiro Inducido (VTI).

En relación a la operación de secado, el sistema de control de material particulado consta de filtros de manga en la descarga del secador de lecho fluidizado y transporte de concentrado seco.

Por lo tanto, el porcentaje de eficiencia de abatimiento se considera netamente en los cálculos de emisiones de material particulado, al que se le atribuye una eficiencia teórica de 98% para los precipitadores electrostáticos y de un 95% para el filtro de manga.

Para determinar la eficiencia de abatimiento real de los equipos se evaluaron las mediciones realizadas antes y después de cada uno de los precipitadores electrostáticos de la fundición Potrerillos, contenidas en los informes de mediciones, de manera de corroborar la eficiencia teórica que se le ha asignado a este equipo. Para esto, se utilizaron los valores de emisión horaria de material particulado, calculados a la entrada y salida de cada precipitador, donde se determinó un porcentaje de abatimiento experimental. Los puntos de muestreo, se esquematizan en la fig. N°11.

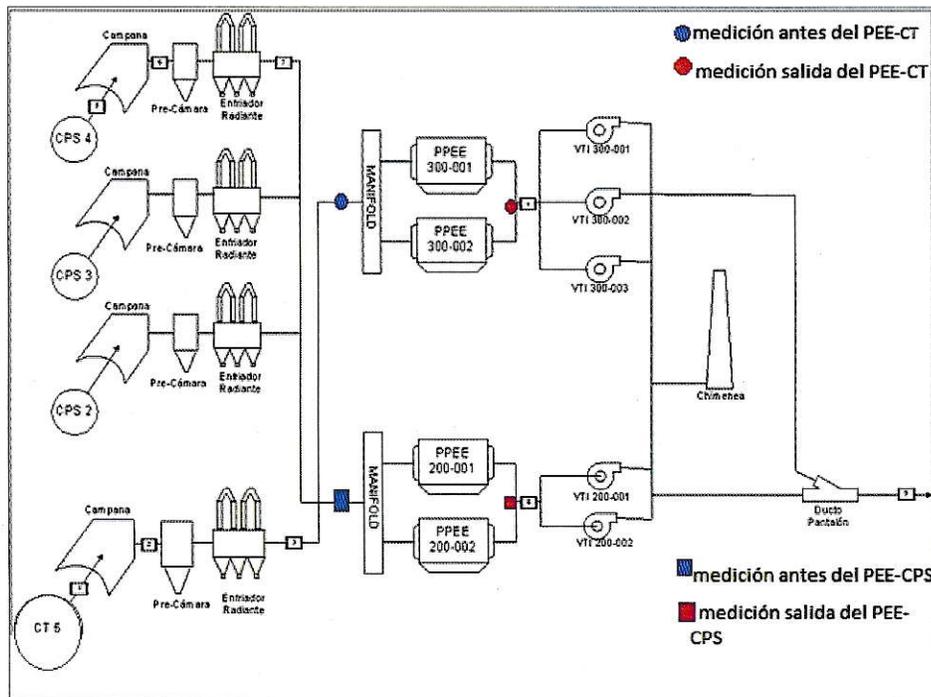


Figura 11: Puntos de muestreo efectuados antes y después de los PEE presentes en los convertidores Teniente y Pierce Smith

Para determinar el porcentaje de eficiencia de abatimiento experimental a través de los valores de emisión medidos en los precipitadores electrostáticos secos, se utilizó la fórmula 15.

$$\% EA = 100 - \frac{(100 * \text{emisión de salida del PEE})}{\text{Emisión antes del PEE}} \quad (15)$$

2.8. Análisis Estadístico

Para cada fundición, se compilan en una tabla resumen, todos los valores obtenidos de las estimaciones mensuales mediante mediciones isocinéticas horarias y las que surgen al usar el factor de emisión. En la fundición Ventanas se compara las estimaciones resultantes de ambas metodologías para el secador rotatorio. Mientras que en Potrerillos, se considera el secador de lecho fluidizado y los convertidores Teniente y Pierce Smith.

En relación a las mediciones isocinéticas de la fundición Potrerillos, los informes de muestreos isocinéticas consideran a las tres unidades estudiadas, ocasionando que las unidades de emisión dispongan de 4 valores promedio de emisión al año.

Como se explicó al principio, una de las columnas de la tabla tendrá el promedio calculado a partir de la emisión medida (ton/mes) determinada en base a las distintas emisiones horarias medidas por equipo, donde para fines prácticos y debido a que no tenemos más de una medición al mes, el supuesto será que el promedio de las mediciones obtenidas en un día en particular es fija para todo ese mismo mes. A modo de ejemplo, la siguiente tabla representará la forma de organizar los datos para luego hacer un análisis correspondiente a cada unidad de emisión.

Tabla 3: Resumen de estimaciones para determinar si existen diferencias significativas entre ambos grupos de datos.

Equipo	Contaminante	Fecha	Emisión medida (ton/mes)	Emisión estimada con FE (ton/mes)
Secador	MP	Mar-11	X1	Y1
Secador	MP	Ago-11	X2	Y2
Secador	MP	Sept-11	X2	Y3

La tabla 3 muestra las estimaciones realizadas para tres meses en los que había informes de mediciones, ya que pese a que en la fundición se realizan cuatro campañas por año, no todos los informes presentan la totalidad de las mediciones de los equipos de la fundición, sino que hay pequeñas variaciones.

Por su parte, con respecto a la fundición Ventanas, como los muestreos isocinéticos se deben informar a las autoridades de manera semestral, se tendrá dos mediciones por año, donde se definió que cada una sería representativa de una emisión horaria correspondiente a los meses de mayo y diciembre desde el año 2012 al 2014, ya que los informes así lo explicitan.

Para realizar el análisis estadístico se utilizó el software STATGRAPHICS Centurión XVI en español. Por medio de este programa, se ingresaron los datos de emisiones estimadas por FE y mediciones isocinéticas en unidades de toneladas de concentrado de cobre por mes, para cada unidad de emisión y separados por contaminante. Por lo que al final se realizaron 7 análisis independientes.

Se ingresaron al programa dos columnas; la primera contenía un código haciendo alusión a la metodología de estimación y el contaminante analizado, las que correspondían a MP-EM (Medición de MP estimada a través del FE) Y MP-EE (Emisión medida de MP). La segunda columna tendría el valor de emisión estimado, en toneladas mensuales por medio de cada metodología.

Como los datos provienen de un proceso de medición y/o estimación, fue preciso corroborar si estos poseen un modelo normal de distribución de probabilidades para luego, discriminar entre cual análisis estadístico o prueba de hipótesis usar. Para esto, se utilizó el test de Shapiro Wilk, ya que la única condición de este test, es que el tamaño de la muestra sea menor igual o inferior a 50 (Rial y col., 2008). La hipótesis nula que se plantea mediante este test, es que la población de datos se ajusta a un modelo de probabilidad normal, por otro lado, la hipótesis alternativa plantea que el supuesto de normalidad no es cierto. Se rechazó la hipótesis nula para cualquier valor p (p -value) que sea menor al nivel de significancia, que en este caso corresponde a 0,05. Los valores p arrojados por el test pueden ir desde 0 a 1.

Este test opera ordenando los datos de menor a mayor y los compara con datos estadísticos que siguen una distribución normal utilizando mínimos cuadrados. Cuando los datos presentaron una distribución normal, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) para determinar si efectivamente existían diferencias significativas entre ambas metodologías de estimación de emisiones. En caso contrario, se utilizó una alternativa no paramétrica llamada prueba de Kruskal Wallis que evalúo si las

diferencias entre las medianas de cada grupo de datos relativos a las metodologías de estimación eran o no significativas con un 95% de confianza. En caso de obtener un valor p mayor a 0,05 se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que ambas metodologías de estimación de emisiones arrojaron resultados significativamente diferentes.

Por último, se aplicó la prueba que se conoce como "contraste de mínima diferencia significativa (LSD) de fisher", que se utilizó a posteriori, una vez que el análisis de varianza ha resultado significativo, y opera de forma similar a la t -student, pero empleando la media cuadrática intergrupos como estimador de la varianza poblacional. De este modo se aprovecha el agrupamiento de las varianzas de todas las muestras y de los grados de libertad que se combinan por medio de las mismas (Vargas, 1995)

III. RESULTADOS Y DISCUSION

A partir de los antecedentes recopilados para el desarrollo de este seminario, se abordarán de forma separada, las metodologías de cuantificación de contaminantes como son: el promedio de mediciones isocinéticas en las unidades o equipos de emisión de este estudio (secadores de concentrado de cobre, convertidores Teniente y Pierce Smith) y las estimaciones de emisión de material particulado y Dióxido de Azufre que resultan a través de los factores de emisión definidos para cada unidad de emisión en Chile e incorporados en una guía metodológica diseñada para la estimación de emisión de fuentes fijas.

3.1. Mediciones

3.1.1. Fundición Ventanas

Referente al cumplimiento del Plan de Descontaminación Atmosférica de Ventanas definido en el artículo 8° del Decreto Supremo N° 252, la fundición debe entregar a la autoridad informes semestrales que contienen los valores promedio de las mediciones isocinéticas realizadas en las chimeneas de la industria por cada campaña de mediciones (MINMINERIA, 1993). Es por esto, que los especialistas en el área metalúrgica junto con las empresas que realizan las mediciones, determinan una emisión horaria para cada chimenea y la extrapolan al semestre, considerando las horas de funcionamiento de cada unidad emisora.

3.1.1.1. Secador rotatorio

Los meses en que ocurren las mediciones son generalmente dos veces al año: en mayo y diciembre, para posteriormente ser informados en julio y en enero a las autoridades en el marco del plan de descontaminación.

Tabla 4: Mediciones isocinéticas de MP en secador rotatorio, fundición Ventanas

Unidad de emisión	Año	Mes	Caudal normal seco (m ³ N/h)	Emisión MP (kg/h)
Secador rotatorio	2012	Julio	41.803	3,973
Secador rotatorio	2012	Diciembre	42.318	1,993
Secador rotatorio	2013	Julio	45.545	0,592
Secador rotatorio	2013	Diciembre	36.261	0,614
Secador rotatorio	2014	Julio	37.235	0,692
Secador rotatorio	2014	Diciembre	39.954	0,581

Las emisiones de material particulado ocurridas en esta parte del proceso de fundición, se deben principalmente a los gases secundarios producto del Azufre que contiene el combustible con que opera dicho equipo y del MP de la ineficacia de los sistemas de recolección de polvos como el filtro de mangas (COPRIM, 2012).

3.1.2. Fundición Potrerillos

En el marco del plan de descontaminación definido por medio del D.S. N° 179 el año 1999, se estipula que la fundición Potrerillos debe presentar informes trimestrales al Servicio de Salud de Atacama por lo cual, esta industria está obligada a realizar campañas de mediciones cada tres meses (MINSEGPRES, 1999).

Considerando que en este estudio se abordan 3 de las unidades en las que se desarrollan parte del proceso de fundición, no serán analizadas la totalidad de mediciones isocinéticas realizadas en cada campaña, sino sólo las que dicen relación con este trabajo: secador de lecho fluidizado, convertidores Teniente y Pierce Smith.

Es preciso mencionar que los valores resultantes de las mediciones isocinéticas, se presentan en tablas para cada unidad emisora. Cada tabla consta de una corrida de dos o tres mediciones, realizadas dentro del mismo día, pero a distintas horas, en un ducto definido para cada unidad de emisión de la fundición.

Dentro de los informes, gran parte de las mediciones vienen expresadas en unidades de concentración (%v o ppm), con unidades diferentes para el Dióxido de Azufre y el material particulado (mg/m³N), separados por contaminante y por equipo o unidad de emisión. Es por esto, que a fin de estandarizar las unidades de medida, se

realiza la conversión de unidades de concentración a unidades de emisión para cada contaminante a través de las ecuaciones (13) y (14).

3.1.3 Secador de Lecho Fluidizado

En la tabla 5 se presentan los resultados de las emisiones mensuales estimadas a partir de las mediciones isocinéticas horarias presentes en la tabla 1 (ver anexo) y las horas de funcionamiento declaradas para el secador de lecho fluidizado en la fundición Potrerillos.

Tabla 5: Emisión mensual de MP calculada para el secador de lecho fluidizado.

Año	Mes	Promedio medición horaria MP (kg/hora)	Horas funcionamiento	Emisión mensual secador MP (ton/mes)
2011	Marzo	3,596	744	2,676
2011	Agosto	2,271	744	1,689
2011	Septiembre	14,661	720	10,556
2012	Enero	4,812	744	3,580
2012	Marzo	3,929	456	1,791
2012	Octubre	4,568	672	3,069
2012	Diciembre	7,334	720	5,281
2013	Marzo	18,655	744	13,880
2013	Mayo	10,546	744	7,846
2013	Octubre	7,069	744	5,259
2013	Diciembre	20,774	744	15,456

Por otra parte, también se calcularon las emisiones mensuales para el Dióxido de Azufre que emana del proceso de secado del concentrado de cobre seco, las que se muestran en tabla N°6. Es preciso mencionar, que dentro de la tabla 1 (ver anexos), hubo emisiones de SO₂ que no fueron considerados dentro de esta tabla resumen, ya que presentaban valores muy inferiores al resto de las emisiones medidas en el mismo equipo ocasionando que dichos muestreos no sean representativos. Estas corresponden a los meses de diciembre de 2012, y los meses de marzo y diciembre del año 2014.

Al comparar los porcentajes de isocinetismo contenidos en los informes de mediciones, estos representan un 90%, 92% y 91% para los meses en cuestión,

mientras que todo el resto de las mediciones, presenta porcentajes por sobre 97% por lo que también es uno de los factores que influyen en esas bajas.

Tabla 6: Emisión mensual de SO₂ calculada para el secador de lecho fluidizado

Año	Mes	Promedio medición horaria de SO ₂ (kg/hora)	Horas funcionamiento	Emisión mensual (ton/mes)
2011	Agosto	85,826	744	63,854
2011	Septiembre	164,380	720	118,353
2012	Enero	155,399	744	115,617
2012	Marzo	54,399	456	24,806
2012	Octubre	131,140	672	88,126
2013	Junio	47,176	720	35,099
2013	Octubre	31,7359	744	23,611

Los secadores de concentrado de cobre, son la unidad emisora que presenta mediciones más bajas de MP y SO₂. Estas bajas emisiones medidas, se atribuyen a que el proceso de secado del concentrado de cobre ocurre a una temperatura máxima de 120°C por lo que no alcanzan a desarrollarse reacciones de oxidación del Azufre (se dan sobre los 300° C) y de descomposición del concentrado de cobre. Las temperaturas no sobrepasan dicho rango, ya que de lo contrario, se da lugar a la formación de vapores de elementos volátiles no deseados (As, Hg y otros).

Por lo tanto, en el proceso de secado, a diferencia de los demás procesos que ocurren a temperaturas muy superiores, los vahos producidos son mayormente el polvo arrastrado del concentrado de cobre y vapor de agua desprendido del mismo, las cuales son recuperadas por medio de un filtro de manga, para posteriormente ser almacenadas en tolvas (CODELCO,2013a). El SO₂ emitido en esta parte del proceso proviene en su mayoría, del combustible con que funcionan los quemadores del secador, ya que estos últimos funcionan en base a una mezcla de petróleo-aire para calentar el plato de la cámara de secado, conduciendo el calor a través de una gravilla contenida en la cámara de combustión (Gutiérrez, 2002).

3.1.2.1. Convertidor Teniente

En tabla N° 7, se muestra el promedio de cada corrida de mediciones, las horas de funcionamiento declaradas para dicha fuente, en el mismo mes en que fue realizada dicha medición y en la última columna, la emisión mensual calculada.

Tabla 7: Emisiones mensuales de MP calculadas para el convertidor Teniente

Año	Mes	Promedio medición horaria MP (kg/hora)	Horas funcionamiento	Emisión mensual (ton/mes)
2011	Marzo	166,667	744	123,993
2012	Enero	135,192	744	100,583
2012	Marzo	148,978	456	67,934
2012	Diciembre	151,441	744	112,672
2013	Julio	132,563	744	98,627
2013	Diciembre	99,357	744	73,922

Las mediciones horarias de MP en el mes de mayo del año 2012 (tabla 2, ver anexo), no fueron incluidas en las emisiones de la tabla N° 6 porque el valor promedio fue de 18,65 kg/ hora, mientras que todos los demás promedios, superaban los 99,357 kg/hora, por lo que se escapa del promedio y posee poca representatividad.

En la tabla 8, se presenta las emisiones mensuales de SO₂ calculadas:

Tabla 8: Emisiones mensuales de SO₂ calculadas para el convertidor Teniente

Año	Mes	Promedio medición horaria SO ₂ (kg/hora)	Horas funcionamiento	Emisión mensual SO ₂ (ton/mes)
2011	Marzo	28797,308	744	21425,197
2012	Enero	45648,797	744	33962,705
2012	Marzo	28797,308	456	13131,573
2012	Mayo	40152,459	744	29873,429
2012	Diciembre	33105,853	744	24630,755
2013	Julio	37406,371	744	27830,340
2013	Diciembre	28448,487	744	21165,674

3.1.2.2. Convertidor Pierce Smith

En la tabla 9, se muestra las emisiones horarias promedio de MP, calculadas a partir de las distintas corridas de mediciones de material particulado realizadas con el CH-5 para el convertidor Pierce Smith, presentes en la tabla N°3 (ver anexo). Además, se muestran las horas de funcionamiento por equipo declaradas por los titulares de la fundición Potrerillos y las emisiones mensuales estimadas para este convertidor. Sin embargo, no se incluyó el promedio de mediciones para el mes de mayo del año 2012, por el mismo motivo que no se consideró en el CT, ya que correspondían a valores muy inferiores con respecto a los demás, lo que no es casualidad que suceda en dos unidades de emisión diferentes ya que esta corrida de mediciones fue realizada por un laboratorio distinto al de los demás informes, por lo que puede atribuirse a una falla en el método o las condiciones de la medición.

Tabla 9: Emisiones mensuales de MP calculada para el convertidor Pierce Smith

Año	Mes	Promedio medición horaria de MP (kg/hora)	Horas funcionamiento	Emisión mensual MP (ton/mes)
2011	Marzo	44,782	744	33,318
2012	Enero	38,184	744	28,409
2012	Marzo	44,782	456	20,421
2012	Mayo	4,505	744	3,352
2012	Diciembre	55,435	744	41,243
2013	Julio	56,992	744	42,402
2013	Diciembre	33,251	744	24,739

Por otro lado, a partir de las emisiones horarias de SO₂ medidas en chimenea a través del método CH-8 detalladas en la tabla N°3 (anexos), se calcularon las emisiones mensuales que emanaban por los ductos del convertidor Pierce Smith. Dichas emisiones se detallan en la tabla N°10.

Tabla 10: Emisiones mensuales de SO₂ calculada para el convertidor Pierce Smith

Año	Mes	Promedio medición horaria SO ₂ (kg/hora)	Horas funcionamiento	Emisión mensual SO ₂ (ton/mes)
2011	Marzo	19997	744	14877,871
2012	Enero	18209	744	13547,913
2012	Marzo	19996	456	9118,696
2012	Mayo	15686	744	11670,548
2012	Diciembre	14201	744	10565,336
2013	Julio	16440	744	12231,304
2013	Diciembre	15550	744	11569,265

En la tabla 10 se observó que las emisiones mensuales de SO₂ del CPS son inferiores a las estimadas en el convertidor Teniente (tabla 8), lo que se atribuye a que la producción de este compuesto va disminuyendo, a medida que el Azufre presente en el concentrado de cobre va reaccionando en cada etapa. Es decir, las emisiones irán disminuyendo a medida que se avanza en el proceso de fundición, ya que los gases sulfurosos circulan en concentración decreciente durante el ciclo. Mismo caso, sucede con el material particulado, sobre todo si consideramos que el SO₂ es el principal precursor de MP_{2,5}.

Si bien en el Convertidor Pierce Smith no se producen las mayores emisiones de Material Particulado ni de Dióxido de Azufre, se considera que en esta unidad emisora se presentan la mayor cantidad de emisiones fugitivas, principalmente por los giros de los reactores fuera de la campana al cargar metal blanco proveniente del convertidor Teniente y también, al vaciar el Cobre Blíster hacia las próximas etapas (COPRIM, 2012) ocasionando que la boca salga fuera de la campana de gases, provocando emisiones de gases secundarios contaminantes como SO₂, As, MP.

Por otra parte, al observar las mediciones extrapoladas de los hornos secadores y los convertidores se puede evidenciar que las mayores emisiones de SO₂ y MP resultan del proceso de fusión que se lleva a cabo en el convertidor Teniente. Esto se debe a que en esta unidad de emisión se presentan las condiciones propicias para la oxidación del Azufre, ya que se alcanzan temperaturas de hasta 1200°C y además se inyecta aire enriquecido con Oxígeno a través de cañerías o toberas

directamente al concentrado fundido, provocando que el Hierro y el Azufre presentes en este material, reaccionen rápidamente formando Sulfuros (Wiertz, 2004)

3.1.3. Eficiencia de los equipos de abatimiento

En las tablas 11 y 12 se muestran todos los porcentajes de eficiencia calculados para cada una de las corridas de mediciones desarrolladas en los convertidores Teniente y Pierce Smith.

Tabla 11: Resumen de todos los porcentajes de eficiencia de abatimiento del PEE del CT de la fundición Potrerillos.

Eficiencia de abatimiento experimental	Año	mes
74,57	2011	Marzo
65,44	2011	Marzo
70,70	2011	Marzo
79,43	2012	Enero
78,58	2012	Enero
74,57	2012	Marzo
65,44	2012	Marzo
70,70	2012	Marzo
82,67	2012	Mayo
80,50	2012	Mayo
81,63	2012	Mayo
78,45	2012	Diciembre
81,69	2012	Diciembre
86,93	2013	Julio
86,24	2013	Julio
82,82	2013	Diciembre
79,56	2013	Diciembre
86,11	2014	Junio
87,31	2014	Junio
81,39	2014	Noviembre
81,02	2014	Noviembre



Tabla 12: Resumen de todos los porcentajes de eficiencia de abatimiento del PEE del CPS de la fundición Potrerillos.

Eficiencia de abatimiento experimental	Año	Mes
70,08	2011	Marzo
55,99	2011	Marzo
57,48	2011	Marzo
67,42	2012	Enero
71,97	2012	Enero
70,08	2012	Marzo
55,99	2012	Marzo
57,48	2012	Marzo
82,81	2012	Mayo
86,81	2012	Mayo
81,97	2012	Mayo
57,89	2012	Diciembre
57,25	2012	Diciembre
63,59	2013	Julio
68,65	2013	Julio
73,30	2013	Diciembre
76,69	2013	Diciembre
66,67	2014	Junio
77,71	2014	Junio
77,96	2014	Octubre
77,68	2014	Octubre

Luego, se determinó una eficiencia anual promedio para cada año, en base a todos los porcentajes de efectividad de abatimiento y su desviación estándar, calculados para cada uno de los precipitadores electrostáticos, de manera de evaluar la tendencia en el tiempo respecto a la efectividad de los equipos.

Tabla 13: Porcentaje de eficiencias experimentales anuales en el CT y CPS

Equipo	2011	2012	2013	2014
PEE CT	70,23 ± 4,58	77,37± 5,54	83,89 ± 3,40	83,96± 3,22
PEE CPS	61,18± 7,74	68,97 ± 11,79	70,56± 5,69	75,01 ± 5,56

Con respecto a los porcentajes de eficiencia de abatimiento promedio para los precipitadores electrostáticos presentes en los convertidores Teniente y Pierce Smith, representados en la tabla 13, se puede observar un incremento anual en las eficiencias promedio calculadas para ambos equipos en el periodo 2011-2014. Hecho que resulta contradictorio si se piensa que la efectividad en la captura de partículas por parte de estos equipos, generalmente decae a través del tiempo debido al deterioro y a las obstrucciones que sufren los filtros o sistemas de recolección de partículas al acumularse el material.

Sin embargo, la real explicación es que se realizaron mayor cantidad de mantenciones de los equipos de abatimiento y más acabadas, a través de la implementación de un "Proyecto Integral de Mejoramiento de Captación y Procesamiento de Gases" proyectados desde el año 2011 al 2014 (Codelco, 2011b) para lograr cumplir con la norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, que está enfocada en limitar y disminuir la emisión de SO₂, MP y arsénico logrando una mayor captura y captación de dichos contaminantes.

3.2. Estimaciones de emisiones a partir de Factores de emisión (FE)

3.2.1 Estimaciones para el secador rotatorio- Ventanas

Material Particulado

A continuación, se presenta un cuadro resumen con los niveles de actividad declarados en los meses en que se realizaron las mediciones isocinéticas, que serán determinantes en la estimación por medio de factor de emisión. Es preciso mencionar que este secador procesa alrededor de 60 toneladas de concentrado de cobre por hora, por lo tanto, considerando que este equipo presenta un promedio de horas de operación de aproximadamente 630 horas al mes, se procesan los niveles de actividad presentes en la siguiente tabla resumen.

Tabla 14: Estimaciones de MP determinadas a partir del factor de emisión

Año	mes	Nivel de actividad (ton concentrado)	Estimación emisión con EA (ton/mes)
2012	Mayo	38.229	9,557
2012	Diciembre	33.396	8,349
2013	Mayo	33.899	8,474
2013	Diciembre	35.041	8,760
2014	Mayo	36.961	9,240
2014	Diciembre	35.907	8,977

Las toneladas de concentrado de cobre procesadas en el secador rotatorio de Ventanas, son inferiores a las que entran al secador de lecho fluidizado de Potrerillos, ya en general esta fundición posee una mayor capacidad de producción, tal como se muestra en las capacidades nominales de producción de concentrado para el año 2010, en la tabla N°15.

Tabla 15: Capacidad nominal de concentrado por fundición, año 2010

Fundición	Capacidad nominal concentrado(кта)
Chuquicamata	1.650
Potrerillos	680
Ventanas	436
Caletones	1372
Altonorte	1.160
Chagres	660
HVL	350

(Fuente: Informe de evaluación de costos de escenarios regulatorios para una norma de emisión de fundiciones en Chile, COPRIM, 2012)

3.2.1.1. Estimaciones para el Secador de Lecho Fluidizado-Potrerillos

Material Particulado

Los niveles de actividad declarados para esta unidad de emisión en la fundición Potrerillos, van desde aproximadamente 30.000 toneladas de concentrado de cobre seco hasta 59.507 toneladas en los meses más productivos. En la tabla 16, se presentan las emisiones estimadas a través del factor de emisión y los niveles de actividad, donde una de las columnas presenta la emisión estimada sin considerar la variable EA (Efectividad de Abatimiento), ya que es la forma original en que realizan las declaraciones, donde no consideran el filtro de manga que está instalado en la planta para limpiar los gases emanados en esta parte del proceso.

En la columna final de la tabla, sí se considera el porcentaje de EA de un 95% de efectividad en la captura de MP, debido al filtro de manga instalado en dicho secador.

Tabla 16: Resumen de estimaciones de Material Particulado (MP)

Año	mes	Nivel de actividad (ton concentrado)	Estimación de emisión sin EA (ton/mes)	Estimación de emisión con EA (ton/mes)
2011	Marzo	55.491	277,455	13,873
2011	Agosto	51.841	259,205	12,960
2011	Septiembre	50.845	254,225	12,711
2012	Enero	56.299	281,495	14,075
2012	Marzo	29.964	149,82	7,491
2012	Octubre	51.325	256,625	12,831
2012	Diciembre	51.695	258,475	12,924
2013	Marzo	40.343	201,715	10,086
2013	Mayo	32.705	163,525	8,176
2013	Octubre	51.708	258,54	12,927
2013	Diciembre	59.507	297,535	14,877

Dióxido de Azufre

En las estimaciones de SO₂ no se considera un porcentaje de abatimiento (EA) porque dentro de este trabajo, sólo se analizaran los gases que emanan en las

unidades de emisión que forman parte del estudio y el proceso de limpieza de gases que ocurre en la planta de ácido de cada fundición. La tabla 17 muestra las emisiones de SO₂ mensuales que surgen a través de los niveles de actividad declarados en el secador de lecho fluidizado de la fundición Potrerillos.

Tabla 17: Resumen de estimaciones de Dióxido de Azufre.

Año	Mes	Nivel de actividad (ton concentrado)	Estimación emisión SO ₂ (ton/mes)
2011	Agosto	51.841	25,921
2011	Septiembre	50.845	25,423
2012	Enero	56.299	28,150
2012	Marzo	29.964	14,982
2012	Octubre	51.325	25,663
2012	Diciembre	51.695	25,848
2013	Marzo	40.343	20,172
2013	Junio	22.417	11,209
2013	Octubre	51.708	25,854
2013	Diciembre	59.507	29,754

En la tabla 17, el mes de Junio del año 2013 presenta niveles de actividad muy por debajo del resto de los meses porque en esa fecha se realiza mantención a los equipos de la fundición por un periodo de aproximadamente 10-15 días.

3.2.1.2. Estimaciones para el Convertidor Teniente-Potreriillos

Material Particulado

Las estimaciones se realizan considerando el 98% de EA del precipitador electrostático que hay a la salida del CT. Estas emisiones estimadas, se contrastarán con las mediciones isocinéticas obtenidas a la salida del PEE de dicho convertidor, de manera de vislumbrar las diferencias existentes entre ambas metodologías de estimación. En la tabla 18 se muestran las emisiones estimadas producto del factor de emisión definido para MP en los hornos convertidores (18 kg/ton de concentrado).

Tabla 18: Estimaciones mensuales de material particulado en el CT

Año	mes	Nivel de actividad (ton concentrado)	Estimación de emisión sin EA (ton/mes)	Estimación de emisión con EA (ton/mes)
2011	Marzo	57.822	1040,796	20,816
2012	Enero	56.440	1015,920	20,318
2012	Marzo	30.001	540,018	10,800
2012	Mayo	52.406	943,308	18,866
2012	Diciembre	53.966	971,388	19,428
2013	Julio	54.326	977,868	19,557
2013	Diciembre	53.966	971,388	19,428

Dióxido de azufre

Las estimaciones de emisión de SO₂ del CT tampoco consideran un porcentaje de abatimiento, ya que en principio, sólo se compararon las emisiones de cada equipo, como si éstas salieran directamente al ambiente. En la tabla N°19 se muestran las horas de funcionamiento mensuales declaradas para el convertidor teniente, junto con el nivel de actividad y las estimaciones realizadas a partir de dicha información declarada y del FE (300 kg de SO₂/ton de concentrado).

Tabla 19: Estimaciones mensuales de Dióxido de Azufre en el convertidor Teniente

Año	Mes	Horas funcionamiento	Nivel de actividad (ton concentrado)	Estimación de emisión SO ₂ (ton/mes)
2011	Marzo	744	57.822	17346,602
2012	Enero	744	56.440	1693,210
2012	Marzo	456	30.001	9000,320
2012	Mayo	744	52.406	15721,812
2012	Diciembre	744	53.966	16189,842
2013	Julio	744	54.326	16297,826
2013	Diciembre	744	53.966	16189,841

En el mes de marzo del 2012, los niveles de actividad disminuyen de forma considerable, ya que se realiza una mantención generalizada de los equipos en la fundición. Sin embargo, como se observó en las declaraciones del secador de lecho fluidizado, las mantenciones no ocurren en el mismo periodo cada año, ya que el año 2013 estas se realizaron en el mes de junio.

3.2.1.3. Estimaciones para el Convertidor Pierce Smith-Potrerillos

Material Particulado

En relación a esta unidad emisora, los niveles de actividad declarados por medio del formulario electrónico para la declaración de emisiones, considerados para las estimaciones de emisiones de contaminantes son realizados en función del Cobre Blíster, a diferencia de la planta de secado y el CT, que el parámetro declarado es concentrado de Cobre seco. El Cobre Blíster es el producto obtenido en esta etapa del proceso que contiene aproximadamente un 96% de pureza. A continuación, la tabla 20 contiene las emisiones mensuales estimadas para el material particulado en el CPS.

Tabla 20: Estimaciones mensuales de material particulado en el CPS

Año	mes	Nivel de actividad (ton concentrado)	Estimación de emisión sin EA (ton/mes)	Estimación de emisión con EA (ton/mes)
2011	Marzo	17.620	317,160	6,343
2012	Enero	15.871	285,678	5,714
2012	Marzo	8.453	152,154	3,043
2012	Mayo	15.988	287,784	5,756
2012	Diciembre	16.574	298,332	5,967
2013	Julio	17.102	307,836	6,157
2013	Diciembre	16.037	288,666	5,773

Dióxido de azufre

Para la estimación de dióxido de azufre se utiliza la fórmula (14) para las mediciones de concentración en PPM. En la tabla 21 se presentan las emisiones mensuales calculadas en base a las toneladas de Cobre Blíster por mes, declarada para esta unidad de emisión.

Tabla 21: Estimaciones mensuales de Dióxido de azufre en el CPS

Año	Mes	Nivel de actividad (ton concentrado)	Estimación de emisión SO₂ (ton/mes)
2011	Marzo	17.620	5286,012
2012	Enero	15.871	4761,323
2012	Marzo	8.453	2535,922
2012	Mayo	15.988	4796,415
2012	Diciembre	16.574	4972,202
2013	Julio	17.102	5130,601
2013	Diciembre	16.037	4811,106

3.3. Análisis estadístico comparativo

Se realizó un análisis estadístico a cada unidad de emisión para evaluar la significancia estadística de las diferencias encontradas entre las emisiones calculadas por medio del factor de emisión y las mediciones isocinéticas en chimenea. Dentro de cada equipo, se evaluaron por separado las emisiones relativas a material particulado y Dióxido de Azufre.

3.3.1. Fundición Ventanas

Con respecto a la fundición Ventanas solo fue posible realizar la comparación entre las mediciones isocinéticas y las estimaciones por medio del factor de emisión para material particulado, ya que ninguno de los informes del laboratorio contenía mediciones isocinéticas de SO₂. Para el análisis estadístico del secador rotatorio, se utilizaron doce datos; seis correspondían a las mediciones y los otros seis a las estimaciones producto del FE. Dichos valores se encuentran representados en la tabla N°22.

Tabla 22: Emisiones de MP estimadas en el secador rotatorio.

Año	Mes	Emisión medida (ton/mes)	Estimación de emisión (ton/mes)
2012	Mayo	2,736	9,557
2012	Diciembre	1,345	8,349
2013	Mayo	0,422	8,475
2013	Diciembre	0,427	8,760
2014	Mayo	0,491	9,240
2014	Diciembre	0,383	8,977

Al comparar las emisiones calculadas a partir de cada metodología, representadas a través de la tabla 22, se puede observar que las estimaciones realizadas con el factor de emisión sobreestiman las emisiones de este equipo. En este caso, se pudo apreciar que las estimaciones producto del factor de emisión sobreestiman las emisiones para esta unidad emisora desde un 73 hasta un 96%. Sin embargo, se realizó un análisis estadístico para determinar la significancia de las diferencias estadísticas.

En la tabla 23 se resumen los valores de p arrojados en los test de Shapiro Wilk y posteriormente, en el test no paramétrico de Kruskal Wallis.

Tabla 23: Valores de p critico resultantes de las pruebas de hipótesis

Unidad de emisión	Análisis MP
Secador rotatorio	Shapiro Wilk p= 0,027 Kruskal Wallis p=0,014

En relación al valor de p arrojado por la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, esta mostró que si hay diferencias significativas entre las emisiones estimadas y las emisiones medidas de material particulado con un valor de p menor al 5% del nivel de significancia.

3.3.2. Fundición Potrerillos

Los análisis realizados para determinar la significancia entre ambas metodologías de estimación estudiadas, fueron realizados para cada una de las tres unidades que forman parte del proceso de fundición. En la tabla 24 se presentan los valores de p arrojados para cada test, en relación a las emisiones calculadas para el secador de lecho fluidizado y convertidores Teniente y Pierce Smith.

Tabla 24:Tabla resumen con todos los valores p resultantes de los análisis estadísticos.

Unidad de emisión	Análisis MP	Análisis SO ₂
Secador Flúosolido	Shapiro Wilk p= 0,0189	Shapiro Wilk p= 0,0009
	Kruskal Wallis p= 0,0165	Kruskal Wallis p= 0,0639
Convertidor Teniente	Shapiro Wilk p= 0,0224	Shapiro Wilk p= 0,3588
	Kruskal Wallis p= 0,0039	ANOVA p= 0,0065
Convertidor Pierce Smith.	Shapiro Wilk p= 0,0285	Shapiro Wilk p=0,0713
	Kruskal Wallis p=0,00395	ANOVA p= 0

Los análisis estadísticos evidencian, a través de los valores de p, que la unidad de emisión donde aplica mejor el factor de emisión e incluso no presenta diferencias significativas con las mediciones extrapoladas es en el secador del lecho fluidizado, específicamente en el análisis relacionado al SO₂. Esto se debe, por una parte, a que para estimar la emisión de Dióxido de Azufre no hay equipo de abatimiento directo, por lo que no se incluye en la fórmula el porcentaje de EA, que es uno de los factores que determinan incertezas en la comparación.

Además, como las emisiones de SO₂ son muchos menores en esta etapa que en el resto del proceso, existen límites definidos de concentración que determinan que la operación se desarrolle en los óptimos parámetros de diseño del equipo, por lo que hay un mayor control y exactitud de los rangos máximos a emitir. Mayores concentraciones de este contaminante es un indicador de una operación fuera de los parámetros de diseño (COPRIM, 2012).

En relación a los convertidores, los valores p resultantes de los test de Kruskal Wallis y ANOVA, según corresponda, permiten rechazar la hipótesis de nulidad, indicando que tanto en el convertidor teniente como en el Pierce Smith, se presentan diferencias significativas entre las mediciones extrapoladas y las estimaciones mediante el factor para la emisión de MP y SO₂. Esto se puede corroborar en la tabla 24, ya que todos los valores p críticos son menores a 0,05.

Al considerar la estimación de material particulado en el convertidor Teniente, las estimaciones subestiman las emisiones medidas, ya que representan un 19,4% de estas últimas. En el caso de Dióxido de azufre, las diferencias se hacen menos significativas ya que las estimaciones representan un 64,7% de las mediciones. Hecho que también se puede evidenciar comparando ambos valores de p.

En el convertidor Pierce Smith, la realidad es muy similar puesto que las estimaciones producto del FE también son menores que las mediciones extrapoladas para dicho equipo, ya que representan diferencias de alrededor de un 17% para MP y un 38,6% para dióxido de azufre.

Los únicos casos en donde las emisiones estimadas son mayores a las mediciones extrapoladas son en los secadores de ambas fundiciones, específicamente en el análisis referido a MP.

En general, las diferencias estadísticamente significativas entre ambas metodologías están dadas por varios factores;

- i. Las mediciones isocinéticas realizadas en los ductos a la salida de cada unidad emisora no consideran las emisiones fugitivas de contaminantes, por lo que hay una parte de los contaminantes que escapan sin ser cuantificados en dicha metodología. Por el contrario, la estimación que surge por el FE considera el total de concentrado de cobre procesado en cada unidad emisora englobando posibles pérdidas fugitivas.
- ii. Los factores de emisión de la EPA presentan sesgos al aplicarlos en Chile, principalmente porque fueron definidos para configuraciones específicas de equipos y ninguna de las fundiciones de cobre chilenas cumple a cabalidad con las configuraciones descritas en el manual AP-42. Además, existen diferencias en la composición mineralógica que posee el concentrado antes de entrar en el proceso de fundición, es decir, la composición del concentrado con el que fueron definidos los FE por parte de la EPA en una cantidad determinada de fuentes en E.E.UU, necesariamente posee una naturaleza diferente al mineral extraído en las minas Chilenas por lo que no va a tener la misma cantidad de Azufre en su composición.

- iii. Las mediciones isocinéticas, si bien representan la metodología más válida para estimar la emisión de contaminantes, no poseen el carácter de "oficial", ya que no se sujetan al cumplimiento de Decreto Supremo N°2467 o "Reglamento de laboratorios de medición y análisis de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes fijas" aprobado por el Ministerio de Salud. En este caso, las mediciones debiesen ser anunciadas con antelación a la Autoridad Sanitaria de manera de poder auditarla. Fuera de la Región Metropolitana esto pasa muy pocas veces porque las mediciones realizadas se derivan de exigencias de las Resolución de Calificación Ambiental y no de algún requerimiento de salud, y por tanto, las empresas miden sin mayor control de calidad.
- iv. En caso de no existir mediciones en las fundiciones o que no sean informadas a las autoridades, la información disponible relacionada al D.S N° 138 presenta algunas inconsistencias que también origina problemas al momento de estimar o cuantificar los contaminantes.
- v. Las eficiencias de abatimiento teóricas que se incluyen en la ecuación para estimar la emisión con el factor de emisión, no se condicen con las calculadas experimentalmente.

Las implicancias que tiene el hecho de que las estimaciones del factor de emisión, en la mayoría de los casos estudiados subestimen las emisiones, es que se está declarando menos de lo que se emite en la realidad, por lo que debiese haber al menos una fiscalización, para ver si efectivamente los niveles de contaminantes declarados por medio de estas fuentes fijas, se condicen con los emanados en un día cualquiera.

3.3.3. Análisis estadístico con eficiencia experimental

La prueba de Shapiro demostró una distribución normal para ambas poblaciones de datos. Sin embargo, como el objetivo fue comparar los valores arrojados por el Análisis de varianza para determinar la significancia de las diferencias entre ambas metodologías de estimación, incorporando dentro de las estimaciones la eficiencia de abatimiento experimental que muestra la tabla 13, sólo basta con observar que ambos equipos presentan valores de p menores a 0,05 por lo que se

rechaza la hipótesis nula y se determina que efectivamente hay diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 25: Probabilidad de error resultante de los test estadísticos

Unidad de emisión	Análisis MP	
Convertidor Teniente	Shapiro Wilk ANOVA	p= 0,1140 p= 0,0055
Convertidor Pierce Smith	Shapiro Wilk ANOVA	p=0,1020 p=0,0004

Si comparamos los valores de las mediciones en chimeneas, con respecto a las estimaciones producto del factor de emisión, incluyendo el porcentaje de eficiencia de los equipos de abatimiento, se puede observar que la mayor parte de las veces, los valores de las mediciones indican emisiones mayores que las declaradas en el D.S.138, lo que se atribuye a los altos porcentajes de eficiencia de abatimiento que se definieron teóricamente tanto para el precipitador electrostático como para el filtro de manga, provocando una baja significativa del valor de la estimación.

Sin embargo, al observar la diferencia de las mediciones con las declaraciones considerando los porcentajes de eficiencia experimental, ocurre justamente lo contrario; Las emisiones son mayores en las estimaciones ya que se produce un aumento de casi el 20 % del valor de la estimación al considerar la eficiencia experimental resultante de cada precipitador electrostático.

Al comparar los análisis estadísticos generados para determinar las significancia entre las emisiones medidas y las mediciones estimadas por medio del test LSD de Fisher, cuando se incluye una eficiencia de abatimiento teórica para el PEE del CT, la diferencia entre las medias de cada grupo de datos es de 77,89. Mientras que, al comparar ambas metodologías de estimación incluyendo la efectividad de abatimiento experimental, las diferencias se hacen más grandes con un valor de 102,95 entre las medias.

En relación al CPS, al incluir eficiencia de abatimiento teórica, el test de rangos múltiples LSD Fisher arroja una diferencia entre las medias cuadráticas de 26,26. Mientras que al comparar ambas metodologías de estimación con eficiencias de abatimiento experimentales, el test arroja una diferencia de 54,842 entre MP-EM Y MP-MM

Por lo tanto, al incluir las eficiencias experimentales en la fórmula, las diferencias entre ambas metodologías de estimación aumentan, por lo que se puede inferir que la variable de eficiencia de abatimiento no determina las diferencias, sino que es el factor de emisión el que posee un valor equivoco y poco representativo.

3.4. Análisis sobre la calidad de los informes de mediciones

Como se indicó en la introducción, dentro de las normas o métodos con que debe cumplir las mediciones isocinéticas destacan los siguientes métodos Chilenos:

CH-1 "Localización de puntos de muestreo y de medición de velocidad para fuentes estacionarias"

CH-2 "Determinación de la velocidad y flujo Volumétrico de gas en Chimenea"

CH-3 "Análisis de gas para la determinación del peso molecular seco"

CH-4 "Determinación de la humedad en los gases de la chimenea"

CH-5 "Determinación de la emisión de partículas desde fuentes estacionarias"

Donde cada uno de estos métodos contiene exigencias en cuanto a las condiciones del sitio donde se debe realizar la medición y por otro lado, se exigen condiciones mínimas para que el muestreo sea representativo de la emisión que sale por la chimenea de equipo industrial o unidad emisora.

Para ello, se evaluaron algunas condiciones básicas que deberían explicitarse dentro de cada informe de mediciones, de manera de respaldar que las mediciones cumplen con los requisitos mínimos para ser consideradas representativas. Para ello, se elaboró un listado con las condiciones del sitio y las condiciones del muestreo que debe cumplir cada campaña de mediciones, las que serán incluidas en la tabla 26.

Tabla 26: Condiciones básicas que deben cumplir los informes de mediciones

<p>Condiciones del sitio</p>	<p>a.- ¿Se cumple criterios distancias entre los puntos?</p> <p>b.- ¿Ausencia de flujo ciclónico?</p> <p>c.- ¿Perfil de flujo homogéneo?</p>	<p>El CH-1 explicita las distancias mínimas que debe haber entre un punto de medición y otro.</p> <p>Se refiere a que el ángulo de inclinación promedio debe ser menor a 20° en el total de las corridas.</p> <p>Determina que ningún valor de velocidad puntual de cada muestra debe superar el 10% del promedio del barrido.</p>
<p>Condiciones del muestreo</p>	<p>d.- ¿Se realizó barrido preliminar al inicio de cada día?</p> <p>e.- ¿Se mantuvo temperatura de sonda y filtro dentro de los límites?</p> <p>f.- ¿Se mantuvo temperatura del 4to impinger bajo límite?</p> <p>g.- ¿El muestreo fue isocinético?</p> <p>h.- ¿Se obtuvo un volumen suficiente de muestra?</p> <p>i.- ¿Se verificó la presencia de fugas del tren de muestreo?</p> <p>j.- ¿Equipos contaban con su acreditación al día?</p>	<p>Al inicio de cada día se debe hacer un barrido antes de iniciar las mediciones oficiales</p> <p>Hay establecido un rango de T° óptimo dentro el cual debe tener la sonda y el filtro cuando estos se calefaccionan durante cada corrida.</p> <p>La temperatura de la sonda y del filtro se mantuvo en el rango 120 ± 14°C de acuerdo al método CH-5 durante cada corrida</p> <p>Las mediciones deben explicitar un coeficiente de isocineticismo entre 90% y 110% para todas las corridas.</p> <p>Se establece un volumen mínimo de muestra (1,0 m3N) en cada una de las corridas</p> <p>Se deben comentar los pormenores ocurridos dentro de la campaña de mediciones, sobre todo las medidas tomadas para evitar fugas</p> <p>Los informes deben incluir los certificados donde se acredita cada equipo.</p>

De las 10 preguntas planteadas dentro de la tabla 26, los informes responden a menos de la mitad de ellas, ya que en el mejor de los casos, se muestran sólo valores promedio de los parámetros que allí se establecen como requisito mínimo, o en el peor, dichos parámetros ni siquiera aparecen explicitados dentro del informe, ocasionando que no se pueda respaldar que cumplieron con todos los parámetros óptimos para efectuar cada medición.

IV. CONCLUSIONES

Los factores de emisión sólo representan una herramienta válida de estimación en el caso de las emisiones de Dióxido de Azufre del secador de lecho fluidizado, ya que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las estimaciones del factor de emisión y las mediciones isocinéticas extrapoladas. En el caso de las emisiones en los hornos convertidores y particularmente, en las emisiones de MP de los secadores de concentrado de cobre, estos no representan una metodología válida de estimación.

En los convertidores Teniente y Pierce Smith, las estimaciones producto del FE subestimaron las emisiones resultantes de las mediciones isocinéticas, tanto en las emisiones de material particulado como en SO_2 . En el convertidor Teniente estas correspondían en promedio a un 19,4% para MP y un 64,7% para SO_2 en relación a las mediciones isocinéticas extrapoladas. Mientras que en el convertidor Pierce Smith, las emisiones estimadas representaron en promedio un 17% y un 38,6% de las emisiones medidas para MP Y SO_2 , respectivamente.

Por otra parte, en los únicos casos en que las emisiones estimadas sobreestimaron las mediciones isocinéticas extrapoladas, fue en los secadores rotatorio y de lecho fluidizado de las fundiciones Ventanas y Potrerillos, respectivamente. Específicamente, en relación a las mediciones isocinéticas para MP, que representaron un promedio de 89,3 % para ventanas y un 55,2% de las emisiones estimadas en la fundición Potrerillos.

En relación a los informes de mediciones isocinéticas, estos contienen información insuficiente acerca de las condiciones de muestreo y del sitio para poder determinar si es que todos los parámetros se cumplen a cabalidad. Si bien, se presentan en ellos certificados donde acreditan que los equipos utilizados están certificados al momento de realizar las corridas de mediciones, falta información que es determinante para discriminar si un muestreo cumple con todos los requisitos (T° de filtro y sondas, distancias de cada puntos de muestreo, velocidad puntuales en cada punto, etc).

Las declaraciones presentan inconsistencias que van más allá de las particularidades de cada fundición, lo que dificulta estimar las emisiones a partir de los datos recopilados por medio del formulario electrónico para la declaración de emisiones de fuentes fijas, sin analizar ni revisar previamente la coherencia que tiene la misma con las reales características operativas que presenta cada planta, ya que las revisiones por parte de las autoridades ambientales recaen específicamente en los niveles de actividad declarados. Las principales falencias que se identificaron van desde, falta de verificación en terreno de los equipos que se declaran año a año; errores en las declaraciones donde no se incluyen tecnologías de control de contaminantes como filtros de mangas y precipitadores electrostáticos de la fundición, ocasionando que una sobreestimación de las emisiones.

El porcentaje de eficiencia de abatimiento teórico definido por la EPA para los precipitadores electrostáticos (98%) no es representativo de la eficiencia experimental determinada para los PEE instalados tras los convertidores Teniente y convertidores Pierce Smith en la fundición Potrerillos. En el caso del PEE del convertidor Teniente la eficiencia experimental promedio fue de un $78,84 \pm 6,46$ %, mientras que para el convertidor Pierce Smith la eficiencia experimental promedio $69,31 \pm 9,73$ %.

V.RECOMENDACIONES

- Es preciso que las autoridades ambientales y de salud validen la información ingresada en el D.S.138, no necesariamente fiscalizándola en terreno, sino que revisando si hay concordancia con los equipos, parámetros declarados y equipos de abatimiento, ya que al revisar las declaraciones, muchas veces se observaron inconsistencias de este tipo.
- Deben incluirse estimaciones de los contaminantes emanados a través de los hornos Convertidores Pierce Smith, porque como los cálculos (cuando no hay mediciones) los realiza la calculadora que hay en el sistema, esta opera con un sistema lógico que sólo cuantifica las emisiones cuando está presente el parámetro requerido para el FE. Sin embargo, éste no tiene concordancia con la materia prima que se procesa en este equipo a la altura del proceso de conversión.
- Hay una falta de transparencia en el sector minero, por lo tanto, es necesario que se hagan mediciones en línea para que los pobladores sepan la cantidad de contaminantes que emanan por las chimeneas de estas industrias, de manera que exista mayor transparencia.
- Las mediciones isocinéticas que se realizan en las fundiciones de cobre también deberían ajustarse al D.S.N°2467 para tener un carácter "oficial" y así, asegurar el cumplimiento de los protocolos establecidos en cada uno de los métodos chilenos definidos para las mediciones de fuentes fijas, ya que en la actualidad, las fiscalizaciones que realiza la SEREMI sólo se enmarcan en las normas de calidad o planes de descontaminación.
- Los factores de emisión deberían pasar por un proceso de validación a través de mediciones oficialmente certificadas, de manera que estén acordes a la configuración de cada fundición presente en Chile. Además, sería recomendable que año a año se determinará la eficiencia de abatimiento

experimental de los equipos de abatimiento, para que así haya un menor sesgo en las estimaciones.

- Es por esto, que aparte de reformular los factores de emisión, además es recomendable que se incluyan porcentajes de abatimiento experimentales determinados para cada equipo dentro de la planta y así, tener un menor sesgo en las estimaciones.

VI. REFERENCIAS

- Berríos,R.2010. Desarrollo de un programa código abierto para la fusión de concentrados en el convertidor teniente. [En Línea].Tesis ingeniero en ejecución metalúrgica. Santiago ,Chile: Facultad de ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.104h.en: <http://tesis.rodolfoberrios.com/Tesis_Rodolfo_Berrios.pdf>
- COCHILCO (Comisión Chile del Cobre). "El convenio de Estocolmo, las emisiones de dioxinas y furanos y un análisis de los procesos de las fundiciones primarias de concentrados de cobre en Chile". Diciembre 2002. pp. 6 y 7.
- CODELCO(Corporación Nacional del Cobre),2011.Presentación general Ventanas[Diapositivas].[Chile]: Gerencia de operaciones División Ventanas
- CODELCO (Corporación Nacional del Cobre).Fundición [En línea].Santiago, Chile: CODELCO. en : <<https://www.codelcoeduca.cl/>>
- CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente). 2009.Guía Metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes, Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- COPRIM.2012.Evaluación de costos de escenarios regulatorios para una norma de emisión de fundiciones de cobre.
- Decreto Supremo N° 138.Establece obligación de declarar emisiones de fuentes fijas.Santiago:MINSAL,2005.3 p.[publicada en Diario Oficial el 17 de noviembre de 2005]
- Decreto Supremo N° 179.Establece plan de descontaminación para la zona circundante a la fundición Potrerillos de la división Salvador de Codelco (PPDA).Santiago:MINSEGPRES,1999.14.11p.[publicada en Diario Oficial el 14 de junio de 1999]
- Decreto Supremo N°1.Aprueba reglamento del registro de emisiones y transferencia de contaminantes ,RETC.Santiago:MMA,2013.10p.[publicada en Diario Oficial el 2 de mayo de 2013]
- Decreto Supremo N°252.Aprueba plan de descontaminación del complejo industrial Las ventanas propuesto conjuntamente por la empresa nacional de minera, fundición y refinería Las Ventanas y la planta termoeléctrica de Chilgener S.A., en los términos que se indican (PPDA).Santiago: Ministerio de Minería,1993.3p [publicada en Diario Oficial el 02 de marzo de 1993]

- Desconocido.2004, Enero. Gestión de la contaminación atmosférica en procesos mineros y metalúrgicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago.
- Dreisinger, D. "New developments in hydrometallurgical treatment of copper concentrates". Engineering and Mining Journal; May 2004; 205, 5; ProQuestScienceJournals. pp. 32.
- Echeverri, C.A.2006.Determinación de Material Particulado en Fuentes fijas. Medellín.133p
- Elías,X.2012. Tipos de hornos. Emisiones a la atmósfera y correcciones.(cap. 4,pp 1-31).En su: Tratamiento y valoración energética de residuos. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.152p.
- EPA (*United States Environmental Protection Agency*),1999.Hoja de Datos-Tecnología de Control de Contaminantes del Aire: Precipitador Electrostático seco, EPA-CICA.(Doc.Tec),Centro de Información sobre Contaminación de Aire(CICA),México.6p
- Fernández, E. 2008.Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo Jet Pulse y precipitador electrostático. Tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico Eléctrico. Piura: Universidad de Piura.189p.
- Figueroa, E., Solari, J. y V. Kunze. 1999. Environment in Large Mining in Chile ; en E. Figueroa (ed.), Economic Rents and Environmental Management in Mining and Natural Resource Sectors, University of Chile and University of Alberta. Olimpho. Santiago, Chile.
- González, F. 2014. Análisis valor estratégico de las fundiciones chilenas. Tesis para Magister en Gestión y Dirección de Empresas .Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 83p
- Gutiérrez, N.D.2002. Planificación e implementación del sistema de gestión Ambiental según la norma ISO 14001 en la fundición de Caletones. División El Teniente, CODELCO-CHILE. Seminario de título Química Ambiental. Santiago, Chile :Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.102 p
- INE (Instituto Nacional de Ecología), México.2002.Técnicas de control de contaminantes procedentes de fuentes estacionarias. Coyoacán, México: Dirección de investigación de calidad del aire.82p
- Lagos, G. 1997. Developing national mining policies in Chile: 1974-96. *Resources Policy*, Vol. 23, n. 1/ 2: 51-69.
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente).2011.Informe del Estado del Medio Ambiente. Segunda edición. Santiago de Chile.512p

- OCDE – CEPAL, 2005. Evaluaciones de desempeño ambiental Chile, páginas 18-20-25 y 29.)
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development),2013 .Economic Surveys: Chile 2013, OECD,pp:8.
- Oyarzun. 2010, marzo. Contaminación aérea y sus efectos en la salud. Revista Chilena de enfermedades respiratorias.Santiago,V.26(1):pp.17
- Radian Corporation.1996.Manuales del programa de inventario de emisiones México-Técnicas básicas de estimación de emisiones. México .133p
- Rial, A. y J.Varela.2008.Estadística práctica para la investigación en ciencias de la salud.España:Netbio.320p
- Sancha A.M, (1998), Estudio de caso: Contaminación por arsénico Chile y su impacto en el ecosistema y la salud humana.
- Schwarze D., Herman y Queirolo D., Claudio 1998."Pirometalurgia del cobre" Instituto Ingeniería Metalurgia de Chile.
- SMA (Superintendencia del Medio Ambiente).2013.Informe de fiscalización ambiental- Plan de descontaminación de la fundición Potrerillos División Salvador de CODELCO. 33p
- TDA (Tecnología de Detección Ambiental).2011."Manual de Instrucciones EPA 5.Argentina.
- Vargas, A. 1995.Estadística descriptiva e inferencial. España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.576p.
- Wiertz, J. 2004, junio. Fundiciones. Universidad de Chile.[clase Introducción al Análisis Ambiental].Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas[En Línea].Santiago,Chile.15pp.Recuperado en: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2004/1/SD30A/1/material_docente/bajar?id_material=30966]
- Woodard.K.1998. Técnicas de control de materia particulada fina proveniente de fuentes estacionarias. Ed: *EC/R Incorporated. North Carolina: Air Quality Strategies and Standards Division U.S. Environmental Protection Agency.*
- Zhang Yang y Col. Estimation of SO₂ emission factors from copper smelting industry in Yunnan Province, China., 2013, 42(36): 742–748.

VII. ANEXOS

Tabla 1: Síntesis de mediciones isocinéticas horarias de MP y SO₂ en la planta de secado Flúosolido

Año	Fecha	Caudal normal seco (m ³ N/h)	Emisión salida secador MP (kg/h)	Emisión medida de SO ₂ (kg/h)
2011	10/3	245.755	2,58	-
2011	10/3	255.383	5,21	-
2011	10/3	251.962	3,00	-
2011	08/8	229.608	2,48	128,58
2011	08/8	219.403	2,35	59,68
2011	08/8	218.132	1,99	69,22
2011	28/9	230.584	21,10	143,88
2011	28/9	234.718	11,92	188,40
2011	28/9	239.367	10,96	160,85
2012	11/1	257.457	3,27	138,00
2012	11/1	258.623	6,57	166,90
2012	11/1	264.142	4,60	161,30
2012	19/3	209.354	3,43	54,71
2012	19/3	203.681	3,42	62,46
2012	19/3	205.470	4,93	46,03
2012	06/10	213.442	3,37	114,40
2012	06/10	223.343	5,47	144,13
2012	06/10	220.881	4,86	134,88
2012	18/12	243.511	8,11	14,94
2012	18/12	219.183	7,52	12,86
2012	18/12	249.077	6,38	12,62
2013	25/3	210.834	18,85	7,87
2013	25/3	217.322	18,23	6,37
2013	25/3	215.573	18,88	5,75
2013	29/6	230.005	11,62	47,23
2013	29/6	240.123	9,80	53,15
2013	29/6	230.340	10,23	41,15
2013	23/10	230.054	7,09	26,99
2013	23/10	228.763	7,73	27,45
2013	23/10	228.152	6,39	40,76
2013	17/12	229.856	27,63	12,87
2013	17/12	232.470	18,53	0,00
2013	17/12	230.259	16,16	2,46

Tabla N°2. Síntesis de mediciones isocinéticas horarias de MP y SO₂ en el convertidor Teniente.

Año	Fecha	Caudal normal seco (m ³ N/h)	Emisión de MP salida PEE CT (kg/h)	Emisión medida de SO ₂ (kg/h)
2011	09/3	121.237	132,91	27157,09
2011	09/3	121.427	200,40	28494,87
2011	09/3	120.078	113,62	30739,97
2012	10/1	152.746	116,87	48064,07
2012	10/1	147.387	153,52	43233,52
2012	19/3	121.237	132,91	27157,09
2012	19/3	121.427	200,40	28494,87
2012	19/3	120.078	113,62	30739,97
2012	19/5	157.581	19,27	38659,87
2012	19/5	133.707	18,08	38507,62
2012	19/5	149.726	18,63	40725,47
2012	17/12	143.957	167,64	33781,91
2012	17/12	141.409	135,24	32429,80
2013	12/7	120.378	138,15	34026,85
2013	12/7	121.327	126,98	32353,87
2013	18/12	125.459	93,84	35463,08
2013	18/12	123.001	104,87	34112,28

Tabla N°3: Síntesis de mediciones horarias de MP y SO₂ en el CPS

Año	Fecha	Caudal normal seco (m ³ N/h)	Emisión de MP (kg/h)	Emisión de SO ₂ (kg/h)
2011	10/3	86.006	36,23	19265,34
2011	10/3	79.801	61,71	20003,45
2011	10/3	74.721	36,41	20722,62
2012	10/1	66.993	37,51	17507,50
2012	10/1	69.528	38,86	18911,62
2012	20/3	86.006	36,23	19265,34
2012	20/3	79.801	61,71	20003,45
2012	20/3	74.721	36,41	20722,62
2012	21/5	53.465	3,84	15968,21
2012	21/5	53.053	4,33	13298,62
2012	21/5	54.688	5,34	17791,83
2012	17/12	58.927	55,50	14142,48
2012	17/12	59.655	55,37	14317,20
2013	12/7	68.130	46,59	15987,84
2013	12/7	71.983	67,39	16892,01
2013	20/12	68.765	29,50	15770,11
2013	20/12	65.327	37,00	15330,07

Análisis estadísticos.

Tabla N°4: Tabla comparativa con las estimaciones y mediciones de material particulado en secador rotatorio

Año	mes	Nivel de actividad (ton concentrado)	Estimación medición	Estimación estimada con EA (ton/mes)
2012	Mayo	38.229	2,736	9,557
2012	Diciembre	33.396	1,345	8,349
2013	Mayo	33.890	0,422	8,474
2013	Diciembre	35.041	0,427	8,760
2014	Mayo	36.961	0,491	9,240
2014	Diciembre	35.907	0,383	8,977

Tabla N°5: Tabla comparativa con las estimaciones y mediciones de material particulado en secador rotatorio Material particulado en MP en secador de lecho fluidizado

Año	Fecha	Emisión medida (ton/mes)	Emisión estimada sin EA (ton/mes)	Emisión estimada con EA (ton/mes)
2011	Marzo	2,676	277,455	13,873
2011	Agosto	1,689	259,205	12,960
2011	Septiembre	10,556	254,225	12,711
2012	Enero	3,579	281,495	14,075
2012	Marzo	1,792	149,820	7,491
2012	Octubre	3,069	256,625	12,831
2012	Diciembre	5,28	258,475	12,924
2013	Marzo	13,879	201,715	10,086
2013	Mayo	7,847	163,525	8,176
2013	Octubre	5,259	258,54	12,927
2013	Diciembre	15,455	297,535	14,877

Tabla N° 6: Tabla comparativa con las estimaciones y mediciones de SO₂ en secador de lecho fluidizado

Año	Mes	Emisión medida (ton/mes)	Emisión estimada (ton/mes)
2011	Agosto	63,855	25,921
2011	Septiembre	118,353	25,423
2012	Enero	115,617	28,150
2012	Marzo	24,806	14,982
2012	Octubre	88,126	25,663
2012	Diciembre	9,699	25,848
2013	Marzo	4,959	20,172
2013	Junio	33,967	11,209
2013	Octubre	23,611	25,854
2013	Diciembre	5,702	29,754

Tabla N° 7: Tabla comparativa con las estimaciones y mediciones de MP en el CT

Año	Mes	Emisión medida	Emisión estimada sin EA(ton/mes)	Emisión estimada con EA (ton/mes)
2011	Marzo	123,993	1040,796	20,816
2012	Enero	100,583	1015,92	20,318
2012	Marzo	67,934	540,018	10,800
2012	Mayo	13,881	943,308	18,866
2012	Diciembre	112,672	971,388	19,428
2013	Marzo	98,627	977,868	19,557
2013	Mayo	73,922	971,388	19,428

Tabla N°8: Tabla comparativa con las estimaciones y mediciones de SO₂ en el CT

Año	Mes	Emisión medida (ton/mes)	Emisión estimada (ton/mes)
2011	Marzo	21425,197	17346,6
2012	Enero	33962,705	16932,1
2012	Marzo	13131,573	9000,3
2012	Mayo	29873,429	15721,8
2012	Diciembre	24630,755	16189,8
2013	Julio	27830,339	16297,8
2013	Diciembre	21165,674	16189,8

Tabla N°9: Tabla comparativa con las estimaciones y mediciones de MP en el CPS

Año	Mes	Emisión medida	Emisión estimada sin EA(ton/mes)	Emisión estimada con EA
2011	Marzo	33,318	317,160	6,343
2012	Enero	28,409	285,678	5,714
2012	Marzo	20,421	152,154	3,044
2012	Mayo	3,352	287,784	5,756
2012	Diciembre	41,243	298,332	5,967
2013	Julio	42,402	307,836	6,157
2013	Diciembre	24,739	288,666	5,773

Tabla N°10: Tabla comparativa con las estimaciones y mediciones de SO₂ en el CPS

Año	Fecha	Emisión medida	Emisión estimada
2011	Marzo	14877,872	5286,1
2012	Enero	13547,913	4761,3
2012	Marzo	9118,696	2535,9
2012	Mayo	11670,548	4796,4
2012	Diciembre	10565,336	4972,2
2013	Julio	12231,304	5130,6
2013	Diciembre	11569,265	4811,1