



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
(Versión Corregida)  
(LMAA-022-UCA-009-2007)

“ESTUDIO DIAGNÓSTICO FUENTES DE EMISIÓN  
RESPONSABLES DEL  
MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE, MP10 EN  
RANCAGUA”

Para

GOBIERNO REGIONAL, REGIÓN DEL LIBERTADOR  
BERNARDO O`HIGGINS.

SANTIAGO – CHILE  
NOVIEMBRE 2007



Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA)  
Año 2007

Proyecto “Estudio diagnóstico fuentes de emisión responsables del material particulado respirable, MP10 en Rancagua” Informe Final.

Versión Corregida  
Noviembre 2007

Obra protegida por la Ley 17.336 sobre Propiedad Intelectual

Ninguna parte de este Informe puede ser reproducido, transmitido o almacenado, en cualquier forma o por cualquier medio, sin permiso expreso de CENMA, o de la Institución contratante del estudio.

*Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA*

Prof. Víctor Pérez, Presidente  
Prof. Eugenio Figueroa, Director Ejecutivo

*Estudio desarrollado por el Laboratorio de Modelación y Análisis Atmosférico*

*Equipo de Trabajo:*

Manuel Merino, Jefe Unidad Calidad de Aire y Meteorología  
Gerardo Alvarado, Encargado Estudios de Calidad de Aire  
Manuel Leiva, Jefe Laboratorio Químico  
Isabel Leiva, Supervisora operación y mantención estaciones de monitoreo  
Javier Vargas, Técnico Mediciones de Calidad de aire y Meteorológicas  
Claudio Castillo, Técnico Mediciones de Calidad de aire y Meteorológicas

*Autor del Informe:*

Gerardo Alvarado Z.

Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente  
Av. Larraín 9975, La Reina, Santiago, Chile  
Tel: (56-2) 299 4100, Fax: (56-2) 275 1688

## RESUMEN EJECUTIVO

### Antecedentes generales

Los problemas de contaminación que presenta la ciudad de Rancagua, principal centro urbano de la VI Región, han sido estudiados a partir del año 1996 junto con la implementación de un proyecto de calidad del aire para la ciudad, financiado por la Cooperación Suiza (COSUDE), CONAMA y el Ministerio de Salud. Esta iniciativa permitió identificar que el principal problema de contaminación de la ciudad estaba referido al material particulado respirable menor a 10 micrones (MP10). A través de dicho proyecto, se estudió que las principales fuentes de este contaminante provenían de las siguientes fuentes de emisión:

- Suelo o emisión de polvo natural
- Quema de leña, para calefacción doméstica y quemas agrícolas.
- Actividad industrial de tipo metalmecánica asociada a la Fundición Talleres,
- Fundición de Cobre, emitido por la chimenea de Caletones de la División El Teniente de CODELCO Chile
- Transporte vehicular, asociado a un transporte público mayor de mucha antigüedad, una sobreoferta del segmento taxis colectivos, entre otros factores.

El presente estudio está basado en la necesidad de actualizar las fuentes de emisión que generan en la ciudad de Rancagua un perfil de contaminación tal, que se está constatando por segundo año la superación de sus normas primarias diaria y anual de calidad del aire por MP10, esto es en referencia al período 2004 – 2006, con un percentil 98 de  $153 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un promedio trianual de  $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

El Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA se ha adjudicado la ejecución del “Estudio diagnóstico fuentes de emisión responsables del material particulado respirable, MP10 en Rancagua”, cuyo principal objetivo es “Realizar un diagnóstico de calidad de aire en la ciudad de Rancagua a través de la estación COSUDE – Rancagua en el período 2004 – 2007, y analizar los resultados del inventario de emisiones 2006 (en ejecución durante el 2007), con la finalidad de estudiar la relación emisión-calidad para el contaminante material particulado respirable”.

### Actividades realizadas

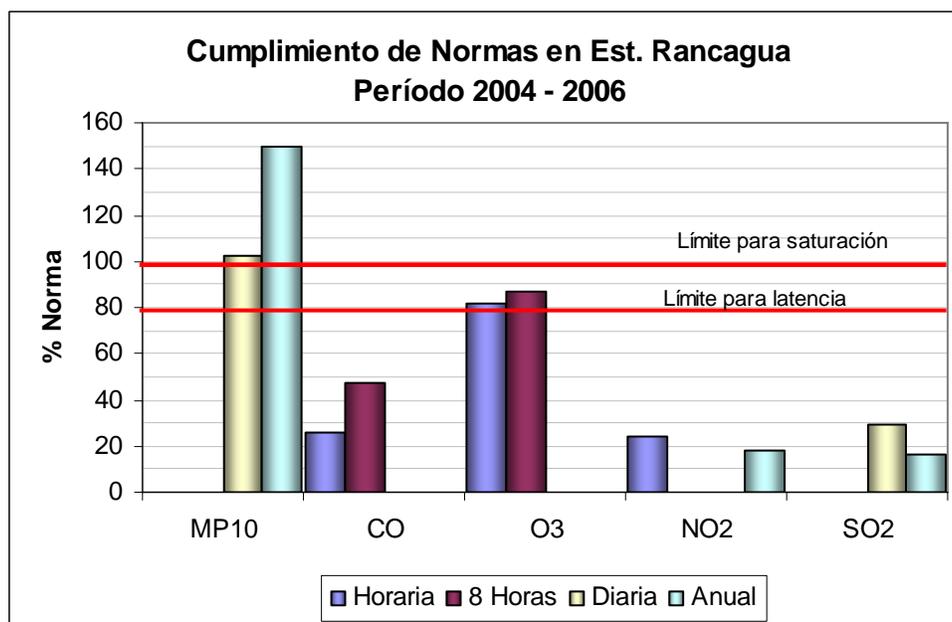
Para el logro de los objetivos específicos del estudio se realizaron las siguientes etapas:

1. Recopilación de información
2. Diagnóstico de calidad del aire en la Zona de Estudio.
3. Análisis del inventario de emisiones
4. Campaña de monitoreo de material particulado
5. Análisis químico del material particulado

6. Aplicación de modelo receptor
7. Determinación de distribución relativa de las fuentes de MP10
8. Propuesta metodológica para futuras aplicaciones/actualizaciones de modelo receptor
9. Preparación de Informes y seminarios de capacitación/difusión

## **Resultados**

Las mediciones realizadas en la estación COSUDE de Rancagua confirmaron los altos niveles de MP10 y Ozono detectados en las mediciones exploratorias de 1997 a 2000. La Figura siguiente ilustra los porcentajes de superación de la norma diaria y anual de MP10 con un percentil 98 de  $153 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el año 2006 y un promedio trianual (2004-2006) de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para Ozono las concentraciones de 8 horas superan el límite de latencia con un percentil 99 (tri-anual) de 53 ppb equivalente al 87% de la norma de 8 horas. Las concentraciones de SO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>2</sub> son bastantes menores a las registradas en las normas.



**Figura 1-1 Cumplimiento de Normas en Estación Rancagua, Abril 2004 a Diciembre 2006**

Las concentraciones de MP10 tienen un fuerte comportamiento estacional con un notorio aumento de los niveles en los meses de otoño-invierno, durante los cuales algunos días alcanzan concentraciones en el rango de alerta y pre-emergencia (DS 369/1988 de MINSAL). En los años 2004, 2005 y 2006 se registraron 11, 5 y 8 días respectivamente

sobre el valor fijado en la norma diaria ( $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Durante el año 2007 entre Abril y Junio se han registrado 23 días sobre  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

El comportamiento de las concentraciones de MP10 durante el día también presenta fuertes diferencias entre meses de primavera-verano (con menores concentraciones) y los meses de otoño-invierno durante los cuales hay un pronunciado aumento de las concentraciones durante la noche

El grado de avance de la estimación de emisiones reportado en el Informe de Avance 2 del “Estudio Diagnóstico Plan de Gestión del Aire VI Región” no permite una comparación profunda con el inventario de 1999. Una vez entregado el Informe Final, a mediados de Noviembre, se complementará y profundizará en el análisis.

Para aplicar modelo receptor destinado a estimar el aporte de las principales fuentes de MP10 se desarrolló una campaña de monitoreo de material particulado fino y grueso en Rancagua. Sobre el techo de la estación COSUDE se instaló un muestreador gravimétrico Dicotomo Anderssen, método referencia EPA RFPS-0789-073, que permite tomar muestras de material particulado menor a 10 micrones en 2 fracciones (fina y gruesa). Además, durante este período se tomaron muestras en paralelo de MP10 con un muestreador de alto volumen, marca Andersen, modelo 321, método de referencia EPA RFPS-1287-064.

La campaña de muestreo se inició el 4 de Mayo finalizando el 10 de Junio de 2007. Se obtuvieron 36 muestras de fracciones fina y gruesa con equipo dicótopo y 36 muestras con equipo de alto volumen. Cada muestreo tiene una duración de 24h con inicio a las 10h. La campaña fue complementada con los análisis químicos de muestras recolectadas en campañas similares desarrolladas en el mismo lugar durante los años 2004 y 2005 para verificar el funcionamiento del monitor continuo de MP10 de atenuación Beta.

En el período 4 de Mayo al 10 de Junio de 2007 se registran 19 días con concentraciones diarias mayores al nivel fijado en la norma diaria. En general, la fracción fina es mayoritaria en el material particulado respirable de Rancagua con un porcentaje similar en las 3 campañas, cercano a 61%, este porcentaje de participación aumenta para aquellos días con mayores concentraciones de MP10

La buena correlación ( $R^2=0.8$ ) y el valor de 1.02 de la pendiente (2% de diferencia) al comparar Alto Volumen y monitor Beta confirma el buen funcionamiento de esta metodología para determinar concentraciones diarias de MP10.

Los análisis químicos a las muestras obtenidas durante las campañas fueron realizados en el Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental de CENMA, que cuenta con acreditaciones tanto nacionales como internacionales para la competencia en los ensayos referidos. Se utilizó ICP-OES para determinar metales y cromatografía iónica para iones y cationes.

Desafortunadamente, la técnica ICP-OES presentó problemas para determinar B y Si entregando valores que no corresponden a la realidad, por lo cual no son considerados en el análisis de componentes principales. Las concentraciones de Al, K y S presentan fuertes diferencias durante la campaña, lo cual se puede atribuir a la cantidad mínima de masa que requiere la técnica para cuantificar las concentraciones. Además, existen diferencias entre concentraciones de metales obtenidas para las campañas de los años 2004-2005 y la campaña de 2007. En parte estas diferencias pueden ser atribuidas al tiempo que han permanecido las muestras almacenadas, lo cual puede producir interacción entre los componentes de las muestras, degradación de las mismas y probable contaminación.

Se aplicó el modelo de factores absolutos principales (absolute principal factor scores, APFS) de acuerdo a la metodología utilizada por la U. de Harvard en el estudio de caracterización en 5 ciudades Chilenas (Iquique, Viña del Mar, Valparaíso, Rancagua y Temuco) (Kavouras et al. 2001) y por la U. de Sao Paulo en las campañas de caracterización físico-química desarrollada en la Región Metropolitana durante los años 1996, 1998 y 1999 (Artaxo, 1996; Artaxo, 1998; Artaxo, 1999, Artaxo et al, 1999).

Los resultados del estudio de Kavouras publicado el año 2001, pero con información del año 1998, determinó que para MP2.5 la principal fuente es Leña con un 46%. Para MP10 la principal fuente durante un año promedio (1998) es Polvo de Suelo con un 34%.

La ausencia de concentraciones de Si y la variabilidad de elementos considerados como trazadores (K, Al y S) dificultan la extracción de factores principales y la posterior asignación de fuentes emisoras de MP responsables.

Por problemas en la determinación analítica de las concentraciones elementales, no es posible obtener con claridad factores que se asocien a fuentes independientes, sino que aparecen en la mayoría de los casos agrupamiento de trazadores de una o más fuentes. Por ejemplo, la deficiente determinación de K es la responsable de la baja participación de Quema de Leña, lo cual significa que hay otras fuentes que pueden estar sobre explicadas.

Para MP2.5 el principal aporte de 64.5% corresponde a la suma de los aportes de Quema de Leña y empresas metalmecánicas, en segundo lugar hay un aporte de 30.8% asociado a Fundición de cobre. Las concentraciones elementales disponibles no permiten una mejor determinación de las fuentes, a fuentes unitarias.

Para MP10, se presentan resultados para cada uno de las metodologías de medición, dicótomo y alto volumen. Considerando que hay mayor cantidad de masa en los filtros obtenidos con alto volumen, lo cual significa una mejor determinación analítica de las concentraciones elementales, se recomienda considerar los aportes presentados en la Tabla 3-13, la cual difiere de los resultados con dicótomo (Tabla 3-12). Por lo tanto, para MP10 el principal aporte está asociado a empresas metalmecánicas con 42.6% seguido de aerosol

secundario (Amonio y Azufre) con 28.7% asociado a las emisiones de centrales térmicas y emisiones vehiculares.

Considerando que hay resultados analíticos deficientes para algunos elementos, incluso para algunos trazadores, surgen dudas en el real aporte de las fuentes determinadas en el estudio. Por este motivo, se recomienda considerar los resultados con cautela a la espera de los resultados del estudio en paralelo “Estudio Diagnóstico Plan de Gestión del Aire VI Región”.

La superación de la norma anual y promedios mensuales sobre el valor de la norma anual durante la mayoría de los meses, recomienda aplicar modelo receptor para meses de primavera-verano. Los resultados obtenidos para la campaña de otoño-invierno podrían ser diferentes para meses más cálidos en los cuales un aumento de la velocidad del viento puede significar un transporte a mayor distancia y un aumento de la fracción gruesa (asociada a fuentes naturales de MP10).

Para futuras campañas es necesario incluir la determinación de Carbono orgánico, carbono elemental, Amonio y Sulfato para completar la caracterización fisico-química, lo cual permitirá una mayor certeza en la determinación del aporte de emisiones de las principales fuentes emisoras de MP10. Además, los análisis químicos con la técnica ICP-MS podrían dar mejores resultados que ICP-OES principalmente por su mayor sensibilidad en consideración a los elementos trazadores. Pero el pre-tratamiento y dilución de las muestras produce pérdida de material soluble, interacciones entre elementos, contaminación cruzada y posibles errores sistemáticos por manipulación de factores de conversión de unidades y dilución. Por lo tanto, la mejor alternativa es usar técnicas no destructivas (PIXE o XRF).

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Antecedentes Generales .....	1
2	OBJETIVOS .....	2
2.1	General .....	2
2.2	Objetivos Específicos:.....	2
3	METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES .....	4
3.1	Recopilación de información .....	4
3.2	Diagnóstico de calidad de aire .....	5
3.3	Análisis de inventario de emisiones.....	11
3.4	Campaña de monitoreo de MP10.....	14
3.4.1	Antecedentes de la campaña de monitoreo .....	14
3.4.2	Resultados campaña de monitoreo.....	17
3.5	Análisis químico de muestras de material particulado en años 2004, 2005 y 2007.....	21
3.6	Aplicación de modelo receptor .....	24
3.6.1	Antecedentes .....	24
3.6.2	Resultados .....	26
3.7	Determinación de distribución relativa de las fuentes de MP10.....	29
3.7.1	Antecedentes .....	29
3.7.2	Resultados campaña 2007 .....	30
3.7.3	Comparación entre resultados de Kavouras 2001 y CENMA 2007 .....	32
3.8	Propuesta metodológica para futuras aplicaciones de modelo receptor.....	34
3.9	Seminarios de difusión y capacitación.....	36
4	COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES .....	37
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
6	ANEXOS .....	41

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes Generales

Los problemas de contaminación que presenta la ciudad de Rancagua, principal centro urbano de la VI Región, han sido estudiados a partir del año 1996 junto con la implementación de un proyecto de calidad del aire para la ciudad, financiado por la Cooperación Suiza (COSUDE), CONAMA y el Ministerio de Salud. Esta iniciativa permitió identificar que el principal problema de contaminación de la ciudad estaba referido al material particulado respirable menor a 10 micrones (MP10). A través de dicho proyecto, durante los años 1998 – 1999, se estudió que las principales fuentes de este contaminante provenían de las siguientes fuentes de emisión.

- Suelo o emisión de polvo natural
- Quema de leña, para calefacción doméstica y quemas agrícolas.
- Actividad industrial de tipo metalmecánica asociada a la Fundición Talleres,
- Fundición de Cobre, emitido por la chimenea de Caletones de la División El Teniente de CODELCO Chile
- Transporte vehicular, asociado a un transporte público mayor de mucha antigüedad, una sobreoferta del segmento taxis colectivos, entre otros factores.

La primera fase del proyecto de calidad del aire en Rancagua, permitió identificar a esa ciudad con altos índices de contaminación en función de su desarrollo industrial y urbano, ubicado en una cuenca que de acuerdo a sus condiciones topográficas y meteorológicas presenta condiciones desfavorables para la dispersión de contaminantes, lo que implicaba que la ciudad se encontraba en una calidad de ciudad contaminada comparable con una de las ciudades industrializadas más contaminadas de EEUU.

Junto con la instalación de una moderna estación de monitoreo de calidad del aire para Rancagua y la constatación de la superación de la norma diaria para MP10, y un valor promedio anual superior a la norma anual respectiva, se ha iniciado una serie de acciones y de coordinación con los distintos organismos ambientales regionales, para abordar la gestión de la calidad del aire, que entre otras importantes actividades está el desarrollar estudios que permitan actualizar la caracterización de las principales fuentes generadoras del MP10.

Se ha visto que la detección temprana durante los años 1998 – 1999 de las principales fuentes de emisión de MP10, están bien identificadas, y por lo tanto urge actualizar la responsabilidad relativa que tienen cada una de ellas hoy en día. Lo anterior en función de los cambios drásticos que han tenido cada una de las fuentes antes mencionadas. Cabe señalar que la fundición de Caletones de la División El Teniente presenta una emisión actual de dióxido de azufre, que bordea del 20 al 25% de la emisión generada en los años

1998 – 1999, y en el caso del material particulado total, su emisión hoy en día es sólo un 25%, por lo tanto su participación ha cambiado drásticamente respecto de las otras fuentes.

El sector transporte regional, en particular en la ciudad de Rancagua a través de sus procesos de licitación han provocado cambios notorios en la antigüedad de sus máquinas, lo que redundaría en una menor emisión en sus tubos de escapes. Por otra parte se ha detectado una creciente conversión de los hogares de la ciudad de Rancagua, hacia la quema de leña, en función de lo comfortable que resulta este tipo de calificación en desmedro de la generación de contaminantes.

El presente estudio está basado en la necesidad de actualizar las fuentes de emisión que generan en la ciudad de Rancagua un perfil de contaminación tal, que se está constatando por segundo año la superación de sus normas primarias diaria y anual de calidad del aire por MP10, esto es en referencia al período 2004 – 2006, con un percentil 98 de  $153 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un promedio trianual de  $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

A nivel institución el presente estudio permitirá avanzar con los distintos mecanismos que la Ley 19300 establece a través de sus instrumentos de gestión ambiental, entre otros la norma de emisión y calidad, los planes de prevención y descontaminación. La oportuna identificación de fuentes además, permitirá planes de gestión preventivos a aplicar en corto plazo, mientras se levanta y construye información de interés para aplicar los mecanismos antes señalados.

El Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA se ha adjudicado la ejecución del “Estudio diagnóstico fuentes de emisión responsables del material particulado respirable, MP10 en Rancagua”, que incluye campañas de monitoreo y la estimación del impacto de fuentes emisoras de MP10 mediante modelo receptor. El presente informe corresponde al Informe Final de dicho estudio.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 General**

Desarrollar una metodología para la caracterización, identificación y participación relativa de las principales fuentes de emisión de material particulado en la ciudad de Rancagua.

### **2.2 Objetivos Específicos:**

1. Realizar un diagnóstico de calidad de aire en la ciudad de Rancagua a través de la estación COSUDE – Rancagua en el período 2004 – 2007, y analizar los resultados del inventario de emisiones 2006 (en ejecución durante el 2007), con la finalidad de estudiar la relación emisión-calidad para el contaminante material particulado respirable.

2. Desarrollar una campaña de 30 muestras de monitoreo con filtros durante los meses de mayo a junio de 2007, para posterior especiación química de los mismos. Ello con el objetivo de caracterizar fuentes generadoras de material particulado. La elección de los días a desarrollar el muestreo, será de acuerdo a pronósticos de condiciones ambientales adversas y que generan altas concentraciones para el contaminante en la región metropolitana, el cual tiene alta correlación con días de altas concentraciones ambientales de MP10 en Rancagua.
3. Desarrollar una especiación química para los filtros de MP10 muestrados en la estación de monitoreo de calidad del aire de Rancagua en el año 2004, para la caracterización de fuentes generadoras de material particulado. En caso de no disponer de esta información, el oferente deberá entregar una propuesta de muestro adicional a lo señalado en el punto anterior (incluir muestras adicionales)
4. Aplicar un modelo receptor y/o modelo de dispersión para la información arrojada de los filtros MP10 muestrados durante los años 2004 y 2007 para cuantificar la participación relativa de las principales fuentes de emisión de PM en la ciudad.

### **3 METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES**

Para el logro de los objetivos específicos del estudio se identifican las siguientes etapas:

1. Recopilación de información
2. Diagnóstico de calidad del aire en la Zona de Estudio.
3. Análisis del inventario de emisiones
4. Campaña de monitoreo de material particulado
5. Análisis químico del material particulado
6. Aplicación de modelo receptor
7. Determinación de distribución relativa de las fuentes de MP10
8. Propuesta metodológica para futuras aplicaciones/actualizaciones de modelo receptor
9. Preparación de Informes y seminarios de capacitación/difusión

#### **3.1 Recopilación de información**

Esta etapa incluyó realizar las siguientes actividades:

- Revisión de datos históricos disponibles en MINSAL, SAG, CONAMA
- Reuniones de trabajo con los integrantes de la contraparte técnica con el objeto de identificar estudios previos pertinentes (inventarios de emisión disponibles) y definir la forma de acceder a las bases de datos existentes
- Entrevistas con empresas que realizan monitoreo para identificar estudios y/o campañas de medición realizados en la ciudad de Rancagua y alrededores
- Revisión de Estudios de evaluación de impacto ambiental para la ciudad de Rancagua y alrededores
- Confección de bases de datos

El período de análisis consideró la información disponible desde 1996 a la fecha.

Para los objetivos del estudio la información relevante es limitada, la cual se detalla a continuación:

- Resultados de los estudios durante las distintas fases del Proyecto COSUDE. Siendo de importancia la base de datos de calidad de aire (MP10, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO y NO<sub>x</sub>) y meteorología desde Abril 2004 a Julio 2007 de la estación Rancagua de la red SIVICA.
- Base de datos de calidad de aire de la red de Caletones, período 2003 – 2006.
- Base de datos de la red de Central Termoeléctrica Candelaria, período 2004 – 2006.

- Respecto a estimación de emisiones se recopiló el estudio “Inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos en las regiones V, VI y IX de Chile” realizado por CENMA para CONAMA que contiene un inventario base año 1999.
- Respecto a la aplicación de un modelo receptor se recopiló el estudio “Source Apportionment of PM10 and PM2.5 in Five Chilean Cities” elaborado por el investigador de la U. de Harvard Ilias Kavouras en el año 2001. Este estudio consideró mediciones de MP10 y MP2.5 cada 4 días durante el año 1998 en las ciudades de Iquique, Valparaíso, Viña del Mar, Rancagua y Temuco. Se incluye como Anexo junto al CD que acompaña este informe.

### 3.2 Diagnóstico de calidad de aire

Se analizó los resultados de las mediciones registradas en las redes de Codelco División El Teniente (Fundición Caletones), Colbún (Central Termoeléctrica Candelaria), la estación Rancagua de la red COSUDE y las antiguas mediciones de la primera fase del Proyecto COSUDE.

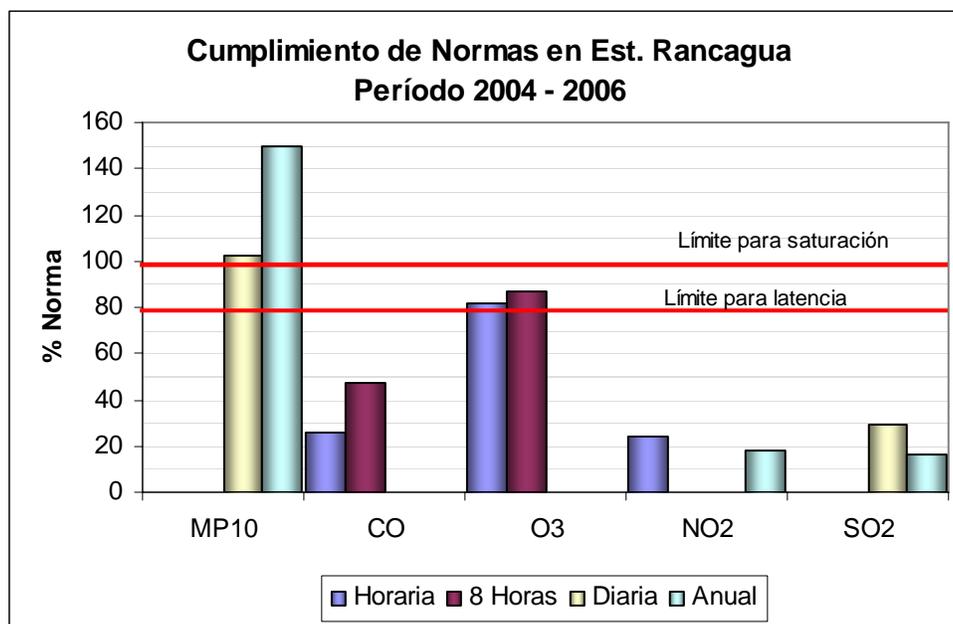
El período de análisis consideró las mediciones realizadas desde 1996 a la fecha. La información recopilada correspondiente a datos de calidad de aire y meteorología serán procesados y desplegados en series de tiempo y ciclos diarios.

El proyecto COSUDE generó información de calidad de aire de carácter exploratorio (uso de tubos pasivos e impactadores gravimétricos tipo Harvard) para esta ciudad y su entorno entre los años 1997 y 2000, detectando potenciales problemas por Ozono y MP10 en Rancagua. Las concentraciones de SO<sub>2</sub> son bajas con un aumento de los niveles al aproximarse al área de influencia de la fundición de Caletones. Para el área de Rancagua, los principales precursores de ozono, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, provienen probablemente de las emisiones de vehículos en la ciudad.

Los resultados de las mediciones de MP10 realizadas entre 1997 y 2000 permitieron definir la ubicación de una estación de monitoreo, donada a MINSAL por COSUDE, equipada para medición continua de MP10, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas. Esta estación forma parte de la segunda fase del Proyecto COSUDE, “Estudio de la Calidad del Aire en Regiones Urbano-Industriales de Chile” que incluye estaciones similares en Viña del Mar y Temuco. La estación de monitoreo fue instalada a mediados de marzo de 2004 en una zona residencial.

Las mediciones realizadas en la estación COSUDE de Rancagua confirmaron los altos niveles de MP10 y Ozono detectados en las mediciones exploratorias de 1997 a 2000. La Figura 3-1 ilustra los porcentajes de superación de la norma diaria y anual de MP10 con un

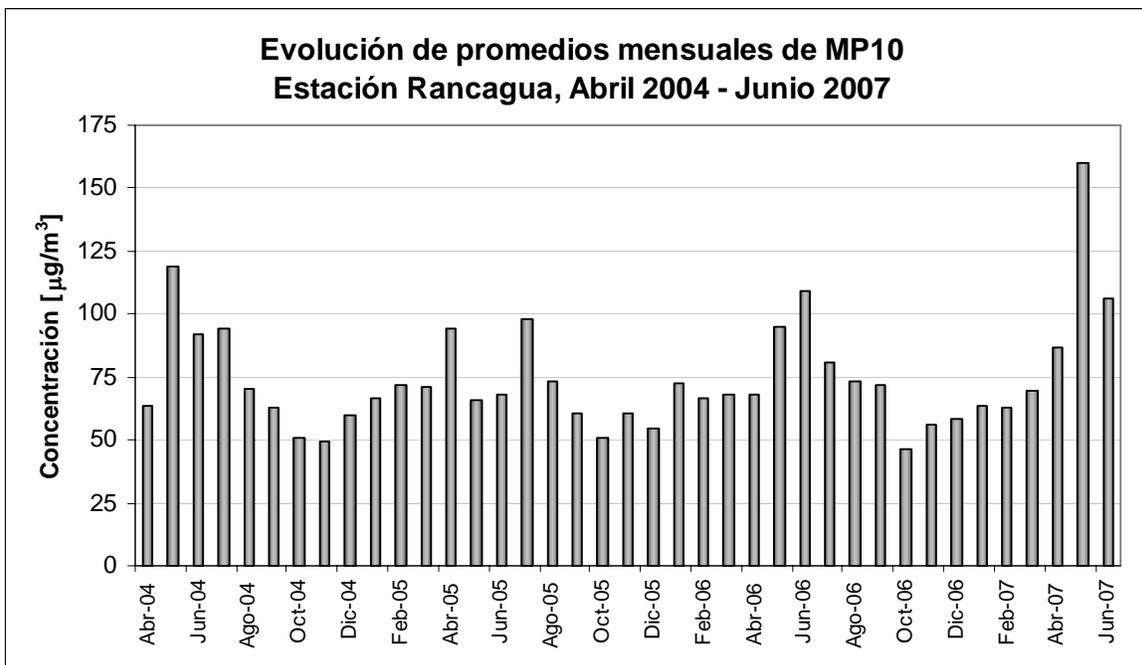
percentil 98 de  $153 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el año 2006 y un promedio trianual (2004 – 2006) de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para Ozono las concentraciones de 8 horas superan el límite de latencia con un percentil 99 (tri-anual) de 53 ppb equivalente al 87% de la norma de 8 horas. Las concentraciones de  $\text{SO}_2$ , CO y  $\text{NO}_2$  son bastantes menores a las registradas en las normas.



**Figura 3-1 Cumplimiento de Normas en Estación Rancagua, Abril 2004 a Diciembre 2006**

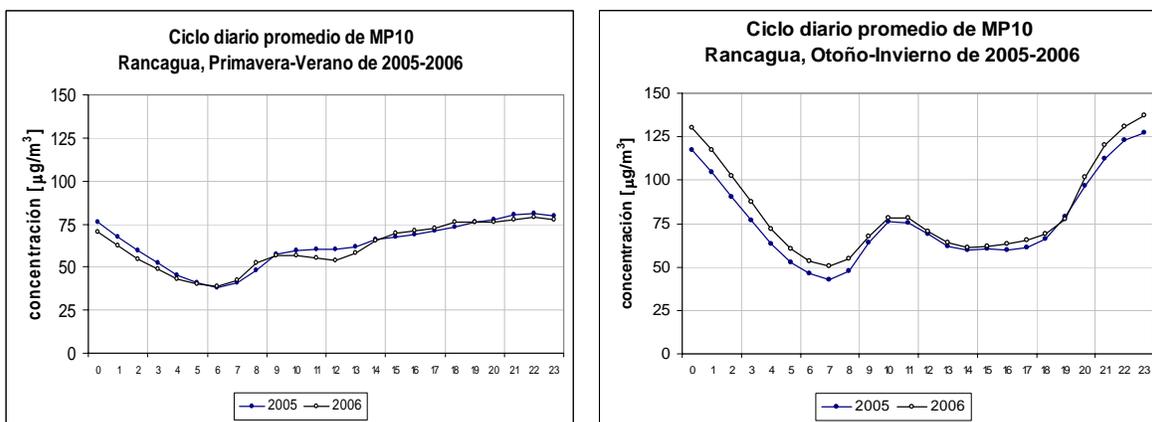
Las concentraciones de MP10 tienen un fuerte comportamiento estacional con un notorio aumento de los niveles en los meses de otoño-invierno, durante los cuales algunos días alcanzan concentraciones en el rango de alerta y pre-emergencia (DS 369/1988 de MINSAL). En los años 2004, 2005 y 2006 se registraron 11, 5 y 8 días respectivamente sobre el valor fijado en la norma diaria ( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Durante el año 2007 entre Abril y Junio se han registrado 23 días sobre  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La Figura 3-2 muestra la evolución de los promedios mensuales de MP10 entre abril de 2004 y junio de 2007. Se aprecia el ciclo estacional con marcado aumento de las concentraciones durante meses de otoño-invierno por la ocurrencia de episodios críticos de contaminación en días de estabilidad atmosférica, situación similar a Santiago. Además, la mayoría de los meses presentan un promedio mensual sobre  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor establecido para norma anual.



**Figura 3-2 Evolución de promedios mensuales de MP10 en Rancagua**

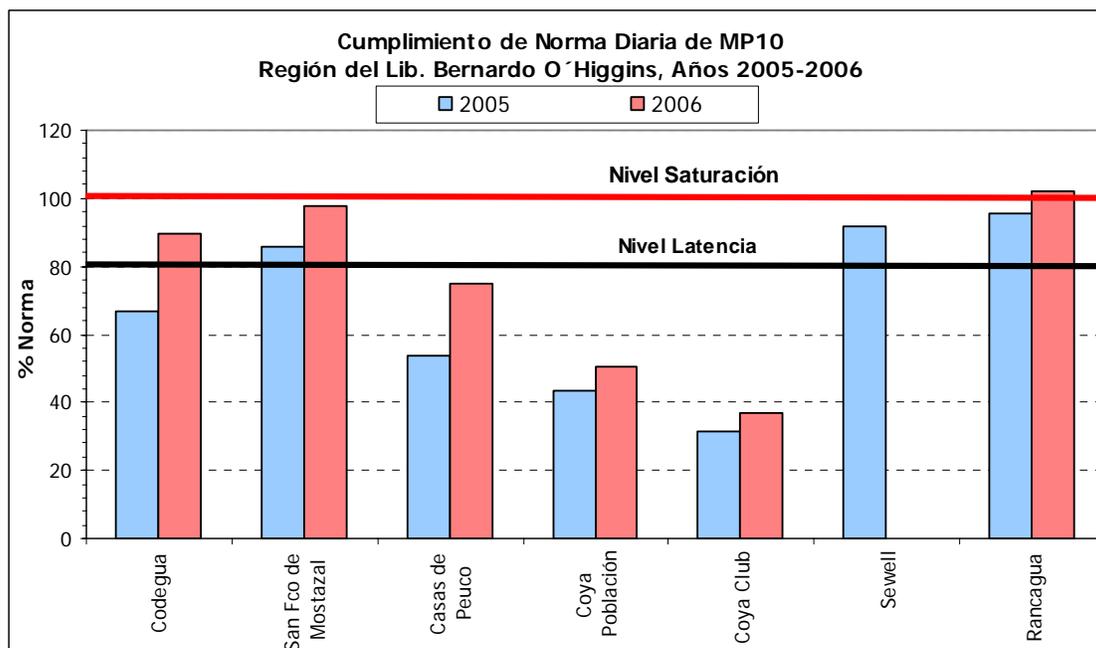
El comportamiento de las concentraciones de MP10 durante el día también presenta fuertes diferencias entre meses de primavera-verano (con menores concentraciones) y los meses de otoño-invierno durante los cuales hay un pronunciado aumento de las concentraciones durante la noche. Situación ilustrada en la figura siguiente:



**Figura 3-3 Ciclos diarios promedios de MP10, estación COSUDE Rancagua, período Primavera-verano y otoño-invierno, años 2005 y 2006**

Al comparar las concentraciones diarias de MP10 con la norma (ver Figura 3-4) se aprecia un aumento de los niveles en el año 2006 respecto a 2005. Además, las estaciones de

Codegua, San Francisco de Mostazal y Sewell (concentraciones disponibles hasta 2005) están en niveles de latencia y la estación de Rancagua en nivel de saturación.

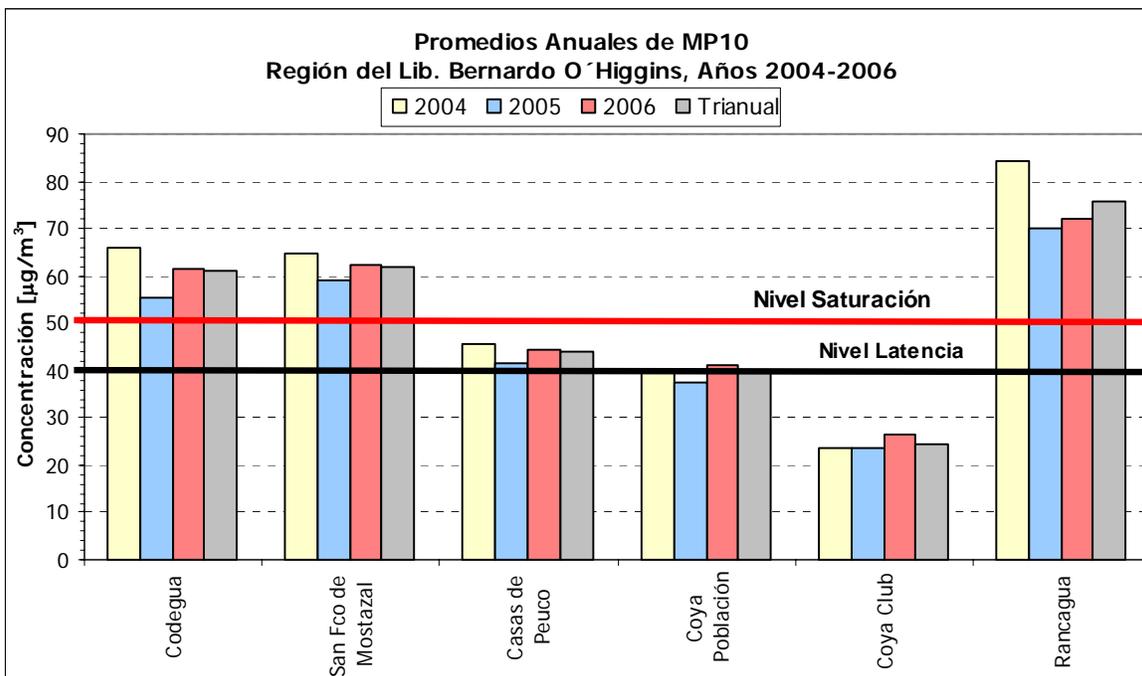


**Figura 3-4 Cumplimiento de norma diaria de MP10 en estaciones de la VI Región**

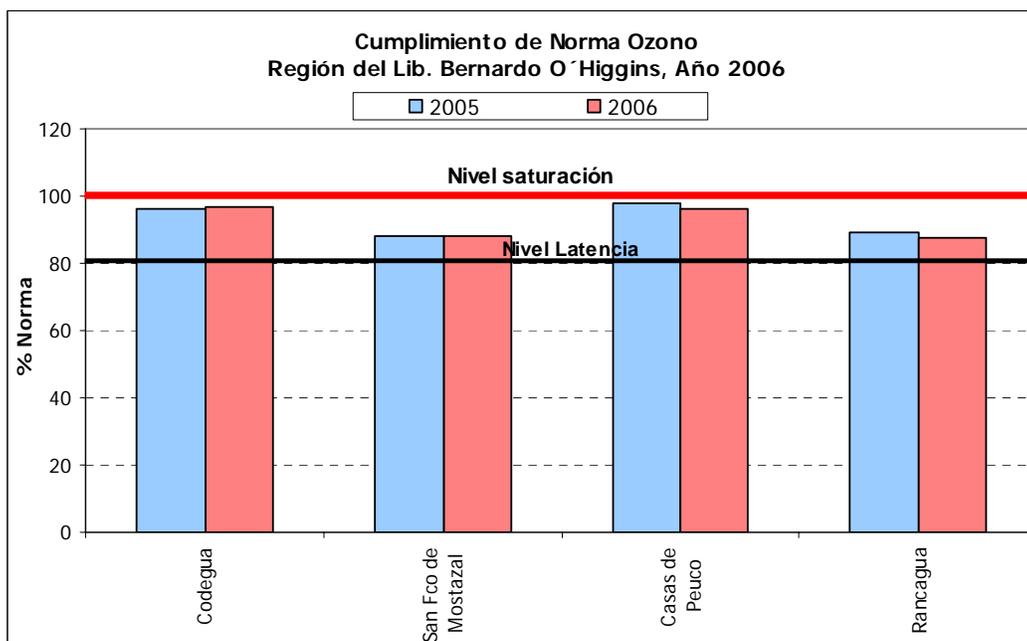
La norma anual de MP10 es excedida en Rancagua y en las estaciones de Codegua, San Francisco de Mostazal y Sewell (concentraciones disponibles hasta 2005). Las estaciones Casas de Peuco y Coya Población presentan concentraciones en nivel de latencia lo cual da cuenta de un problema generalizado en la Región (ver Figura 3-5).

Las estaciones de la central Termoeléctrica Candelaria en Codegua, Casas Peuco y San Francisco de Mostazal registran concentraciones de 8 horas de Ozono por sobre el límite de latencia, al igual que la estación en Rancagua (ver Figura 3-6). Además, la comparación con la norma no presenta diferencias significativas entre los años 2005 y 2006.

Las concentraciones de SO<sub>2</sub> son bastante menores a la norma en las estaciones de Casas Peuco, San Francisco de Mostazal, Codegua y Rancagua, alejadas del área de influencia de Caletones. Solamente Sewell presenta altos niveles (Figura 3-7). Sin embargo, las concentraciones de SO<sub>2</sub> en las estaciones de la red de Caletones han presentado durante los últimos años una fuerte disminución de los niveles producto del exitoso plan de descontaminación (Figura 3-8).



**Figura 3-5 Cumplimiento de norma anual de MP10 en estaciones de la VI Región**



**Figura 3-6 Cumplimiento de normas de Ozono en estaciones de la VI Región**

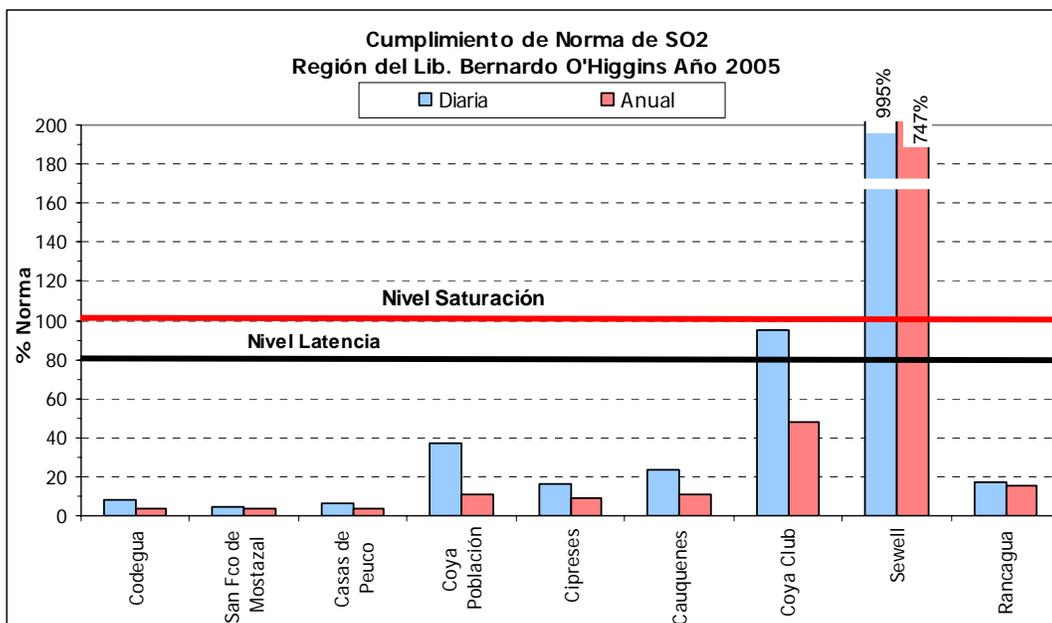


Figura 3-7 Cumplimiento de normas de SO2 en estaciones de la VI Región

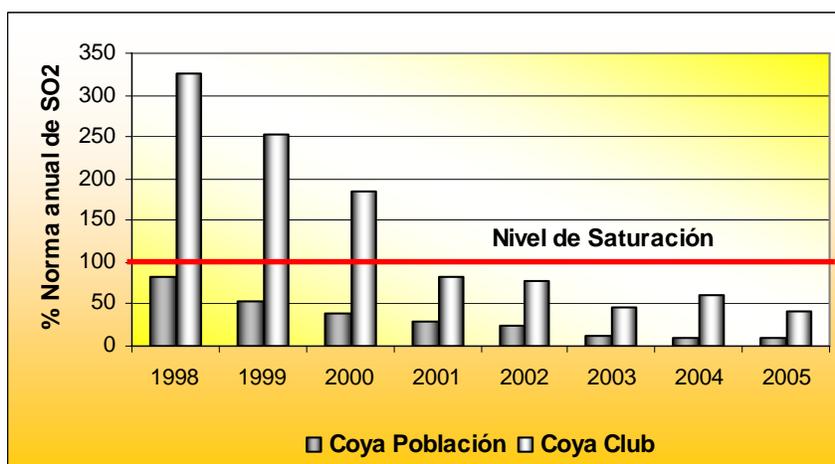


Figura 3-8 Excedencias de Norma de SO2 en Coya Población y Coya Club

### 3.3 Análisis de inventario de emisiones

Esta actividad requiere los resultados de la actualización de inventario que está realizando DICTUC. A la fecha se ha recopilado el estudio “Inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos en las regiones V, VI y IX de Chile” realizado por CENMA para CONAMA y los Informes de Avance entregados por DICTUC.

Sin embargo, el grado de avance reportado en el “Informe de Avance 2” del “Estudio Diagnóstico Plan de Gestión del Aire VI Región” presenta los resultados finales de Fuentes Puntuales para la VI región y para Rancagua. Para el caso de las fuentes areales se informa los resultados finales de 7 fuentes de un total de 13 que serán estimadas, mientras que para las fuentes de polvo fugitivo se presentan resultados parciales en 2 de las 3 fuentes que se estimarán. Respecto a las fuentes móviles solo se informan resultados parciales en una de las fuentes fuera de ruta.

Para el resto de las fuentes se informa la metodología y resultados temporales obtenidos de otros estudios o con datos no actualizados mientras se recolecta la información necesaria para realizar el cálculo.

Por este motivo, la información disponible en el presente informe permite una comparación de resultados totales únicamente para las fuentes puntuales.

**Tabla 3-1 Comparación inventarios de emisión de la VI Región para el año 1999 y actualización para el año 2006**

Año	MP10	CO	NOx	COV	SOx	NH3
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
1999	2654	533	751	11	482861	96
2006	3092*	1179	4387	53	123218	392

\*Informe de avance 2 señala como resultado total de fuentes puntuales 4139 ton/año, valor que no corresponde al sumar los resultados parciales

Para realizar la estimación de emisiones de la VI Región se consideraron 421 fuentes, a diferencia de las 159 consideradas en el inventario de 1999. Se observa un aumento coherente en la estimación de emisiones de MP10, CO, COV y NH3 de acuerdo al aumento de fuentes emisoras y medidas de control aplicables en algunas de ellas. El NOx, presenta un aumento mayor, el cual corresponde al aumento en el consumo de gas para calderas y producción primaria de cobre. Para el caso del SOx, la estimación disminuye considerablemente respecto al año 1999, principalmente debido a la disminución en las emisiones de las fuentes productoras de cobre.

**Tabla 3-2 Comparación inventarios de emisión de Rancagua para el año 1999 y actualización para el año 2006**

Año	MP10	CO	NOx	COV	SOx	NH3
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
1999	35	52	82	1	706	12
2006	45	19	17	0	83	4

El cálculo de emisiones para el año 2006 de Rancagua consideró 95 fuentes mientras que en el año 1999 se consideraron 43. La emisión de MP10 y COV aumenta en forma coherente respecto al aumento de las fuentes. Respecto al resto de los parámetros se observa importantes disminuciones debido a las medidas de control de emisiones que se han tomado en calderas para calefacción e industriales principalmente.

CENMA se compromete a revisar el informe final de DICTUC, el cual se entregará de acuerdo a lo informado por CONAMA a mediados de Noviembre.

Las tablas siguientes resumen el inventario base 1999 para Rancagua y la VI Región

**Tabla 3-3 Inventario de emisiones atmosféricas de la VI Región (Año 1999)**

Sub-grupo	MP [ton/año]	CO [ton/año]	NOx [ton/año]	COV [ton/año]	SOx [ton/año]	NH3 [ton/año]
Sub-total puntuales	2654	533	751	11	482861	96
Sub-total areales	3967	24579	409	9262	81	11809
Sub-total fuentes fugitivas (1)	8772					
Sub-total fuentes móviles (2)	NE	NE	NE	NE	NE	NE
<b>Total inventario</b>	<b>15392</b>	<b>25112</b>	<b>1160</b>	<b>9273</b>	<b>482942</b>	<b>11905</b>

(1): Las emisiones de polvo resuspendido de calles pavimentadas sólo presentan una cobertura para la ciudad de Rancagua, por tanto se excluyeron del Inventario Regional

(2): La emisiones de fuentes móviles solo presentan una cobertura que cubre Rancagua, por tanto estas emisiones se excluyeron del Inventario Regional

**Tabla 3-4 Inventario de emisiones atmosféricas de Rancagua,(Año 1999)**

Sub-grupo	MP [ton/año]	CO [ton/año]	NOx [ton/año]	COV [ton/año]	Sox [ton/año]	NH3 [ton/año]
Sub-total puntuales	35	52	82	1	706	12
Sub-total areales (1)	18	67	125	10937	80	122
Sub-total fuentes fugitivas (2)	4956					
Sub-total fuentes móviles	44	7948	1013	965	51	16
<b>Total inventario</b>	<b>5054</b>	<b>8068</b>	<b>1220</b>	<b>11903</b>	<b>837</b>	<b>150</b>

(1): Para las emisiones provenientes de crianza de animales y aplicación de pesticidas solo existen valores globales para la Región por tanto estas no están consideradas para Rancagua

(2): Para las emisiones provenientes de actividades de construcción y preparación de terrenos agrícolas solo existen valores globales para la Región por tanto estas no están consideradas para Rancagua

### **3.4 Campaña de monitoreo de MP10**

#### **3.4.1 Antecedentes de la campaña de monitoreo**

Para aplicar modelo receptor destinado a estimar el aporte de las principales fuentes de MP10 se desarrolló una campaña de monitoreo de material particulado fino y grueso en Rancagua para obtener al menos 30 muestras (30 finas y 30 gruesas) durante el período de mayores concentraciones de MP10 (mayo-junio). Además, durante este período se tomaron muestras en paralelo de MP10 con un muestreador de alto volumen.

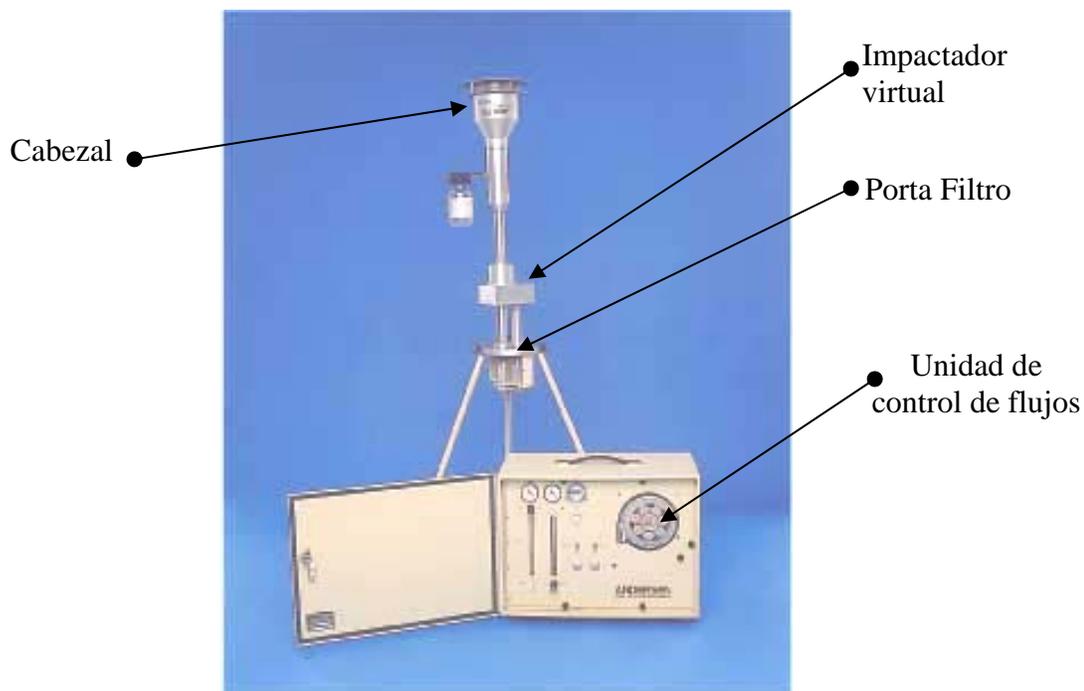
La campaña fue complementada con los análisis químicos de muestras recolectadas en campañas similares desarrolladas en la estación Rancagua durante los años 2004 y 2005 para verificar el funcionamiento del monitor continuo de MP10 de atenuación Beta.

Sobre el techo de la estación COSUDE se instaló un muestreador gravimétrico Dicotomo Anderssen, método referencia EPA RFPS-0789-073, que permite tomar muestras de material particulado menor a 10 micrones en 2 fracciones (fina y gruesa). Este equipo, consiste básicamente en un cabezal toma muestra onni-direccional, un impactador virtual, 2 porta filtros (para filtros de 37 mm), una bomba de aspiración y una unidad de control de flujos. El flujo de operación es de 16.7 l/min, valor que permite el ingreso de las partículas menores de 10  $\mu\text{m}$  al cabezal. Posteriormente, en el impactador se produce la separación de la muestra de aire en dos fracciones, fina (partículas menores que 2.5  $\mu\text{m}$ ) y gruesa (partículas entre 2.5 y 10  $\mu\text{m}$ , respectivamente). La muestra pasa a través de los filtros depositando las partículas en ellos, posteriormente mediante un análisis gravimétrico en laboratorio se determina la masa acumulada en cada una de las fracciones. La concentración de cada una de las fracciones, para el periodo de medición, se determina en función de la masa inicial, final, el tiempo de muestreo y los flujos (inicial y final).

El equipo dicótomo utilizó filtros de teflón de 37mm y 2 micrones de tamaño de poro orientado para análisis de metales.

La Figura 3-9 muestra una fotografía de un equipo Dicótomo, similar al utilizado en las mediciones.

En un andamio al costado de la estación se instaló un muestreador de alto volumen, marca Andersen, modelo 321, método de referencia EPA RFPS-1287-064. Este equipo está equipado con un cabezal MP10 y un flujo de operación cercano a 1 m<sup>3</sup>/min. Se utilizarán filtros de cuarzo de 8x11 in. Estas mediciones serán utilizadas para verificar el funcionamiento del dicótomo, disponer de muestras adicionales de MP10 con una mayor cantidad de masa para análisis químico de determinación de metales y determinación de aniones y cationes. La Figura 3-10 muestra ilustra el muestreador instalado en la estación COSUDE de Rancagua.



**Figura 3-9 “Equipo Dicótomo”**

Cada medición tuvo una duración de 24h con cambio de filtros alrededor de las 10AM para no interrumpir los episodios de altas concentraciones que generalmente ocurren durante la noche y primeras horas del día (período de mayor estabilidad atmosférica).

Las mediciones con los equipos muestreadores comenzaron el 4 de mayo. La operación de los equipos de monitoreo fue realizada por profesionales de la Unidad de Instrumental y Estaciones de Monitoreo de CENMA.

La figura siguiente ilustra la instalación de ambos equipos en Rancagua.



**Figura 3-10 Muestreador de alto volumen instalado en Rancagua**

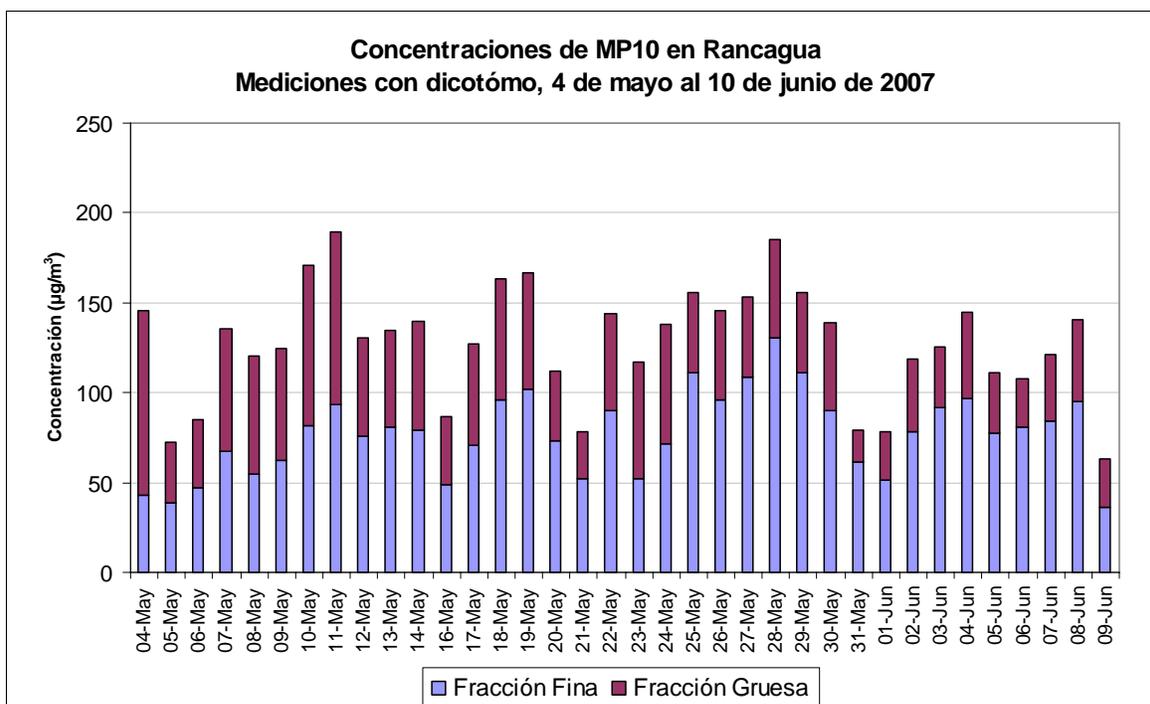


**Figura 3-11 Ubicación de equipos de muestreo en la estación Rancagua**

### 3.4.2 Resultados campaña de monitoreo

La campaña de muestreo se inició el 4 de Mayo finalizando el 10 de Junio de 2007. Se obtuvieron 36 muestras de fracciones fina y gruesa con equipo dicótomo y 36 muestras con equipo de alto volumen. Cada muestreo tiene una duración de 24h con inicio a las 10h.

La figura siguiente resume las concentraciones fina y gruesa para cada día de muestreo:



**Figura 3-12 Concentraciones de MP10 en campaña 2007**

La Tabla 3-5 presenta los valores promedios para las mediciones con dicótomo, fracciones fina, gruesa y MP10 (fina + gruesa) para las campañas de medición de 2004, 2005 y 2007 en Rancagua.

**Tabla 3-5 Resumen de resultados de mediciones válidas con dicótomo, Estación Rancagua, campañas 2004, 2005 y 2007**

Campaña	Promedio	Promedio	Promedio	Participación en MP10	
	F. Fina $\mu\text{g}/\text{m}^3$	F.Gruesa $\mu\text{g}/\text{m}^3$	MP10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	% F. Fina	% F. Gruesa
09-jul a 09-sep 2004	52.3	35.3	87.6	60	40
31-jul a 22-ago 2005	58.6	38.1	96.7	61	39
04-may a 10-jun 2007	77.2	50.7	127.9	61	39

En general, la fracción fina es mayoritaria en el material particulado respirable de Rancagua con un porcentaje promedio cercano a 61% en las 3 campañas. Este porcentaje de participación aumenta para aquellos días con mayores concentraciones de MP10, situación que se aprecia en las Figuras 3-13, 3-14 y 3-15. La campaña de 2007 se realizó en meses de mayores concentraciones, lo cual explica los mayores niveles.

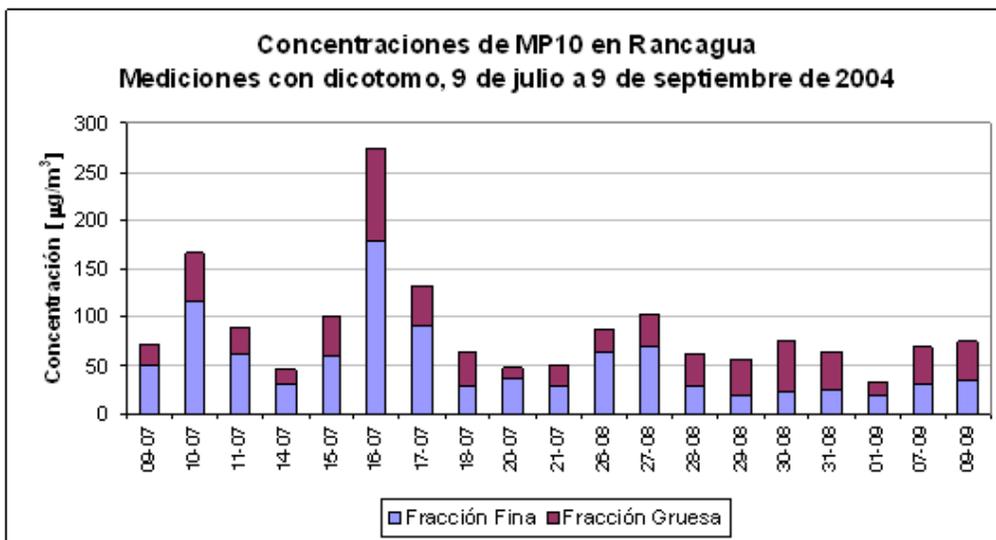


Figura 3-13 Concentraciones de MP10 en campaña 2004

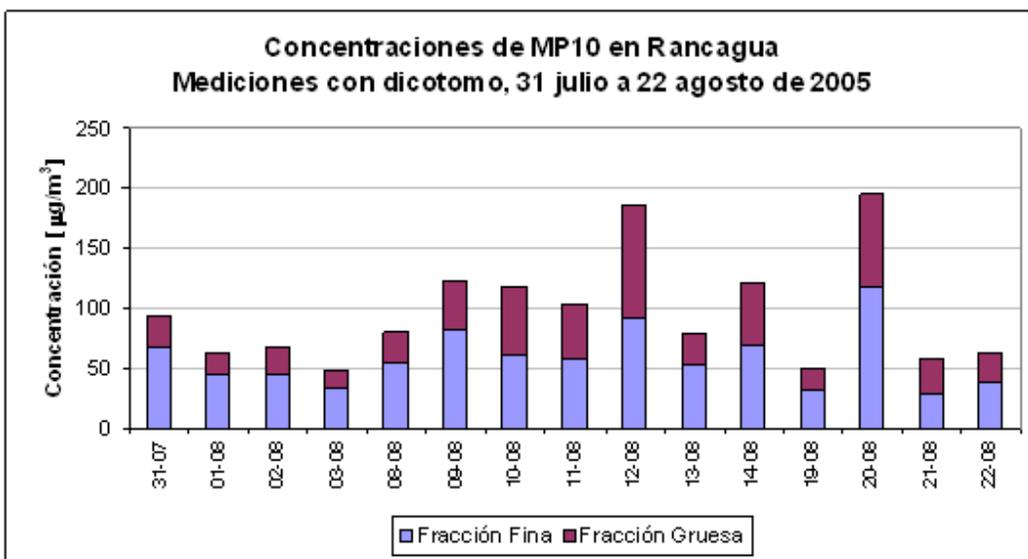


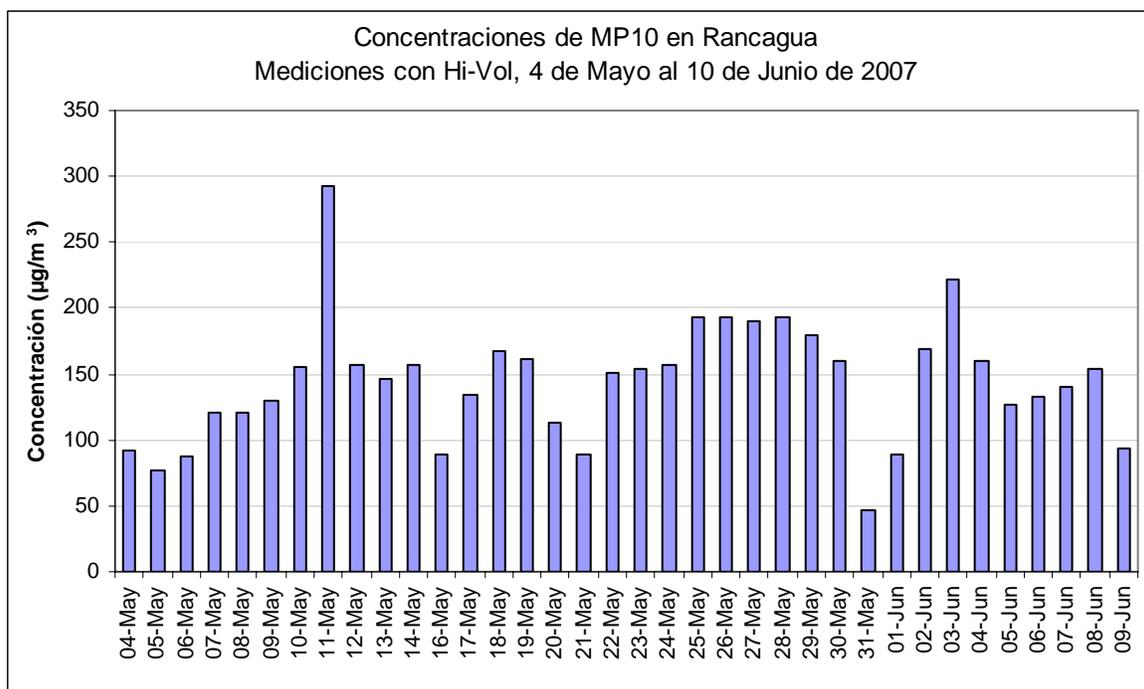
Figura 3-14 Concentraciones de MP10 en campaña 2005

La Tabla 3-5 resume los resultados de las mediciones de MP10 con muestreador gravimétrico de alto volumen (hi-vol).

**Tabla 3-6 Resumen resultados muestreos de MP10 con Hi-Vol**

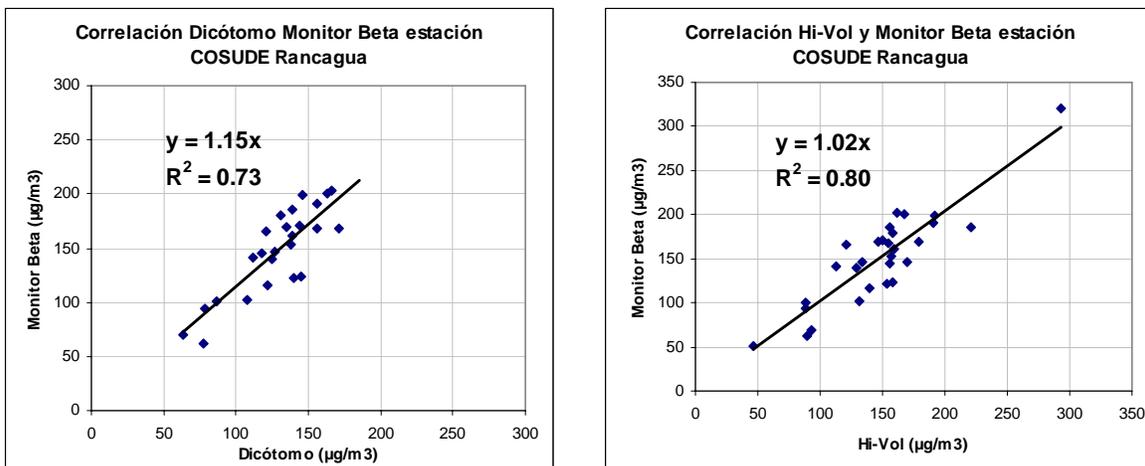
Período	N muestras	Mínimo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Máximo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Desv std. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Días conc. $> 150\mu\text{g}/\text{m}^3$
4 Mayo al 10 Junio	36	46.0	293.4	144.0	46.5	19

El período 4 de Mayo al 10 de Junio registró 19 días con concentraciones mayores al nivel fijado en la norma diaria, situación que se presenta en la Figura 3-15. Es necesario destacar que mayo de 2007 registró una concentración promedio mensual de  $159.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  lo cual corresponde al mayor promedio mensual medido con el monitor continuo Beta en la estación Rancagua desde Abril de 2004.



**Figura 3-15 Concentraciones de MP10 en campaña 2007**

Al correlacionar las concentraciones obtenidas con los muestreadores gravimétricos dicótopo y alto volumen versus el monitor continuo de atenuación Beta se obtienen buenos coeficientes de correlación  $R^2$  de 0.73 y 0.8 respectivamente. Por otro lado, las concentraciones medidas con monitor Beta son aproximadamente un 2% más altas que las medidas con alto volumen y un 15% más altas que con dicótopo. Las menores concentraciones obtenidas con equipo dicótopo se atribuyen a saturación de los filtros especialmente durante los días de mayor concentración.



**Figura 3-16 Correlación entre muestreadores gravimétricos de MP10 y monitor Beta**

Las metodologías de medición de los equipos de alto volumen, Beta y dicótopo son considerados de referencia por la Norma Chilena. Sin embargo, el equipo de mayor confiabilidad por la cantidad de masa acumulada para determinar concentraciones diarias de MP10 es el muestreador de alto volumen (considerado equipo de referencia por USEPA al compararlos con dicótopo y monitor beta).

La buena correlación ( $R^2=0.8$ ) y el valor 1.02 de la pendiente (2% de diferencia) al comparar Alto Volumen y monitor Beta confirma el buen funcionamiento de la metodología de atenuación Beta para determinar concentraciones diarias y horarias de MP10 en Rancagua.

### **3.5 Análisis químico de muestras de material particulado en años 2004, 2005 y 2007**

Los análisis químicos fueron realizados en el Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental de CENMA, que cuenta con acreditaciones tanto nacionales como internacionales para la competencia en los ensayos referidos.

- Acreditación ISO/NCh 17025 otorgada por el Instituto Nacional de Normalización, INN.
- Acreditación ISO/IEC 17025 otorgada por el Ministerio de Medio Ambiente, desarrollo Sostenible y Parques de Québec, Canadá.

Las muestras ambientales fueron recolectadas en filtros de teflón y cuarzo.

Para determinar metales en filtros de teflón obtenidos con dicótomo (fracciones fina y gruesa) y muestras de cuarzo obtenidas con alto volumen, las muestra fueron digeridas mediante una digestión ácida asistida por microondas y luego analizadas mediante ICP-OES.

Técnica de análisis ICP-OES es multi-elemental, permite la determinación simultánea de varios metales. Utiliza una fuente de plasma de acoplamiento inductivo para disociar los átomos o iones que constituyen la muestra, excitándolos a un nivel donde emiten luz de una longitud de onda característica. Un detector mide la intensidad de la luz emitida y calcula la concentración de ese elemento, en particular, de la muestra.

Se determinaron los siguientes metales: Cd, Zn, Cr, As, Cu, Ni, Pb, Al, Se, Mn, Ag, V, Ba, Co, Be, Fe, S, Mg, S, K, Ca, Ti, Rb, Sr, Zr, Sn y Sb.

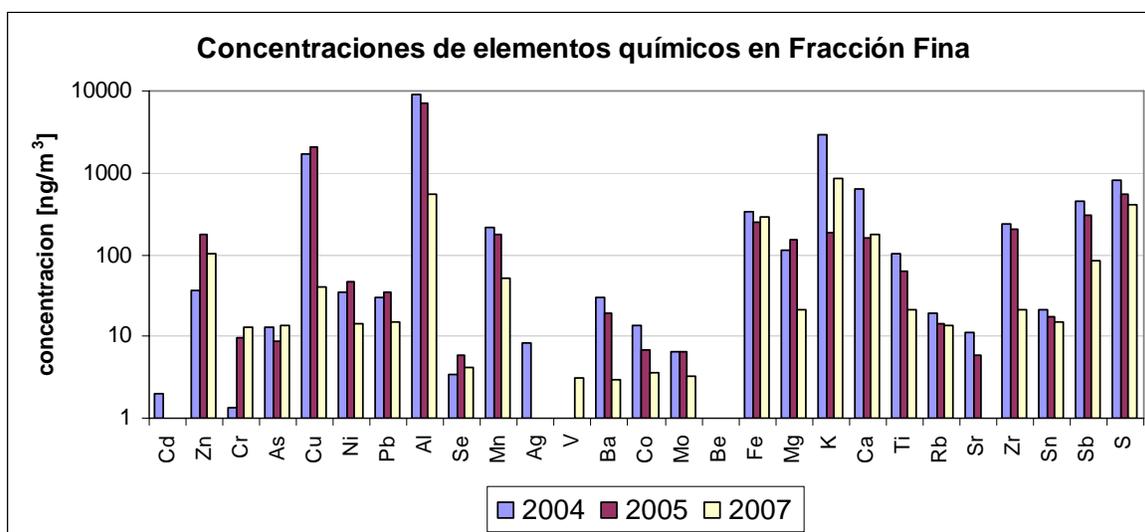
Para determinar iones y cationes, los filtros de cuarzo son diluidos en agua calidad nanopure, la solución iónica es filtrada e inyectada en un equipo de cromatografía iónica en el cual la muestra pasa a través de una serie de cambiadores iónicos. Los iones de interés, se separan en función de su afinidad relativa por el cambiador de baja capacidad, aniónico o catiónico, y se miden con un detector adecuado, generalmente de conductividad. Los iones son identificados por sus tiempos de retención y cuantificados por el área o altura de peak, comparándolos con un patrón adecuado.

Se determinaron los siguientes iones y cationes: K, Na, Ca, NH<sub>4</sub>, Mg y Li

Los gráficos siguientes (Figura 3-17 y Figura 3-18) presentan las concentraciones promedios de los metales en fracciones fina y gruesa de MP10 obtenidos en filtros de teflón con equipos dicótomos para las campañas realizadas en los años 2004, 2005 y 2007. En Anexo se presenta una tabla con resumen de los análisis para cada una de las campañas.

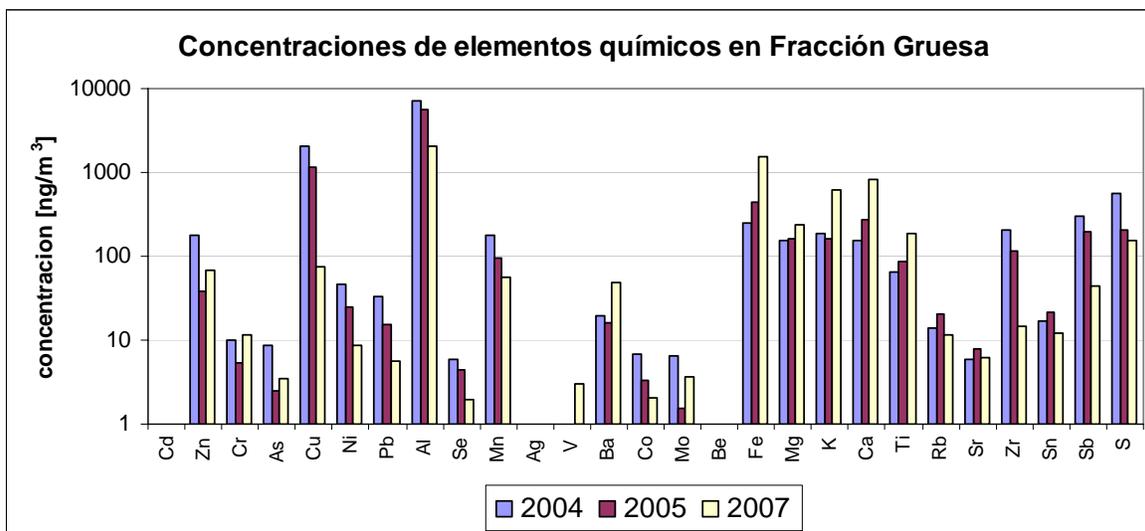
Adicionalmente se entrega un planilla de calculo (archivo Excel) con las concentraciones elementales para cada muestra, incluyendo la masa y concentraciones de los filtros.

Existen algunas diferencias entre concentraciones obtenidas para las campañas de los años 2004-2005 y la campaña de 2007. En parte estas diferencias pueden ser atribuidas al tiempo que han permanecido las muestras almacenadas, lo cual puede producir interacción entre los componentes de las muestras y degradación de las mismas. Los elementos con mayores diferencias son Al, Cu, K. Además, B y Si no se incluyeron en los resultados por presentar valores que no corresponden a la realidad atribuido a la metodología analítica usada.

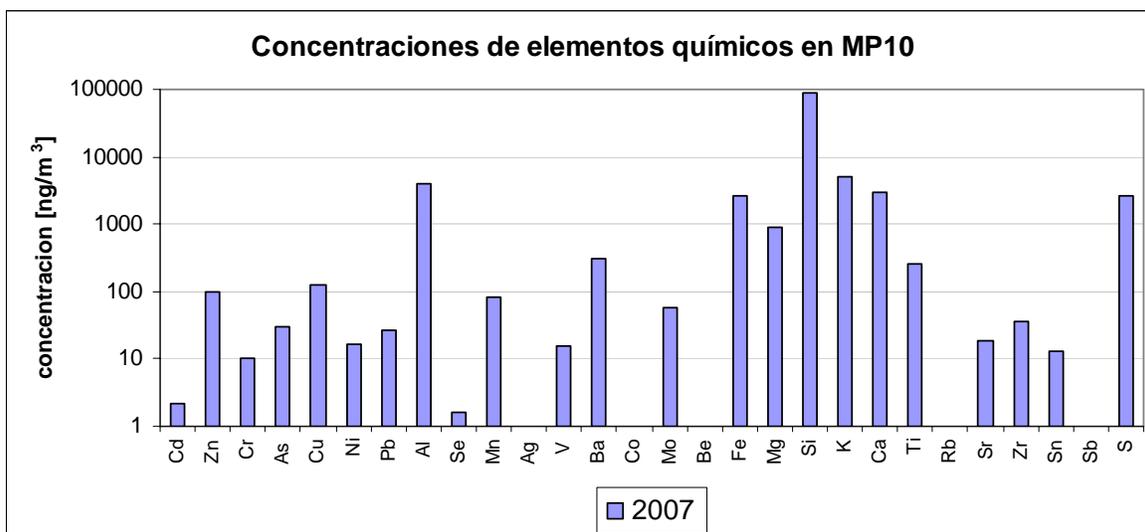


**Figura 3-17 Concentraciones promedios de metales en muestras de fracción fina obtenidas con equipos dicótomos en Rancagua, período invierno años 2004, 2005 y 2007**

La Figura 3-19 ilustra las concentraciones promedios de metales en muestras de MP10 obtenidas en filtros de cuarzo con equipo de alto volumen (hi-vol) durante la campaña de 2007. En Anexo se presenta una tabla con resumen de los análisis para cada una de las campañas. Adicionalmente se entrega un planilla de calculo (archivo Excel) con las concentraciones elementales para cada muestra, incluyendo la masa y concentraciones de los filtros.



**Figura 3-18** Concentraciones promedios de metales en muestras de fracción gruesa obtenidas con equipos dicótomos en Rancagua, período invierno años 2004, 2005 y 2007



**Figura 3-19** Concentraciones promedios de metales en muestras de MP10 obtenidas con equipos de alto volumen en Rancagua, período invierno de 2007

### 3.6 Aplicación de modelo receptor

#### 3.6.1 Antecedentes

Para esta actividad están disponibles un total de 67 muestras de fracciones finas y gruesas de MP10 obtenidas con dicótomo correspondientes a 16 del año 2004, 15 del año 2005 y 36 del año 2007. Se espera contar en total con al menos 60 muestras válidas de cada fracción. Además, para MP10 hay disponibles 36 muestras obtenidas con muestreador de alto volumen lo.

Se aplicó el modelo de factores absolutos principales (absolute principal factor scores, APFS) de acuerdo a la metodología utilizada por la U. de Harvard en el estudio de caracterización en 5 ciudades Chilenas (Iquique, Viña del Mar, Valparaíso, Rancagua y Temuco) (Kavouras et al. 2001) y por la U. de Sao Paulo en las campañas de caracterización fisico-química desarrollada en la Región Metropolitana durante los años 1996, 1998 y 1999 (Artaxo, 1996; Artaxo, 1998; Artaxo, 1999, Artaxo et al, 1999).

Las corridas del modelo consideraron entre 4 y 6 factores, eligiendo como resultado final aquellos casos con una mayor explicación de la varianza y menores diferencias entre lo calculado y lo modelado. En función del agrupamiento de las especies químicas en los factores principales se correlacionaron con los elementos característicos o trazadores de fuentes de emisión para determinar las fuentes emisoras [Switlicki et al., 1996]. La tabla siguiente presenta algunos elementos trazadores que permiten asociar fuentes contaminantes:

**Tabla 3-7 Elementos trazadores de fuentes contaminantes**

Fuente	Elementos trazadores
Plantas que usan carbón	As, Se, S
Plantas a petróleo	V, Ni, “tierras raras”
Motor de vehículos (gasol con Pb)	Br, Pb
Incineradores	Ag, Zn, Sb, Cd, Sn, Pb
Caliza, concreto	Ca, Mg
Polvo de suelo	Mn, Al, Sc, Si, Fe, Ti
Quema de Leña	K, VOC, EC
Fuentes móviles	Pb, Br, VOC, EC
Refinerías	Tierras raras (Sc, Y, La, etc)
Fundiciones	In, Cd, As, Se, S

El primer paso de la metodología consiste en construir la matriz de datos (m especies x n muestras) con “n” filas en las cuales se despliegan las concentraciones elementales de los

“m” elementos o especies químicas expresadas en ng/m<sup>3</sup>. Luego la matriz se normaliza, para cada concentración elemental se resta la concentración promedio del elemento y divide por la desviación estándar:

$$Z_{ik} = \frac{C_{ik} - \bar{C}_i}{\sigma_i}$$

Las concentraciones estandarizadas  $Z_{ik}$  pueden ser expresadas como combinaciones lineales de “nuevas variables” denominadas factores (F's) o componentes principales:

$$Z_{ik} = a_{i1}F_{1k} + a_{i2}F_{2k} + a_{i3}F_{3k} + \dots + a_{ip}F_{pk}$$

Las “ $a_{ij}$ ” representan la importancia (“peso” o “ponderación”) que tiene cada variable con respecto a cada uno de los factores (factor de carga o “factor scores”).

Luego se aplica Análisis de componentes principales (PCA), para lo cual se utilizará el software estadístico SPSS. La solución matemática tiene que ser transformada en una solución con significado físico, lo cual implica rotar la matriz (generalmente con VARIMAX). La figura siguiente ilustra el efecto de la rotación de una representación gráfica en 3 dimensiones de Pb, Br y Cr elementos trazadores del impacto de una carretera (fuentes móviles) y una planta de cromado de metales, al rotar la gráfica se aprecia una correspondencia entre Pb y Br, elementos trazadores de las fuentes móviles, los cuales pueden ser asociados a un primer factor principal.

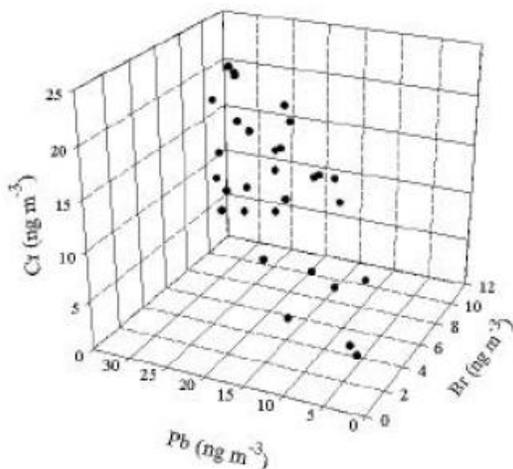


Figure 1. Three dimensional plot of simulated data.

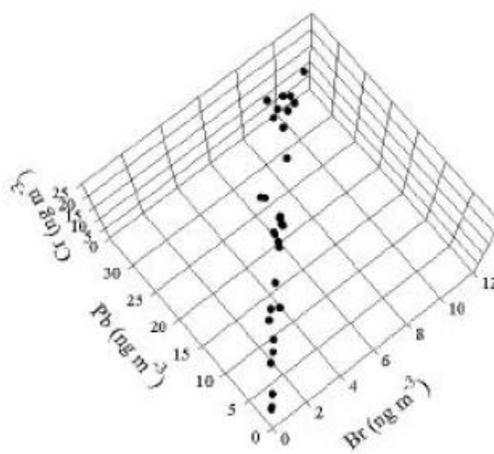


Figure 2. Plot of the simulated data as viewed from above relative to the view in Figure 1.

**Figura 3-20 Ejemplo de rotación de representación de impacto de Carretera (Pb y Br) y planta de cromado (Cr) en un receptor**

Luego se aplica Análisis de los Puntajes Absolutos de los factores y determinación de las contribuciones de las fuentes a las concentraciones de cada elemento El Análisis de Factores se basa en la interrelación entre las variables buscando aspectos comunes entre ellas y fundamentalmente en un análisis de varianza para medir la dispersión de la información.

Posteriormente se realiza una regresión con cada muestra con APFS para obtener la contribución de cada elemento por cada componente [Switlicki *et al.*, 1996]. Los perfiles de las fuentes así obtenidos se comparan con valores de la literatura para determinar factores de enriquecimiento [Hopke, 1985]. La masa de las muestras ambientales es procesada con APFS para obtener la participación de las fuentes en masa [Echalar *et al.*, 1990].

La utilización de SPSS y sus herramientas estadísticas en combinación con planilla Excel, permiten simplificar la metodología, método que se explica como anexo.

### 3.6.2 Resultados

Los análisis químicos presentan fuertes diferencias entre los resultados de los años 2004 y 2005 respecto al año 2007. Además, hay elementos que no fueron bien determinados en laboratorio, entre ellos Si y K importante por ser trazadores de polvo de suelo y quema de leña respectivamente.

Estos problemas en la determinación analítica limita los resultados obtenidos. Al comparar los aportes determinado para los factores principales se recomienda no incluir las campañas de 2004 y 2005.

La varianza explicada con 6 factores es cercana a 80%. Se intentó aumentar el número de factores, pero aumentaba la diferencia entre la concentración modelada y la obtenida durante la campaña. Por este motivo se mantuvo el número de factores.

Las tablas siguientes presentan las concentraciones aportadas por cada uno de los factores:

**Tabla 3-8 Porcentaje de aporte de factores principales para MP2.5 en Rancagua**

	AFS1	AFS2	AFS3	AFS4	AFS5	AFS6	Modelado	Medido	Diferen
	%	%	%	%	%	%	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	%
MP2.5	64.5	0.3		30.8	3.8	0.5	77.9	77.2	0.9
Zn	68.4	1.4	13.3	16.8			104.6	100.1	4.5
Cr	98.9	1.1					19.1	13.1	46.2
As	8.6	2.9	80.9	7.5			14.5	13.9	4.4
Cu			9.9	88.4		1.7	72.9	40.8	78.5
Ni	93.0		6.9		0.1		22.6	14.1	60.4

	AFS1	AFS2	AFS3	AFS4	AFS5	AFS6	Modelado	Medido	Diferen
	%	%	%	%	%	%	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	%
Pb	17.8		44.9	34.5		2.7	15.9	15.3	3.5
Al	33.0		14.8	50.8	0.2	1.2	876.0	536.3	63.3
Mn	42.7	5.7	16.4	2.4	5.2	27.6	48.8	52.3	6.7
V	48.3			51.7			4.6	3.2	43.9
Mo	81.6		14.5		3.9		4.9	3.3	48.2
Fe	81.4		10.3	8.3			311.8	293.6	6.2
Mg	77.0	5.3	17.7				31.0	21.1	47.3
K	73.7		3.8	21.0	1.5		918.3	872.4	5.3
Ca	8.4	3.1	27.2	61.3			330.2	179.3	84.1
Ti	41.3		31.9	26.8			23.1	21.0	9.7
Zr	61.5		11.5	20.4	4.9	1.8	35.9	21.5	67.2
Sn	47.7	2.5	9.8	32.8	7.1		14.0	14.9	5.5
S			5.2	94.8	0.0		1052.3	413.6	154.4

**Tabla 3-9 Porcentaje de aporte de factores principales para MP10 en Rancagua, mediciones con dicótomo**

	AFS1	AFS2	AFS3	AFS4	AFS5	AFS6	Modelado	Medido	Diferen
	%	%	%	%	%	%	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	%
MP10	0.4	12.4	67.4	13.7	5.0	1.2	117.4	127.9	8.2
Zn	1.0	34.7	41.8	10.6	11.9		169.7	169.8	0.0
Cr	0.4	65.1	28.2	5.9	0.3		23.0	24.4	5.8
As	3.1	14.4	25.4		57.1		17.6	17.4	1.0
Cu	0.3		32.0	18.8	48.9		156.4	116.4	34.3
Ni		32.7	61.1	6.2			26.2	22.6	16.0
Pb	1.3		56.8	5.1	30.5	6.5	20.5	20.9	1.7
Al	3.5		75.0	11.7	9.7		3418.4	2612.9	30.8
Mn		2.9	26.1	5.6	13.4	51.9	99.0	109.8	9.8
V	4.4		79.6	13.8	2.2		9.2	6.2	47.9
Ba	41.2		55.7		2.3	0.8	65.8	52.7	25.0
Mo		59.0	41.5				7.5	7.0	7.3
Fe	2.8	14.0	42.7	22.9	16.3	1.3	1726.0	1803.9	4.3
Mg	0.8	52.6	2.1	16.5	25.0	3.1	250.9	262.3	4.3
K	5.6	15.3	54.5	15.4	9.2		1470.9	1502.6	2.1
Ca		58.0			42.0		1054.3	995.4	5.9
Ti	21.0		52.3	13.3	12.2	1.2	212.7	211.4	0.6
Sr	17.3		44.3	7.8	30.6		7.9	7.1	11.8
Zr	0.7		99.3				83.6	36.4	129.7
S	2.7		85.0	2.3	9.9		1241.0	564.8	119.7

Para Azufre hay una sobredeterminación, lo cual está influenciado por las fuertes diferencias entre mayores concentraciones al comienzo de la campaña y valores muy bajos hacia el final.

**Tabla 3-10 Porcentaje de aporte de factores principales para MP10 en Rancagua, mediciones con muestreador de alto volumen**

	AFS1	AFS2	AFS3	AFS4	AFS5	AFS6	Modelado	Medido	Diferen
	%	%	%	%	%	%	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	%
MP10	23.8	28.7	42.6	4.2		0.6	145	144	0
Zn	19.1	6.6	41.2	33.1			102	101	1
Cr	20.6	4.0	67.4	0.8	0.0	7.2	10	10	0
As	46.7		39.5	5.2	7.1	1.4	38	30	27
Cu	26.3		67.4	5.8		0.5	151	128	18
Ni	4.4	8.9	61.5	23.5	1.6		16	17	2
Pb	17.5	1.1	-1.4	82.8			28	26	8
Al	19.7		46.3	0.2	33.0	0.8	4265	4037	6
Mn	40.2	9.6	42.9	3.8	3.5		85	84	1
V	26.2	25.9	31.5	4.9	8.1	3.4	15	16	0
Ba	5.4	5.7	85.8	1.1	1.7	0.3	300	306	2
Mo	5.7	0.9	87.7	2.7	1.4	1.6	57	58	1
Fe	42.0	4.0	44.8	4.4	4.8		2717	2708	0
Mg	18.3		29.5		50.3	1.9	1102	881	25
K		24.7	12.9			63.9	5580	4979	12
Ca	2.5		34.3		8.2	55.0	3382	2964	14
Ti	40.4	6.0	46.3	4.4	2.9		258	255	1
Sr	28.2	4.1	57.6	5.6	4.4		19	19	1
Zr	9.9	7.0	80.7	1.3	0.9	0.2	36	37	2
S	3.2	44.8	43.5	2.2	2.2	4.0	2618	2603	1
<b>Cationes</b>									
Na		35.8	41.3		22.0	1.0	545	547	0
NH4		77.9	13.9	2.9		5.3	1756	1623	8
K	4.2	41.3	51.3	3.2			642	617	4
Mg	14.9	28.2	47.2	3.5	6.2		105	106	1
Ca	21.4	16.4	59.5	2.0	0.8		997	991	1

### **3.7 Determinación de distribución relativa de las fuentes de MP10**

#### **3.7.1 Antecedentes**

Durante los años 1998 – 1999, mediante los estudios ejecutados con el financiamiento del Proyecto COSUDE se determinó que las principales fuentes de emisión MP10 provenían de:

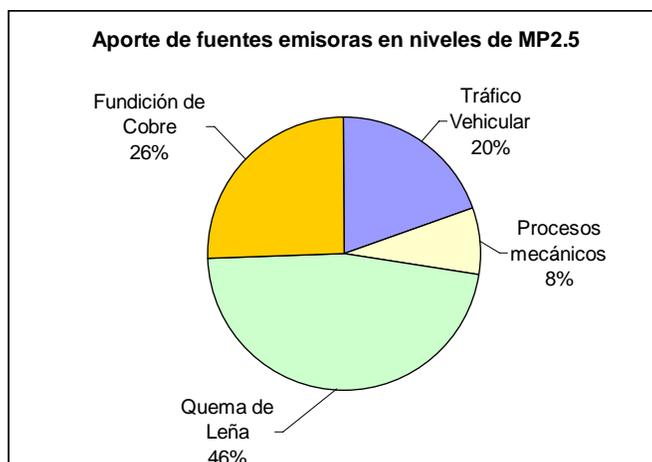
- Suelo o emisión de polvo natural
- Quema de leña, para calefacción doméstica y quemas agrícolas.
- Actividad industrial de tipo metalmecánica asociada a la Fundición Talleres,
- Fundición de Cobre, emitido por la chimenea de Caletones de la División El Teniente de CODELCO Chile
- Transporte vehicular, asociado a un transporte público mayor de mucha antigüedad, una sobreoferta del segmento taxis colectivos, entre otros factores.

Adicionalmente, el estudio realizado por Kavouras de la Universidad de Harvard con mediciones de MP10 y MP2.5 con muestreadores del tipo Impactadores Harvard realizadas cada 3 días durante el año 1998, aplicó análisis de componentes principales para estimar el aporte de las principales fuentes de MP10 en Rancagua.

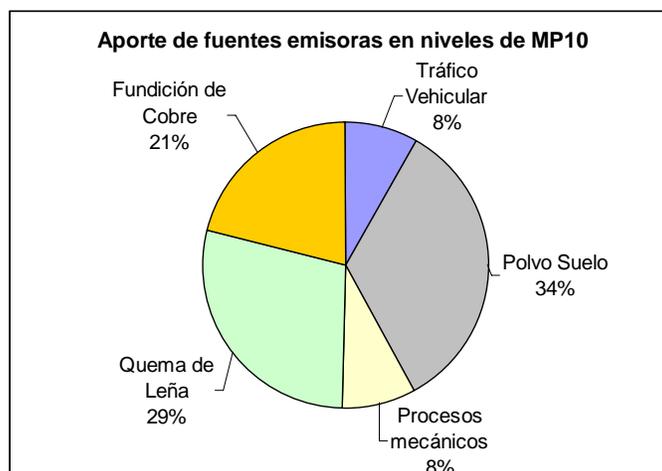
El estudio determinó valores para una base anual, es decir no distingue en el comportamiento estacional de las concentraciones de MP10 con valores mayores durante período de otoño-invierno, lo cual además puede significar una redistribución en el aporte de las fuentes emisoras sobre los niveles de MP10 con diferentes resultados para meses fríos respecto a meses cálidos.

De acuerdo al estudio, para MP2.5 la principal fuente es Quema de Leña con un 46%, seguida de Fundición de cobre con 26% y Tráfico vehicular con 20%. Sin embargo, el valor para Quema de Leña debería aumentar fuertemente para la temporada de invierno. En cambio, para MP10 la principal fuente durante un año promedio es Polvo de Suelo con un 34%, valor que podría aumentar en meses de primavera-verano, seguido de Quema de Leña con 29%.

Las figuras siguientes ilustran los aportes para las principales fuentes obtenidos en el estudio de con las mediciones de 1998:



**Figura 3-21 Aporte de fuentes emisoras en concentraciones MP2.5, promedio anual 1998**



**Figura 3-22 Aporte de fuentes emisoras en concentraciones MP10, promedio anual 1998**

### 3.7.2 Resultados campaña 2007

Las tablas siguientes resumen la asociación de los elementos trazadores con las fuentes emisoras para MP2.5 y MP10.

**Tabla 3-11 Aporte de fuentes emisoras para MP2.5**

Factor	Elementos trazadores	Aporte %	Fuente asociada
AFS1	Fe, Cr, Mo, K	64.5	Quema de leña y empresas metalmeccánicas
AFS2	Al, Zr, V, Ni	0.3	Refinería

Factor	Elementos trazadores	Aporte %	Fuente asociada
AFS3	As, Pb	0	Fundición de cobre y emisiones vehiculares
AFS4	Cu, S	30.8	Fundición de cobre
AFS5	Ca, Mg	3.8	Polvo de Suelo
AFS6	Zn	0.5	Fundición de cobre

**Tabla 3-12 Aporte de fuentes emisoras para MP10 (medición con dicótomo)**

Factor	Elementos trazadores	Aporte %	Fuente asociada
AFS1	Ba, Ti, Sr, K	0.4	Quema de leña
AFS2	Cr	12.4	Empresas metalmeccánicas
AFS3	Zr, Al	67.4	Empresas metalmeccánicas y Polvo de suelo
AFS4	Fe	13.7	Polvo de suelo
AFS5	As, Cu	5.0	Fundición de cobre
AFS6	Zn	1.2	Fundición de cobre

**Tabla 3-13 Aporte de fuentes emisoras para MP10 (medición con alto volumen)**

Factor	Elementos trazadores	Aporte %	Fuente asociada
AFS1	Fe, Ti, Mn, Sr	23.8	Polvo de Suelo
AFS2	NH <sub>4</sub> , S	28.7	Aerosol secundario, efecto de Centrales térmicas a Petróleo, emisiones vehiculares
AFS3	Ba, Mo, Zr	42.6	Empresas metalmeccánicas
AFS4	Pb, Zn, Ni	4.2	Hornos de fundición y refinación
AFS5	Mg, Al	0	Polvo de suelo
AFS6	K, Ca	0.6	Polvo de calles pavimentadas

En algunos casos hay factores que presentan un aporte 0 en MP2.5 o MP10. Sin embargo, dado que se realiza un ajuste de regresión lineal en base a los elementos químicos, se requiere su participación para determinar la concentración de los elementos químicos.

Por problemas en la determinación analítica de las concentraciones elementales, no es posible obtener con claridad factores que se asocien a fuentes independientes, sino que aparecen en la mayoría de los casos agrupamiento de trazadores de una o más fuentes. Por ejemplo, la deficiente determinación de K es la responsable de la baja participación de Quema de Leña, lo cual significa que hay otras fuentes que pueden estar sobre explicadas.

Para MP2.5 (ver Tabla 3-11) el principal aporte de 64.5% corresponde a la suma de los aportes de Quema de Leña y empresas metalmeccánicas, en segundo lugar hay un aporte de

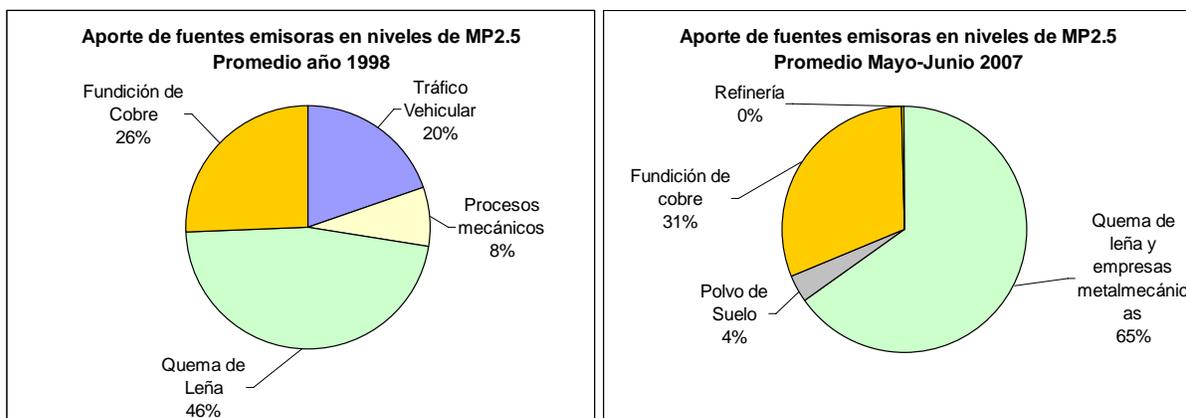
30.8% asociado a Fundición de cobre. Las concentraciones elementales disponibles no permiten una mejor determinación de las fuentes, a fuentes unitarias.

Para MP10 se presentan resultados para cada uno de las metodologías de medición, dicótomo y alto volumen. Considerando que hay mayor cantidad de masa en los filtros obtenidos con alto volumen, lo cual significa una mejor determinación analítica de las concentraciones elementales, se recomienda considerar los aportes presentados en la Tabla 3-13, la cual difiere de los resultados con dicótomo (Tabla 3-12). Por lo tanto, para MP10 el principal aporte está asociado a empresas metalmecánicas con 42.6% seguido de aerosol secundario (Amonio) con 28.7% asociado a las emisiones de centrales térmicas y emisiones vehiculares.

En el Factor AFS4 para MP10 (Tabla 3-13) los elementos trazadores son Pb, Zn y Ni. Además Pb tiene una buena correlación con Cd, luego considerando que gran parte de los vehículos usan gasolina sin plomo se recomienda considerar a Pb como trazador de hornos de fundición y a Zn-Ni como trazadores de procesos de refinación de metales.

### 3.7.3 Comparación entre resultados de Kavouras 2001 y CENMA 2007

La figura siguiente ilustra la comparación entre resultados obtenidos por el estudio de Kavouras del año 2001 (con datos de 1998) y el estudio de CENMA con datos de Mayo-Junio de 2007

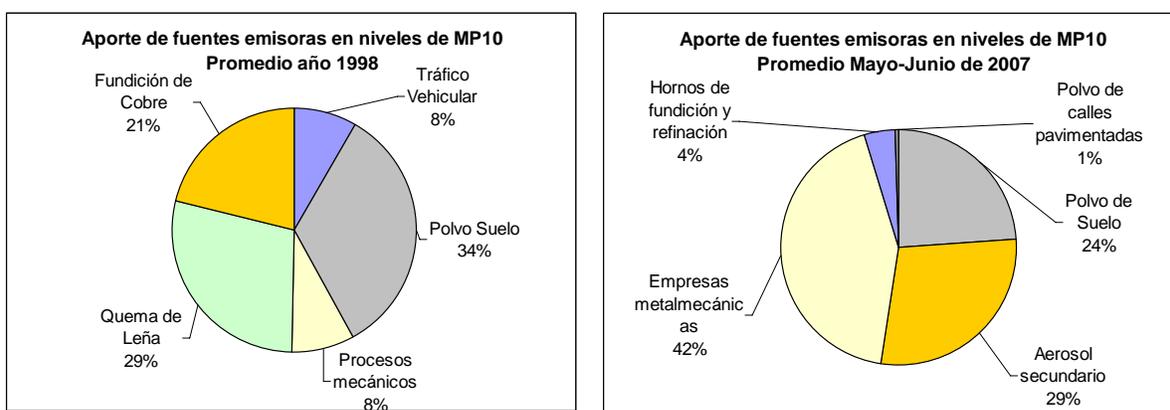


**Figura 3-23 Comparación de aporte en concentraciones de fuentes de MP2.5 obtenidos por Kavouras 2001 y CENMA 2007**

Para MP2.5, considerando que el consumo de leña aumenta fuertemente durante el período de otoño-invierno, principalmente para calefacción domiciliar se esperaba un mayor aporte de este sector para los resultados de la campaña de 2007. Al comparar la suma de Quema de Leña y empresas metalmecánicas para el año 1998 se estimó un aporte de 54%,

en cambio para el período Mayo-Junio de 2007 se obtiene un aporte de 65% coincidente con la premisa del aumento del aporte, pero las limitaciones de la aplicación del modelo impiden conocer el aporte específico de la leña. Los resultados del año 2007 no consideran un aporte de tráfico vehicular, el cual estuvo asociado a los trazadores Pb y Br durante el año 1998, en cambio para el año 2007 Pb ya no está presente en las gasolinas y el elemento Br no fue posible determinarlo con la técnica ICP-OES.

La figura siguiente ilustra la comparación entre resultados obtenidos por el estudio de Kavouras del año 2001 (con datos de 1998) y el estudio de CENMA con datos de Mayo-Junio de 2007



**Figura 3-24 Comparación de aporte en concentraciones de fuentes de MP210 obtenidos por Kavouras 2001 y CENMA 2007**

El estudio de Kavouras identifica a Polvo de Suelo como principal fuente con un 34% de aporte, en el estudio de CENMA el aporte de Polvo de Suelo es 24%, valor coherente con el anterior ya que para el 2007 se considera un período (mayo-junio) en el cual hay mayor humedad que disminuye la resuspensión del polvo de suelo. El estudio de Kavouras asigna a Fundición de cobre y emisiones vehiculares una participación de 21% y 8% respectivamente (29% la suma de ambos), en el 2007 se estima un aporte de Aerosol secundario de 29% asociado a los trazadores NH4 y S cuyos precursores son Fundiciones y Emisiones vehiculares. El estudio de 2007 asigna la principal responsabilidad a empresas metalmecánicas con 42% (Kavouras asigna un 8%), valor que puede estar sobre explicado al no incluir el aporte de Quema de Leña (Kavouras asigna un 29%) principalmente por la determinación deficiente del elemento K considerado trazador de Leña.

En resumen, considerando que hay resultados analíticos deficientes para algunos elementos, incluso para algunos trazadores, surgen dudas en el real aporte de las fuentes determinadas en el estudio. Por este motivo, se recomienda considerar los resultados con cautela a la espera de los resultados del estudio en paralelo “Estudio Diagnóstico Plan de Gestión del Aire VI Región”.

### 3.8 Propuesta metodológica para futuras aplicaciones de modelo receptor

Rancagua, al igual que Santiago, presenta episodios críticos por altas concentraciones diarias de Material Particulado en meses de otoño-invierno. Además, la concentración anual de MP10 supera ampliamente la norma anual establecida en  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para promedios trianuales. Durante meses de primavera-verano las concentraciones diarias son menores al valor fijado en la norma diaria de MP10. Sin embargo, los promedios mensuales superan el valor fijado en el promedio anual.

Por otro lado, no existe una relación lineal entre el aporte de las fuentes emisoras de MP10 y las concentraciones ambientales producto de los distintos fenómenos que afectan a las partículas en la atmósfera entre ellos decantación de las partículas más gruesas, suspensión de las partículas finas, transporte, aglomeración, formación de aerosol secundario. Por este motivo, para una campaña de estudio acerca de la responsabilidad de las fuentes a partir del análisis de filtros ambientales de MP10 sea representativa y consistente debe considerar mediciones en distintos períodos del año, al menos en meses de altas concentraciones y en períodos de bajas.

Luego, la toma de medidas para disminuir las concentraciones anuales requiere conocer el aporte porcentual de las principales fuentes emisoras no solo durante meses de altas concentraciones diarias, sino que también en meses de primavera-verano. Para dar respuesta a esta situación se requiere planificar la ejecución de una pronta campaña destinada a principalmente a incorporar meses de primavera-verano y la determinación de otros indicadores para mejorar la interpretación del comportamiento MP10, entre ellos medición continua de carbono orgánico/elemental.

Para futuras campañas es necesario incluir la determinación de Carbono orgánico, carbono elemental, Amonio y Sulfato para completar la caracterización fisico-química, lo cual permitirá una mayor certeza en la determinación del aporte de emisiones de las principales fuentes emisoras de MP10.

Se recomienda mantener la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) como modelo receptor. La falta de perfiles de fuentes específicas para la región y su alto costo no permite caracterizar adecuadamente el perfil químico de Polvo de calles pavimentadas, polvo de calles de tierra, emisiones de vehículos, empresas metalmecánicas, fundición de cobre de caletones, quema de vegetación, etc.

La aplicación ACP requiere contar con al menos 50 muestras para una determinación más confiable. Se recomienda analizar las muestras con técnicas de Fluorescencia de rayos X (XRF) o PIXE, lamentablemente no hay laboratorios nacionales con estas técnicas implementadas, lo cual requiere el servicio de laboratorios extranjeros acreditados. La alternativa más confiable, por la gran cantidad de estudios realizados y por la experiencia

de sus profesionales es el Desert Research Intitute (DRI) en reno, Nevada. El costo de un análisis multi-elemental es cercano a US\$ 100 por cada muestra.

A nivel nacional, el uso de la técnica ICP-MS podría dar mejores resultados que ICP-OES principalmente por su mayor sensibilidad en consideración a los elementos trazadores. Pero el pre-tratamiento y dilución de las muestras produce pérdida de material soluble, interacciones entre elementos, contaminación cruzada y posibles errores sistemáticos por manipulación de factores de conversión de unidades y dilución. Por lo tanto, la mejor alternativa es usar técnicas no destructivas (PIXE o XRF).

### **3.9 Seminarios de difusión y capacitación**

Se considera realizar durante las primeras semanas de noviembre una jornada de capacitación a profesionales de CONAMA VI Región y de la autoridad sanitaria sobre la aplicación de modelo receptor. Las fechas serán acordadas con la contraparte técnica

Se realizará un seminario, Taller de divulgación y capacitación de actores locales tales como CONAMA, SEREMI DE SALUD, SEREMI DE TRANSPORTE, MUNICIPALIDAD DE RANCAGUA, entre otros. Durante este seminario se presentarán los resultados obtenidos durante el Estudio. Se recomienda realizar este seminario en la misma fecha en que DICTUC presente los resultados del “Estudio Diagnóstico Plan de Gestión del Aire VI Región”.

#### 4 COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

Las concentraciones de MP10 tienen un fuerte comportamiento estacional con un notorio aumento de los niveles en los meses de otoño-invierno, durante los cuales algunos días alcanzan concentraciones en el rango de alerta y pre-emergencia. En los años 2004, 2005 y 2006 se registraron 11, 5 y 8 días respectivamente sobre el valor fijado en la norma diaria ( $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Durante el año 2007 entre Abril y Junio se han registrado 23 días sobre  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Mayo de 2007 presenta una concentración promedio mensual de  $159.8\mu\text{g}/\text{m}^3$  lo cual corresponde al mayor promedio mensual medido con el monitor continuo Beta en la estación Rancagua desde Abril de 2004.

Las estaciones de Codegua, San Francisco de Mostazal y Sewell están en niveles de latencia y la estación de Rancagua en nivel de saturación por concentraciones diarias.

La norma anual de MP10 es excedida en Rancagua y en las estaciones de Codegua, San Francisco de Mostazal y Sewell. Las estaciones Casas de Peuco y Coya Población presentan concentraciones en nivel de latencia. Esta situación sumada a los altos niveles registrados durante la marcha blanca de las estaciones instaladas en Rengo y San Fernando dan cuenta de un problema generalizado en la Región.

La campaña de muestreo de fracciones Fina y Gruesa de MP10 con equipo dicótomo y muestreador de alto volumen fue iniciada el 4 de mayo finalizando el 10 de Junio, realizando un total de 36 días de muestreo.

En general, la fracción fina del MP10 (menor a  $2.5\mu\text{m}$ ) es mayoritaria en el material particulado respirable de Rancagua durante el período de Otoño-Invierno con un porcentaje similar en las 3 campañas, cercano a 61%. Este porcentaje aumenta para aquellos días con mayores concentraciones de MP10. La campaña de 2007 se realizó en meses de mayores concentraciones, lo cual explica los mayores niveles respecto a las campañas anteriores.

Al correlacionar las concentraciones obtenidas con dicótomo y alto volumen versus el monitor continuo de atenuación Beta se obtienen buenos coeficientes de correlación  $R^2$  de 0.73 y 0.8 respectivamente. Por otro lado, las concentraciones medidas con Beta son aproximadamente un 2% más altas que las medidas con alto volumen y un 15% más altas que con dicótomo. Las menores concentraciones obtenidas con equipo dicótomo se atribuyen a saturación de los filtros especialmente durante los días de mayor concentración.

La buena correlación ( $R^2=0.8$ ) y el valor de 1.02 de la pendiente (2% de diferencia) al comparar Alto Volumen y monitor Beta confirma el buen funcionamiento de esta metodología para determinar concentraciones diarias de MP10.

Desafortunadamente, la técnica ICP-OES presentó problemas para determinar B y Si entregando valores que no corresponden a la realidad, por lo cual no son considerados en el análisis de componentes principales. Las concentraciones de Al, K y S presentan fuertes

diferencias durante la campaña, lo cual se puede atribuir a la cantidad mínima de masa que requiere la técnica para cuantificar las concentraciones e interacción entre los componentes.

Además, existen diferencias entre concentraciones de metales obtenidas para las campañas de los años 2004-2005 y la campaña de 2007. En parte estas diferencias pueden ser atribuidas al tiempo que han permanecido las muestras almacenadas, lo cual puede producir interacción entre los componentes de las muestras, degradación de las mismas y contaminación cruzada.

Los resultados del estudio de Kavouras publicado el año 2001, pero con información del año 1998, determinó que para MP2.5 la principal fuente es Leña con un 46%. Para MP10 la principal fuente durante un año promedio (1998) es Polvo de Suelo con un 34%.

La ausencia de concentraciones de Si y la variabilidad de elementos considerados como trazadores (K, Al y S) dificultan la extracción de factores principales y la posterior asignación de fuentes emisoras de MP responsables.

La superación de la norma anual y promedios mensuales sobre el valor de la norma anual durante la mayoría de los meses, recomienda aplicar modelo receptor para meses de primavera-verano. Los resultados obtenidos para la campaña de otoño-invierno podrían ser diferentes para meses más cálidos en los cuales un aumento de la velocidad del viento puede significar un transporte a mayor distancia y un aumento de la fracción gruesa (asociada a fuentes naturales de MP10).

Para futuras campañas es necesario incluir la determinación de Carbono orgánico, carbono elemental, Amonio y Sulfato para completar la caracterización fisico-química, lo cual permitirá una mayor certeza en la determinación del aporte de emisiones de las principales fuentes emisoras de MP10. Además, los análisis químicos con la técnica ICP-MS podrían dar mejores resultados que ICP-OES principalmente por su mayor sensibilidad en consideración a los elementos trazadores. Pero el pre-tratamiento y dilución de las muestras produce pérdida de material soluble, interacciones entre elementos, contaminación cruzada y posibles errores sistemáticos por manipulación de factores de conversión de unidades y dilución. Por lo tanto, la mejor alternativa es usar técnicas no destructivas (PIXE o XRF).

Por problemas en la determinación analítica de las concentraciones elementales, no es posible obtener con claridad factores que se asocien a fuentes independientes, sino que aparecen en la mayoría de los casos agrupamiento de trazadores de una o más fuentes. Por ejemplo, la deficiente determinación de K es la responsable de la baja participación de Quema de Leña, lo cual significa que hay otras fuentes que pueden estar sobre explicadas.

Para MP2.5 el principal aporte de 64.5% corresponde a la suma de los aportes de Quema de Leña y empresas metalmecánicas, en segundo lugar hay un aporte de 30.8% asociado a Fundición de cobre. En función de los análisis químicos realizados no hay trazadores para

las fuentes móviles (Br, VOC, EC), por lo cual no fue posible asignar responsabilidad a fuentes móviles, especialmente para la fracción fina (MP2.5). Las concentraciones elementales disponibles no permiten una mejor determinación de las fuentes, a fuentes unitarias.

Para MP10, se presentan resultados para cada uno de las metodologías de medición, dicótomo y alto volumen. Considerando que hay mayor cantidad de masa en los filtros obtenidos con alto volumen, lo cual significa una mejor determinación analítica de las concentraciones elementales, se recomienda considerar los aportes presentados en la Tabla 3-13, la cual difiere de los resultados con dicótomo (Tabla 3-12). Por lo tanto, para MP10 el principal aporte está asociado a empresas metalmecánicas con 42.6% seguido de aerosol secundario (Amonio y Azufre) con 28.7% asociado a las emisiones vehiculares y emisiones de centrales térmicas.

El inventario de emisiones calcula el aporte de fuentes móviles de MP principalmente por desgaste de frenos, neumáticos y como resuspensión de polvo. Sin embargo, considerando que no necesariamente hay linealidad entre lo emitido y lo obtenido en concentraciones ambientales, incluso hay aporte de MP secundario asociado a fuentes móviles producto de la transformación de NOx a Amonio es improbable obtener una participación relativa confiable de las fuentes considerando los resultados de la aplicación del modelo receptor

Las limitaciones presupuestarias no permitieron el envío de muestras a laboratorios con mayor experiencia en la determinación de concentraciones elementales para aplicar modelo receptor, en el futuro se recomienda al menos el envío de contramuestras para asegurar la calidad y confiabilidad de los resultados. Tampoco permitió la determinación Carbono orgánico y elemental.

Considerando que hay resultados analíticos deficientes para algunos elementos, incluso para algunos trazadores, surgen dudas en el real aporte de las fuentes determinadas en el estudio. Por este motivo, se recomienda considerar los resultados con cautela a la espera de los resultados del estudio en paralelo “Estudio Diagnóstico Plan de Gestión del Aire VI Región”.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARTAXO, P. 1996. Final Report Aerosol Characterization Study in Santiago de Chile Wintertime 1996. Estudio para CONAMA RM. 48p.
- ARTAXO, P. 1998. Final Report Aerosol Characterization Study in Santiago de Chile Wintertime 1998. Estudio para CONAMA RM. 61p.
- ARTAXO, P. 1999. Final Report Aerosol Characterization Study in Santiago de Chile -1999. Santiago, CONAMA RM. 69p.
- ARTAXO, P., F. GERAB, M.A. YAMASOE, Long term atmospheric aerosol characterization in the Amazon basin. in: *Environmental Geochemistry in the Tropics*, ed. J. Wasserman, E. V. Silva Filho, R.Villas Boas, Springer Verlag. Pg. 227-250. 1997a.
- ARTAXO, P., FERNANDES, E. T., J. V. MARTINS, M. A. YAMASOE, K. M. LONGO, F. ECHALAR, F. GERAB, A. CASTANHO, W. MAENHAUT, Large scale biomass burning and biogenic aerosol characterization in the Amazon basin. Proceedings of the International symposium of atmospheric chemistry and future global environment, Nagoya, Japan, 11-13 Nov. 1997, Pg. 162-164, 1997b.
- ECHALAR, F., P. ARTAXO, G. D. THURSTON, "Source apportionment of aerosols in the industrial area of Cubatão, Brazil". in: "Aerosols: Science, Industry, Health and Environment", ed. S.Masuda e K. Takahashi, pg. 942-945, Elsevier, London, 1990.
- HOPKE, P. K., *Receptor Modeling in Environmental Chemistry*, John Wiley, New York, 1985.
- HOPKE, P. K., A Guide to Positive Matrix Factorization. Disponible en: [http://www.epa.gov/air/aqportal/management/links/modeling\\_resources\\_pub.htm](http://www.epa.gov/air/aqportal/management/links/modeling_resources_pub.htm)
- KAVOURAS. I, KOUTRAKIS. P. 2001. "Source Apportionment of PM10 and PM2.5 in Five Chilean Cities" Journal of the Air & Waste Management Association, Volume 51: 451-464
- SWITLICKI, E., S. PURI, H. C. HANSSON, Urban air pollution source apportionment using a combination of aerosol and gas monitoring techniques, Atmospheric Environment, Vol. 30, No. 15, pp. 2795-2809, 1996.

## 6 ANEXOS

**Tabla 6-1 Concentraciones elementales campaña 09 de julio a 09 de septiembre de 2004, mediciones con dicótomo (Concentraciones en ng/m<sup>3</sup>)**

Elemento	Fracción Fina					Fracción Gruesa				
	N	min	max	prom	desvestd	N	min	max	prom	desvestd
Cd	9	0.3	6.9	1.9	2.2	14	0.3	0.5	0.3	0.1
Zn	15	0.6	135.2	37.1	31.9	16	0.6	1474.2	174.7	458.9
Cr	2	1.0	5.6	1.4	1.2	7	0.9	62.6	9.8	20.5
As	7	2.8	55.6	13.2	15.1	1	2.6	44.9	8.5	13.9
Cu	15	0.6	13830.7	1688.6	3647.0	16	0.6	9348.0	2030.3	3338.2
Ni	15	1.2	106.9	34.1	30.0	16	1.1	206.2	45.7	64.7
Pb	15	3.7	76.3	30.2	23.6	14	3.3	97.4	33.9	33.2
Al	13	2.9	29831.6	9016.1	9308.3	15	3.5	25689.5	7122.7	7895.0
Se	4	2.2	7.7	3.4	2.0	1	2.0	22.7	5.9	8.0
Mn	15	0.2	432.2	210.9	84.5	16	12.1	390.0	176.0	138.9
Ag	7	0.4	61.3	8.5	17.4	7	0.4	0.7	0.5	0.1
V	0	<LD				9	0.2	0.4	0.2	0.1
Ba	15	1.1	126.6	30.3	36.9	15	1.1	69.8	19.1	24.1
Co	15	0.4	24.5	13.9	6.7	15	0.4	19.2	6.7	6.8
Mo	11	1.1	21.8	6.5	6.4	12	1.2	64.5	6.4	20.2
Be	0	<LD				0	<LD			
Fe	15	1.1	1013.7	334.7	235.6	15	1.0	1770.9	254.8	578.0
Mg	16	30.1	262.5	113.9	58.3	16	0.0	901.6	153.2	276.9
K	16	268.0	10199.4	2876.6	3143.7	15	10.3	583.7	189.6	186.4
Ca	16	148.9	1493.1	622.3	324.7	16	0.0	629.3	156.4	209.2
Ti	16	11.3	278.1	102.4	81.7	15	0.2	241.1	63.7	77.6
Rb	16	11.2	34.4	19.3	6.8	15	12.2	22.4	14.0	3.5
Sr	10	2.3	22.6	11.1	5.4	15	0.0	14.5	5.9	5.5
Zr	16	0.8	727.7	232.0	227.4	15	0.4	843.0	204.1	264.8
Sn	16	11.2	77.5	21.0	16.4	15	12.3	40.5	17.3	9.1
Sb	6	324.0	783.5	444.4	107.3	2	112.4	597.2	305.0	160.1
S	16	246.6	1841.3	809.4	480.6	15	212.2	930.6	555.4	210.1

N indica el número de muestras con concentraciones elementales superior al límite de detección (LD). Para calcular promedios se consideró el límite de detección como valor en aquellos casos con concentraciones menores a LD.

**Tabla 6-2 Concentraciones elementales campaña 31 de julio a 22 de agosto de 2005  
mediciones con dicótomo (Concentraciones en ng/m<sup>3</sup>)**

Elemento	Fracción Fina					Fracción Gruesa				
	N	min	max	prom	desvestd	N	min	max	prom	desvestd
Cd	0	0.3	0.5	0.3	0.1	2	0.2	2.5	0.5	0.8
Zn	14	0.6	1474.2	174.7	458.9	15	2.5	163.1	38.7	47.5
Cr	4	0.9	62.6	9.8	20.5	5	0.7	28.8	5.4	9.4
As	4	2.6	44.9	8.5	13.9	0	2.1	4.1	2.5	0.6
Cu	8	0.6	9348.0	2030.3	3338.2	8	0.5	6084.5	1154.9	2138.3
Ni	10	1.1	206.2	45.7	64.7	7	0.9	91.4	25.0	32.9
Pb	10	3.3	97.4	33.9	33.2	9	2.8	49.9	15.6	16.9
Al	14	3.5	25689.5	7122.7	7895.0	15	751.6	13531.9	5509.7	4576.2
Se	3	2.0	22.7	5.9	8.0	3	1.7	15.7	4.4	5.4
Mn	15	12.1	390.0	176.0	138.9	15	13.0	190.9	93.9	81.5
Ag	0	0.4	0.7	0.5	0.1	0	0.3	0.6	0.4	0.1
V	0	0.2	0.4	0.2	0.1	1	0.2	5.0	0.5	1.6
Ba	12	1.1	69.8	19.1	24.1	10	0.9	81.8	15.9	26.0
Co	9	0.4	19.2	6.7	6.8	7	0.3	13.2	3.3	4.2
Mo	4	1.2	64.5	6.4	20.2	2	1.0	3.8	1.5	1.0
Be	0	0.0	0.1	0.0	0.0	0	0.0	0.1	0.0	0.0
Fe	9	1.0	1770.9	254.8	578.0	7	0.9	2197.5	452.6	730.8
Mg	15	0.0	901.6	153.2	276.9	14	22.8	361.4	160.6	118.8
K	11	10.3	583.7	189.6	186.4	15	21.4	643.1	158.7	198.9
Ca	15	0.0	629.3	156.4	209.2	15	0.0	1224.6	277.1	420.3
Ti	9	0.2	241.1	63.7	77.6	7	4.9	307.2	84.6	98.1
Rb	13	12.2	22.4	14.0	3.5	15	10.1	149.0	20.8	44.4
Sr	0	0.0	14.5	5.9	5.5	2	0.0	43.4	7.9	13.5
Zr	10	0.4	843.0	204.1	264.8	8	4.6	348.9	117.9	128.5
Sn	14	12.3	40.5	17.3	9.1	15	10.1	65.8	22.0	22.5
Sb	3	112.4	597.2	305.0	160.1	3	92.5	320.7	199.7	91.2
S	15	212.2	930.6	555.4	210.1	15	16.9	461.3	202.6	134.0

N indica el número de muestras con concentraciones elementales superior al límite de detección (LD). Para calcular promedios se consideró el límite de detección como valor en aquellos casos con concentraciones menores a LD.

**Tabla 6-3 Concentraciones elementales campaña 4 de mayo a 10 de junio de 2007  
mediciones con dicótomo (Concentraciones en ng/m<sup>3</sup>)**

Elemento	Fracción Fina					Fracción Gruesa				
	N	min	max	prom	desvestd	N	min	max	prom	desvestd
Cd	3	0.2	3.0	0.4	0.5	6	0.2	1.6	0.4	0.4
Zn	34	0.6	159.2	100.1	43.9	33	0.5	128.7	69.7	41.0
Cr	32	0.9	40.7	13.1	10.0	31	0.8	28.8	11.3	7.5
As	26	2.6	59.0	13.9	13.2	5	1.5	13.9	3.5	3.1
Cu	34	0.6	322.5	40.8	57.3	32	0.5	618.7	75.6	112.4
Ni	32	1.1	75.0	14.1	15.8	32	1.0	19.6	8.5	4.9
Pb	34	3.4	55.7	15.3	9.5	21	1.9	19.8	5.5	4.1
Al	32	3.3	9267.1	536.3	1557.5	33	2.9	6315.4	2076.6	1545.3
Se	14	2.0	13.9	4.2	3.3	3	1.1	4.3	2.0	0.5
Mn	34	0.2	344.3	52.3	92.9	33	0.1	270.0	57.4	62.5
Ag	0	<LD				0	<LD			
V	17	0.2	17.1	3.2	3.9	16	0.1	18.7	3.0	4.4
Ba	15	0.8	18.2	2.9	3.9	33	1.0	1220.8	49.7	201.0
Co	6	0.3	26.7	3.6	7.4	5	0.3	18.9	2.1	4.8
Mo	17	1.0	8.1	3.3	2.4	15	0.7	34.5	3.6	5.9
Be	8	0.0	0.6	0.1	0.1	8	0.0	0.7	0.1	0.2
Fe	34	1.0	703.1	293.6	154.1	33	0.9	4345.1	1510.3	946.8
Mg	25	0.0	90.6	21.1	22.3	31	0.0	627.1	241.2	162.0
K	34	8.4	1902.5	872.4	416.8	33	7.5	3370.1	630.2	598.7
Ca	12	0.0	2314.0	179.3	532.6	27	0.0	2855.5	816.1	734.8
Ti	32	0.2	58.4	21.0	13.8	33	0.2	2074.9	190.4	336.1
Rb	0	9.6	19.7	13.3	1.5	1	6.9	15.8	11.4	1.3
Sr	5	0.0	11.3	0.8	2.4	27	0.0	65.1	6.3	11.0
Zr	30	0.3	430.5	21.5	71.6	33	0.3	87.5	14.9	20.8
Sn	14	9.6	35.2	14.9	4.2	1	6.9	36.2	12.1	4.3
Sb	6	3.2	666.9	84.3	184.6	4	3.2	481.8	43.6	118.8
S	11	9.6	1973.2	413.6	663.4	10	6.9	807.4	151.2	252.9

N indica el número de muestras con concentraciones elementales superior al límite de detección (LD). Para calcular promedios se consideró el límite de detección como valor en aquellos casos con concentraciones menores a LD.

**Tabla 6-4 Concentraciones elementales campaña 4 de mayo a 10 de junio de 2007  
mediciones con High-Volume (Concentraciones en ng/m<sup>3</sup>)**

Elemento	MP10				
	N	min	max	prom	desvestd
Cd	36	0.4	6.3	2.2	1.6
Zn	36	38.6	337.0	101.1	48.8
Cr	36	1.3	18.3	10.3	3.7
As	33	1.9	96.8	29.8	22.4
Cu	36	38.7	337.5	128.3	61.7
Ni	36	8.9	36.5	16.7	5.9
Pb	35	4.1	195.0	26.2	31.3
Al	36	417.5	9677.7	4036.9	2618.8
Se	1	1.3	4.9	1.6	0.6
Mn	36	7.5	221.6	83.6	37.2
Ag	0	0.3	0.3	0.3	0.0
V	34	0.1	32.4	15.5	6.5
Ba	36	246.2	367.6	306.3	29.2
Co	14	0.3	3.5	0.7	0.7
Mo	36	39.4	78.4	57.8	8.1
Be	0	<LD			
Fe	36	211.4	6908.2	2707.9	1145.6
Mg	36	66.8	2753.9	881.3	978.5
K	36	1808.3	26076.5	4979.5	4854.6
Ca	36	138.9	17451.1	2963.6	2638.4
Ti	36	19.9	632.8	254.5	104.2
Rb	0	<LD			
Sr	36	4.8	35.3	18.8	5.7
Zr	36	25.9	47.9	36.8	4.5
Sn	4	8.0	107.3	13.2	17.1
Sb	0	<LD			
S	36	428.6	6308.0	2603.5	1232.3
Iones y Cationes					
Li	0	<LD			
Na	36	219.4	2102.4	546.9	322.8
NH4	36	171.4	5702.0	1622.8	1219.7
K	36	211.6	1894.7	617.0	318.8
Mg	36	46.1	165.4	105.7	29.2
Ca	36	520.8	1683.1	991.3	243.7

N indica el número de muestras con concentraciones elementales superior al límite de detección (LD). Para calcular promedios se consideró el límite de detección como valor en aquellos casos con concentraciones menores a LD.