

UCI+ - FC  
Q ambient.  
N 456  
C. 2



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“CARACTERIZACIÓN DE AEROSOLES ORGÁNICOS SECUNDARIOS (AOS) EN  
LA CIUDAD DE SANTIAGO”**

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

**Químico Ambiental**

**Paula de Jesús Reyes Villegas**

Director de Seminario de Título: Dr. Pedro Oyola Tapia  
Profesor Patrocinante: Prof. María Inés Toral

Julio de 2010  
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 el o (la) candidato (a):

**PAULA DE JESÚS REYES VILLEGAS**

“CARACTERIZACIÓN DE AEROSOLES ORGÁNICOS SECUNDARIOS (AOS) EN LA CIUDAD DE SANTIAGO”

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

### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

*Dr. Pedro Oyola Tapia*  
**Director Seminario de Título**

*Prof. Maria Inés Toral*  
**Profesor Patrocinante**

*Dr. Manuel Leiva*  
**Corrector**

*Dr. Rodrigo Seguel*  
**Corrector**

Santiago de Chile, julio de 2010

## Reseña



Nací el 26 de marzo de 1984. Crecí bajo los incasables regaloneos de mi mamá y mi tía Nancy y rodeada de mucho cariño por parte de mi familia en general. Fui una niña muy tranquila, pero inquieta intelectualmente siempre pensando en qué quería ser “cuando grande”. Sin embargo, no fue hasta la enseñanza media que comencé a definir de forma definitiva mi futuro.

Nunca pensé que terminaría estudiando esta carrera, porque no la conocía, pero en el año 2003 con mi puntaje de PAA en la mano di una vuelta por la Feria de Carreras de la Casa Central de la Universidad de Chile y me explicaron en qué consistía. Me gustó como estaba planteada y fue mi primera opción.

Hoy puedo decir que hubo altos y bajos en los años de estudio, pero disfruté de todo y me superé con esfuerzo y lo más importante es que nunca me he arrepentido de la decisión que tomé.

*Paula de Jesús*

*Dedicado a mi madre, Nilsa  
y a mi segunda madre, Nancy*

## Agradecimientos

Agradezco a Dios por ayudarme a llegar a este punto de mi vida.

A mi madre y a mi tía Nancy porque con su amor y apoyo incondicional han forjado en mí las ganas de superarme. Todo lo que he logrado es gracias a ellas.

A Pedro Oyola, Jorge Cáceres y Gianni López, directores del Centro Mario Molina Chile, por permitirme desarrollar este Seminario de Título y por darme la oportunidad de comenzar con mi desempeño profesional.

A la profesora María Inés Toral por su apoyo y la buena disposición que ha tenido siempre conmigo.

A mis abuelos, a mis tíos y tías y a mis queridísimos primos.

Y a mis amigos y compañeros que han vivido conmigo esta linda etapa.

Gracias a todos por acompañarme en este camino, por ser parte de mi vida y por dejarme ser parte de la suya.

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>I</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	Marco teórico .....	3
1.2	Hipótesis .....	10
1.3	Objetivo general .....	10
1.4	Objetivo específico .....	11
<b>II</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>12</b>
2.1	Metodología .....	12
2.2	Análisis .....	17
<b>III</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>22</b>
<b>IV</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>27</b>
<b>V</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>29</b>
<b>VI</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>30</b>
<b>VII</b>	<b>ANEXO</b> .....	<b>33</b>
7.1	Descripción de campañas .....	33
7.1.1	Campaña de Invierno .....	33
7.1.2	Campaña de Primavera .....	33
7.2	Cálculo de resultados .....	37

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Identificación de compuestos orgánicos como trazadores (Kleindienst y col. 2007).....	20
Tabla 2: Coeficiente f para cada precursor (Kleindienst y col. 2007).....	21
Tabla 3: Detalle de mediciones tomadas en campaña invierno .....	34
Tabla 4: Detalle de mediciones tomadas en campaña primavera.....	35
Tabla 5: Detalle de mediciones tomadas en campaña primavera.....	36
Tabla 6: Resultados de análisis por GCMS.....	37
Tabla 7: Concentraciones de trazadores y precursores .....	38
Tabla 8: Concentraciones de compuestos adicionales al estudio .....	39

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ruta de oxidación de aromáticos (Forstner y col. 1997).....	5
Figura 2: Ruta de oxidación de terpenos (Kanakidou y col. 1995).....	6
Figura 3: Aporte de los AOS formados a partir de precursores antropogénicos y biogénicos a la concentración de Carbono Orgánico (Kleindienst y col. 2007).....	7
Figura 4: Variación temporal de O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , NO, CO y relación Etilbenceno/m-p-xileno en Las Condes, Oct 2002 (Rappengluck y col. 2005).....	8
Figura 5: Ubicación de estaciones de red MACAM .....	13
Figura 6: Partes de un IH.....	14
Figura 7: Instalación del filtro en el IH .....	15
Figura 8: Conexión del IH a la bomba .....	16
Figura 9: Medición de flujo.....	16
Figura 10: Comparación de concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de IH con equipo TEOM.....	22
Figura 11: Correlación entre las concentraciones de MP <sub>2.5</sub> obtenidas con TEOM e IH..	23
Figura 12: Concentración promedio de precursores encontrados .....	24
Figura 13: Estimación de la composición de MP <sub>2.5</sub> .....	25
Figura 14: Estimación de la contribución de precursores al C orgánico.....	26



## LISTA DE ABREVIATURAS

- MP<sub>10</sub> : Material Particulado de diámetro menor a 10 µm
- MP<sub>2.5</sub> : Material Particulado de diámetro menor a 2,5 µm
- COV : Compuestos Orgánicos Volátiles
- AOS : Aerosoles Orgánicos Secundarios
- AIS : Aerosoles Inorgánicos Secundarios
- COS : Carbono Orgánico Secundario
- PPDA : Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica
- BTEX : Benceno, tolueno, Etilbenceno y Xileno
- IH : Impactador de Harvard
- GC/MS : Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas
- TEOM : Microbalanza de Elemento Oscilatorio Continuo

## RESUMEN

Los niveles de contaminación en la Región Metropolitana de Santiago han creado la necesidad de realizar estudios para determinar sus causas, así como también sus efectos en la salud y el medio ambiente.

El principal contaminante es el  $MP_{10}$ , compuesto por partículas gruesas y finas. La fracción de partículas 100% respirables, denominada  $MP_{2,5}$ , es la más perjudicial para la salud humana. El  $MP_{2,5}$  presenta el mayor desafío en cuanto a su caracterización físico química, ya que conociendo su composición es posible identificar sus fuentes y finalmente recomendar medidas para controlar sus emisiones.

Uno de los componentes son los Aerosoles Orgánicos Secundarios (AOS). Los AOS se generan por la oxidación en la atmósfera de ciertos precursores, como por ejemplo, los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

La campaña de muestreo se llevó a cabo del 14 a 28 de julio en invierno y del 20 de octubre al 3 de noviembre en primavera del año 2008.

Se determinó masa y se analizó carbono elemental y orgánico, levoglucosano, elementos y precursores de AOS antropogénicos y biogénicos.

Utilizando diferentes trazadores se identificaron, por ejemplo isopreno y  $\alpha$ -pineno, los cuales son precursores de AOS biogénico, la contribución relativa de estas 2 especies al total de masa de carbono orgánico durante esta campaña fue de  $77 \text{ ng/m}^3$  de isopreno y  $46 \text{ ng/m}^3$  de  $\alpha$ -pineno.

## ABSTRACT

The levels of air pollution measured at Metropolitan Region of Santiago, Chile created the needs of carry out several studies on the impact of its on environment and public health as well.

The major contaminant is the  $MP_{10}$ , compose of coarse and fine particles. The 100% inhalable particles fraction, corresponding fine particles, is the most harmful to human health.  $MP_{2.5}$  presents the greatest challenge in terms of its physic chemical characterization since knowing its composition is possible to identify their sources and then recommend measures to control their emissions.

Some of the components are the secondary organic aerosol (SOA). SOA originate from the oxidation in the atmosphere of certain precursors such as VOC.

A  $MP_{2.5}$  characterization measure campaign was carried out between Jul 14 – Jul 28 on winter and Oct 20 – Nov 3 on spring 2008.

Mass concentration, elemental and organic carbon, levoglucosan, elements and a number of anthropogenic and biogenic SOA species were determined.

Using different sources tracers were identified i.e. isoprene and  $\alpha$ -pinene, which are precursors of biogenic SOA. The relative contribution of this 2 species to the total mass of secondary organic carbon measured during this campaign was 77  $ng/m^3$  of isoprene y 46  $ng/m^3$  of  $\alpha$ -pinene.

## I INTRODUCCIÓN

Las características geográficas, topográficas y meteorológicas de la cuenca de los ríos Maipo y Mapocho, donde se ubica la ciudad de Santiago, junto a las altas emisiones provenientes de la industria y el transporte hacen que esta ciudad presente niveles de contaminación que superan las normas Chilenas de calidad de aire <sup>1</sup> para protección de la salud de la población.

Estos niveles de contaminación llevaron a la Región Metropolitana de Santiago a ser declarada como zona saturada por material particulado grueso (MP<sub>10</sub>), monóxido de carbono (CO) y ozono (O<sub>3</sub>) en la década de los 90. Esta declaración dio paso a la formulación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) como Instrumento de Gestión Ambiental basado en la Ley 19300 de Bases del Medio Ambiente.

Este Plan contempló medidas de mitigación destinadas a reducir las emisiones de fuentes fijas y móviles, con el fin de disminuir la exposición de las personas a niveles de contaminación que puedan afectar su salud.

En variados estudios se indica que el MP<sub>10</sub> resulta ser dañino para la salud de las personas, pues su fracción de partículas finas (MP<sub>2,5</sub>) es considerada, dado su carácter 100% respirable, la más agresiva en cuanto a sus efectos sobre la salud de la población (Dockery y col. 1993, Pope y col. 2006).

---

<sup>1</sup> DS N° 59 para emisiones de MP10, DS N° 112 para O3, DS N° 113 para SO2, DS N° 114 para NO2, DS N° 115 para CO

Existe evidencia científica que durante episodios de altas concentraciones de  $MP_{10}$  en la atmósfera, la morbilidad y la mortalidad de la población aumenta considerablemente (Dockery y col. 1993, Schwartz y col. 1996, Cakmak y col. 2009, Dales y col. 2009).

Cabe señalar que el  $MP_{2.5}$  se encuentra en vía de ser normado en Chile, es por esto que existen series de tiempo<sup>2</sup> de material particulado fino y grueso medidos con equipos Dicotómicos y TEOM en estaciones de la red MACAM. El método del equipo TEOM se basa en mediciones gravimétricas indirectas de MP. El flujo de aire pasa a través de un filtro sobre el cual se colecta MP. El filtro a su vez se encuentra sobre un tubo cuya frecuencia natural de oscilación disminuye conforme la masa de MP aumenta (Cyrus y col. 2001).



---

<sup>2</sup> Serie de tiempo: concentraciones horarias de MP

## 1.1 Marco teórico

El material particulado, es una mezcla compleja de partículas, sólidas o líquidas suspendidas en el aire, que varían en tamaño y composición dependiendo de su fuente de emisión, la que puede ser primaria o secundaria.

El material particulado primario es aquél que se emite de forma directa a la atmósfera. Está constituido por una porción inorgánica: óxidos de metales como: Si, Fe, Cu, Ca, Mg, Ni, etc., emitidos por la quema de combustibles, hollín y polvo natural de suelo y una porción orgánica que comprende diversos compuestos, entre los cuales se encuentra el pólen, esporas y restos orgánicos generados por el desgaste de la vegetación, que a pesar de ser extensivamente estudiados, sólo se ha logrado identificar el 30%, correspondiente a aproximadamente 1000 componentes orgánicos distintos (Pio y col. 2001).

Existe un compuesto importante identificado como trazador de quema de biomasa. llamado levoglucosano. El levoglucosano es un azúcar formado en la pirolisis de la celulosa, es muy estable bajo condiciones ambientales y ha sido usado extensamente para estimar la contribución de la quema de leña al material particulado. Por ser emitido a la atmósfera en forma directa, su aporte es más hacia el carbono orgánico primario (Schauer y col. 2000).

Por otra parte, el material particulado secundario se origina principalmente a partir de la oxidación en la atmósfera de gases emitidos por fuentes de combustión, como por ejemplo dióxido de azufre y óxido nítrico. Estos precursores dan lugar a sales de sulfato y nitrato, constituyendo la fracción inorgánica (AIS). Los aerosoles orgánicos secundarios (AOS) se generan a partir de distintos precursores orgánicos, que a su vez generan un gran número de compuestos orgánicos secundarios.

Por ejemplo, las figuras 1 y 2 muestran las rutas de oxidación más importantes en la formación de AOS de un compuesto aromático y un terpeno, que son las principales fuentes de material particulado secundario de origen antropogénico y biogénico, respectivamente.

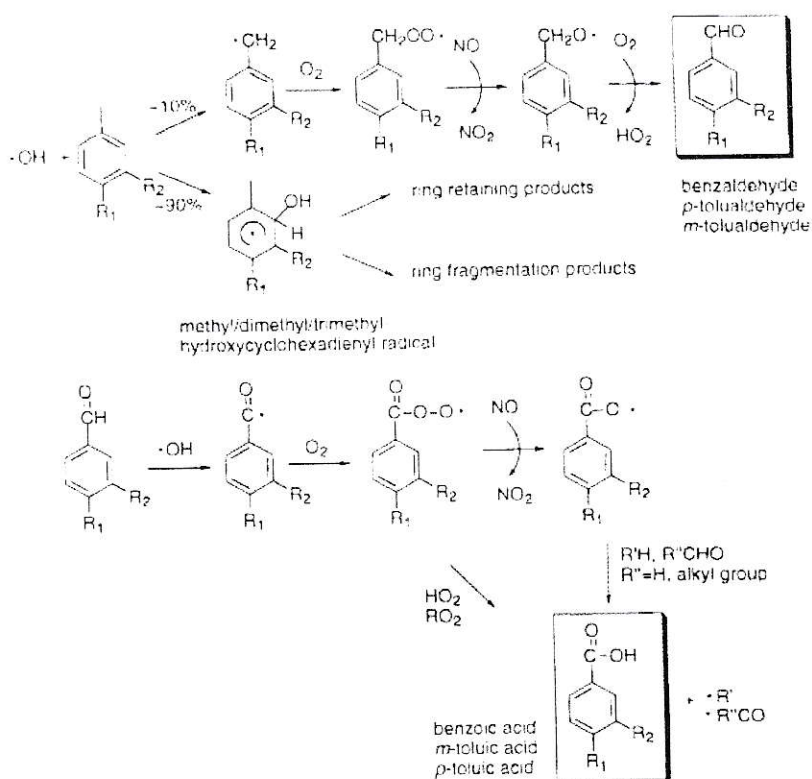


Figura 1: Ruta de oxidación de aromáticos (Forstner y col. 1997)



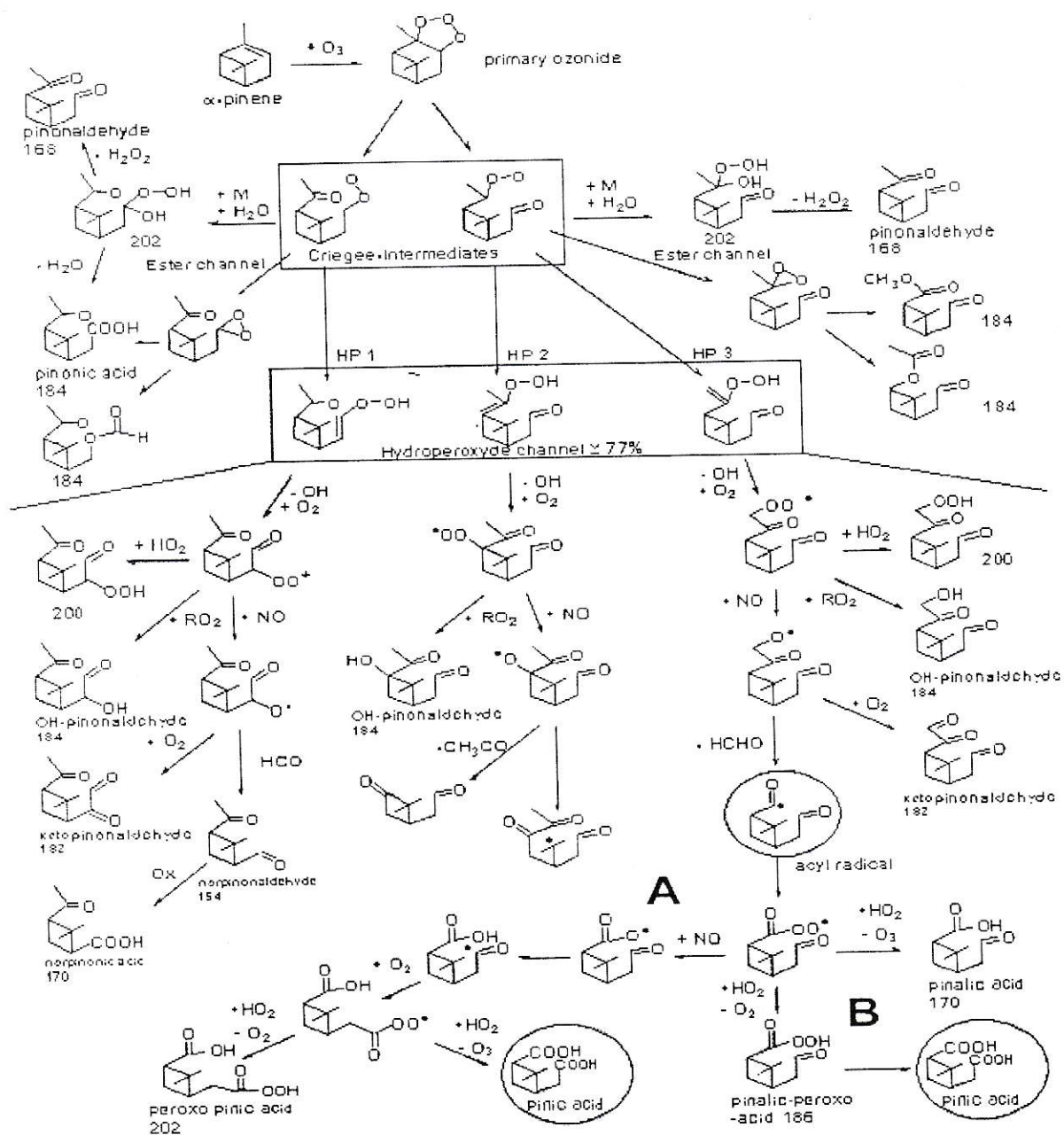
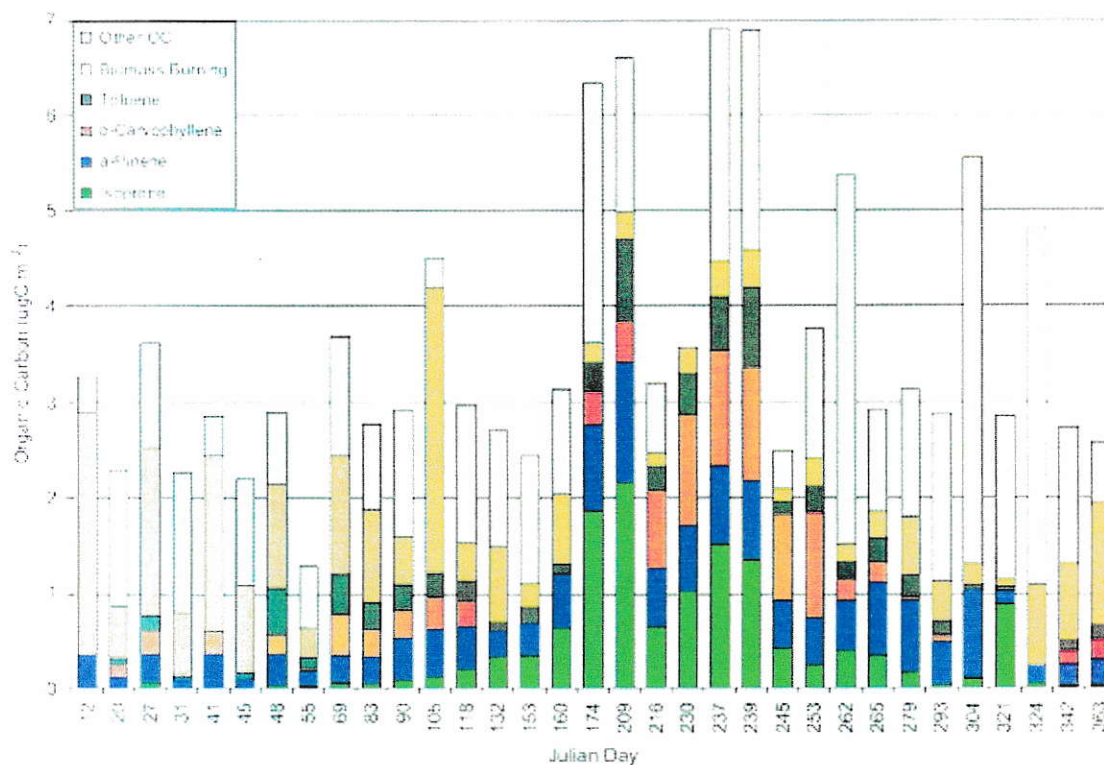


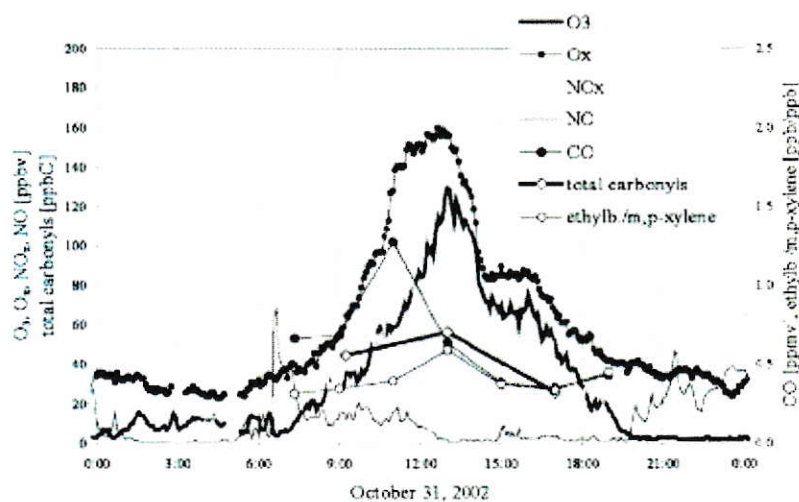
Figura 2: Ruta de oxidación de terpenos (Kanakidou y col. 1995)

De acuerdo a estos mecanismos, precursores gaseosos como los compuestos orgánicos volátiles (COV), generan productos secundarios condensables que aumentan la masa tanto del material particulado orgánico como del material particulado total. En la figura 3 se muestra la concentración de carbono orgánico promedio en un año y la variación estacional de su composición. Para controlar la formación de estos compuestos se necesita reducir, cuando esto es posible, las emisiones de sus precursores, que pueden ser de origen antropogénico, como el tolueno emitido por el tráfico vehicular, o biogénico, como los terpenos emitidos por la vegetación.



**Figura 3: Aporte de los AOS formados a partir de precursores antropogénicos y biogénicos a la concentración de Carbono Orgánico (Kleindienst y col. 2007)**

Cabe señalar que estas reacciones se encuentran mediadas por la presencia de NOx, O<sub>3</sub> y radiación solar (Rappengluck y col. 2005, Docherty y col. 2005, Alfara y col. 2006, Seinfeld y col. 2008). La figura 4 muestra la variación del carbono orgánico con respecto a la concentración horaria de NOx y O<sub>3</sub>. La concentración de etilbenceno y m,p-xileno aumenta al mediodía, cuando la radiación solar, NOx y O<sub>3</sub> alcanzan el máximo.



**Figura 4: Variación temporal de O<sub>3</sub>, NOx, NO, CO y relación Etilbenceno/m-p-xileno en Las Condes, Oct 2002 (Rappengluck y col. 2005)**

Las múltiples vías de formación de AOS hace difícil conocer cuáles son los precursores que los han formado, lo que dificulta la identificación y regulación de su fuente. Sin embargo, se han desarrollado métodos de análisis e identificación. Por ejemplo, Schauer y col. 2002, y más recientemente Kleindienst y col. 2007 han propuesto la utilización de trazadores, que sirven de indicadores para determinar concentración de AOS que se genera por cada precursor.

Por otro lado, estudios en cámaras fotoquímicas han identificado trazadores únicos que se generan por oxidación a partir de un precursor conocido. Estos estudios permiten determinar la cantidad de trazador generado en relación a la cantidad de material particulado total. De modo que se puede estimar la contribución a la masa de aerosol orgánico y material particulado total de productos de oxidación de un precursor/fuente en particular.

Un ejemplo sobre lo anteriormente mencionado lo entrega Kleindienst y col. 2007 en su publicación "Estimates of the contributions of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to SOA at a southeastern US location" en el cual utiliza la razón entre fuente-producto intermediario-AOS.

Los precursores que prioritariamente son considerados en este tipo de estudios son tolueno (de origen antropogénico), isopreno,  $\alpha$ -pineno y  $\beta$ -cariofileno (de origen biogénico), ya que son los más importantes en la formación de AOS (Kleindienst y col.2004). Otras publicaciones al respecto son las de Edney y col. 2005, Jaoui y col. 2005, Jaoui y col. 2007.

El isopreno es el terpeno más simple producido y emitido por los cloroplastos de las hojas de árboles frondosos, la cantidad depende de la masa vegetal de las hojas, de su área y la luz recibida, así como también de la temperatura.

El pineno es un monoterpeno, se presenta en la resina, tallos y hojas de los pinos. El cariofileno es un sesquiterpeno y es parte de los aceites esenciales de las plantas. El tolueno es un líquido incoloro, inflamable y se produce naturalmente en el petróleo crudo, es ésta su principal fuente. Se agrega a la gasolina como antidetonante.

## **1.2 Hipótesis**

- El aumento del Carbono orgánico en el MP de la Región Metropolitana de Santiago sería producto de la formación de aerosoles orgánicos secundarios (AOS), siendo uno de los principales precursores de estos aerosoles los BTEX de origen antropogénico y en menor medida los de origen biogénico.

## **1.3 Objetivo general**

- Caracterizar la composición y la concentración de AOS presentes en la atmósfera de la Región Metropolitana de Santiago, de modo de establecer contribuciones relativas en la formación de éstos aerosoles.

#### 1.4 Objetivo específico

Caracterización de AOS y precursores:

- Seleccionar y sistematizar la información química analítica referente al muestreo y análisis químico de los principales precursores de AOS, tales como isopreno,  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -cariofileno y tolueno
- Diseñar y ejecutar campañas de monitoreo medioambiental de  $MP_{2,5}$
- Análisis químico de las muestras en su contenido orgánico (precursores de AOS y otros hidrocarburos) e inorgánico (carbono elemental y elementos)
- Evaluación de los trazadores y precursores de AOS, aplicando la aproximación de Kleindienst
- Establecer la contribución relativa de COV antropogénicos y biogénicos a la formación de AOS

## II MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Metodología

Se realizaron dos campañas de muestreo, con duración de 14 días cada una, en tres sitios de Santiago, correspondientes a tres estaciones de monitoreo de la red MACAM (figura 5). La campaña de invierno se llevó a cabo en Pudahuel y Parque O'Higgins, durante las últimas semanas del mes de Julio, mientras que la campaña de primavera se realizó en Parque O'Higgins y Las Condes, durante la última semana de Octubre y primera semana de Noviembre. La estación Parque O'Higgins ( $33^{\circ}27'50,89''\text{S}-70^{\circ}39'38,77''\text{O}$ ) se ubica en el centro de la ciudad y representa una alta densidad poblacional y espacial, siendo principalmente sus emisiones de carácter antropogénico. La estación Pudahuel ( $33^{\circ}26'16,17''\text{S}-70^{\circ}45'0,14''\text{O}$ ) está ubicada al oeste de la ciudad, presenta las mayores concentraciones de  $\text{MP}_{10}$  en el periodo invernal debido al efecto de acumulación del MP generado por la inversión térmica (Perez y col. 2000, Gramsch y col. 2000). La estación Las Condes ( $33^{\circ}22'36,08''\text{S}-70^{\circ}31'23,13''$ ) está altamente enriquecida por efectos fotoquímicos lo que estimula la formación de los AOS (Rappengluck y col. 2005). En el anexo, se encuentran descritas las campañas con mayor detalle.



**Figura 5: Ubicación de estaciones de red MACAM**

Para el muestreo se utilizaron Impactadores de Harvard (IH). Los IH (figura 6) son equipos de monitoreo semicontinuo que conectados a una bomba de flujo controlado, son capaces de tomar muestras por 24 h o más.



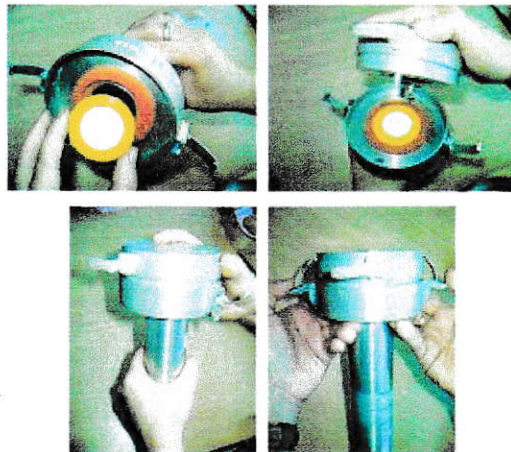




**Figura 6: Partes de un IH**

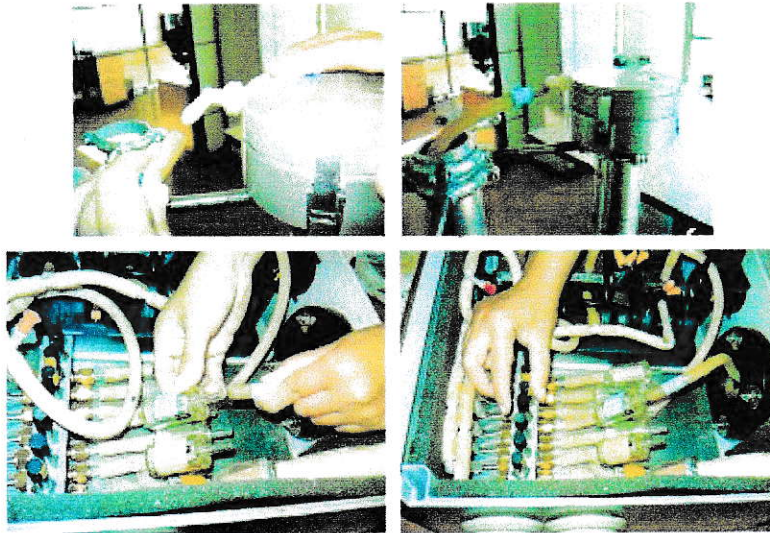
Cuerpo y base es donde se ubica el filtro para tomar la muestra y donde se conecta la bomba para extraer el aire. Nozzle es el cabezal de corte de material particulado, puede ser de 10 ó 2,5  $\mu\text{m}$ . Inlet es un dispositivo que permite la entrada del flujo de aire.

Una vez en terreno, se ubica el filtro en el cuerpo del IH de cara a la entrada del flujo de aire, se tapa con la base y se sella (figura 7)



**Figura 7: Instalación del filtro en el IH**

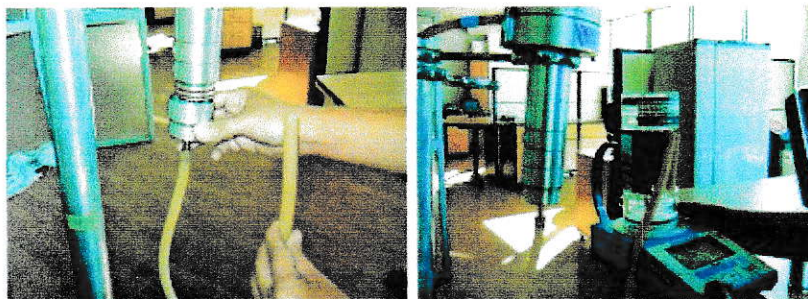
Cada IH tiene un fitting para conectarse a la bomba. La conexión se hace a través de una manguera que pasa por el soporte del IH (figura 8)



**Figura 8: Conexión del IH a la bomba**

El otro extremo de la manguera se conecta a un filtro que a su vez está conectado a la bomba, la función de este filtro es mantener el flujo de aire que pasa por la bomba libre de partículas.

El flujo se controla a través de las válvulas y se mide con un flujómetro conectado a un adaptador (figura 9)



**Figura 9: Medición de flujo**

Las muestras de aire se recogieron en filtros de teflón y cuarzo pre-tratado de 37 mm utilizando IH con cabezal de corte de 2,5  $\mu\text{m}$  a un régimen de 4 y 10 L/min durante 24 h. Se almacenaron refrigeradas hasta su análisis.

## 2.2 Análisis

A las muestras obtenidas se agregan 20  $\mu\text{g}$  de ácido cis-cetopínico y  $\text{d}_{50}$ -tetracosano. Se extrae con Soxhlet por 24 h con una mezcla 1:1 de diclorometano/metanol. El extracto se seca y se derivatiza con 250  $\mu\text{L}$  de bis(trimetilsilil) trifluoroaccedimida y 100  $\mu\text{L}$  de piridina. La muestra se agita para completar la reacción de derivatización. Finalmente se inyecta a un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas de captura de iones.

El análisis de BTEX, terpenos y levoglucosano se realizó con un cromatógrafo de gases Thermoquest, acoplado a un espectrómetro de masas iónico. El inyector, operado sin división de flujo, se calentó a 270° C y se inyectó una alícuota de 2  $\mu\text{L}$ . La separación se llevó a cabo en una columna capilar RTx-5MS (60 m de largo, 0,25 mm diámetro interno y 0,25  $\mu\text{m}$  de espesor). El programa de temperatura para el análisis, se inició isotérmicamente a 84° C por 1 min, seguido por una escala de temperatura de 8° C/min hasta 200° C, manteniéndose durante 2 min. Luego de 10° C/min hasta 300° C, manteniéndose durante 15 min. Se utilizó helio como gas transportador.

El carbono elemental y orgánico fue determinado a través del método termo óptico con equipo Termo/Óptico analizador de carbono modelo 2001. Este método está

basado en la oxidación preferencial de carbono orgánico y elemental a distintas temperaturas. La metodología se basa en el hecho de que los compuestos orgánicos pueden ser volatilizados del filtro en una atmósfera inerte de helio, mientras que el carbono elemental es quemado por un oxidante para extraerlo del filtro. El analizador libera compuestos de carbono orgánico de una pequeña sección del filtro mediante calentamiento a distintas temperaturas. Convierte estos compuestos en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) haciéndolos pasar por un oxidante (dióxido de manganeso caliente,  $\text{MnO}_2$ ) y luego reduce el  $\text{CO}_2$  a metano ( $\text{CH}_4$ ) haciéndolos pasar por un metanizador (catalizador de níquel enriquecido en hidrógeno). Finalmente cuantifica el  $\text{CH}_4$  con un detector de llama ionizante.

La medición óptica corrige la carbonización por pirólisis de los componentes de carbono orgánico que se convierten en carbono elemental. Sin esta corrección, la fracción de carbono orgánico de la muestra puede ser subestimada y la fracción de carbono elemental puede tener una componente de carbono orgánico pirolizado. La corrección de la pirólisis se hace de modo continuo mediante monitoreo de la transmisión y reflexión de la señal de un láser a través del filtro durante el ciclo de análisis. La transmisión y reflexión, dominada principalmente por la presencia de compuestos absorbentes como carbono elemental, aumenta a medida que ocurre la pirólisis y disminuye a medida que los compuestos que absorben luz son liberados en la última parte del análisis. Al monitorear la reflexión y transmisión la porción de carbono elemental que corresponde a carbono orgánico pirolizado puede ser asignado correctamente a carbono orgánico (Chen y col. 2004).

Los elementos (Si, Ca, S, Cl, K, Fe, Na) fueron determinados por fluorescencia de rayos-x con un espectrómetro de fluorescencia de rayos-x Philips MagicX PRO. La base de ésta técnica es la medida de la energía de la radiación emitida por los átomos excitados presentes en la muestra. Primero se irradia la muestra. Luego el colimador dirige la radiación fluorescente que proviene de la muestra hacia el cristal analizador. En este cristal la radiación se separa en distintas longitudes de onda. La intensidad de cada emisión, vale decir el número de fotones emitidos, es proporcional a la concentración de cada elemento.

Estas actividades fueron realizadas en el Laboratorio de Salud Pública y Medioambiental de la Universidad de Wisconsin, por el profesor James Schauer y su equipo.

La especiación de los AOS se llevó a cabo a través del método de trazadores propuesto por Kleindienst y col. (2007).

En este estudio se usó una cámara fotoquímica de 14,5 m<sup>3</sup> donde fueron irradiados concentraciones conocidas de mezclas de tolueno, isopreno,  $\alpha$ -pineno y  $\beta$ -cariofileno con NO<sub>x</sub> para provocar la formación de partículas. De estas reacciones fueron determinadas las concentraciones de los distintos productos de oxidación correspondientes a cada precursor, a estos productos se le llama trazador. Los trazadores son únicos para cada precursor. La tabla 1 resume los compuestos orgánicos que fueron identificados como trazadores.

Tabla 1: Identificación de compuestos orgánicos como trazadores (Kleindienst y col. 2007)

Precursor	Trazador	
Isopreno	I1	Acido 2-metilglicérico
	I2	2-metiltreitol
	I3	2-metileritritol
$\alpha$ -Pino	A1	Acido 3-Isopropilpentanodioico
	A2	Acido 3-Acetilpentanodioico
	A3	Acido 2-Hidroxi-4-Isopropiladipico
	A4	Acido 3-Acetilhexanodioico
	A5	Acido 3-Hidroxi-4,4-dimetilglutarico
	A6	Acido 2-Hidroxi-4,4-dimetilglutarico
	A7	Acido 3-(2-Hidroxi-1-metil-2-propil)-2,2-dimetilciclobutano-carboxilico
	PA	Acido Pinico
PNA	Acido Pinonico	
Tolueno	T3	Acido 2,3-Dihidroxi-4-oxopentanoico
$\beta$ -Cariofileno	C1	Acido $\beta$ -Cariofilico

Luego de determinar la concentración de cada trazador, se determinó la concentración de AOS y COS formado. Aplicando la relación de trazador/formación de AOS se obtiene el coeficiente de formación de AOS por cada precursor, esto es:

$$f_{\text{AOS}} = \frac{\sum_i [\text{tri}]}{[\text{AOS}]} \quad f_{\text{COS}} = \frac{\sum_i [\text{tri}]}{[\text{COS}]}$$

Donde [tri] es la concentración del trazador i, [AOS] y [COS] son las concentraciones de aerosol orgánico secundario y carbono orgánico secundario que se obtiene ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ). La tabla 2 muestra los coeficientes calculados para cada precursor.

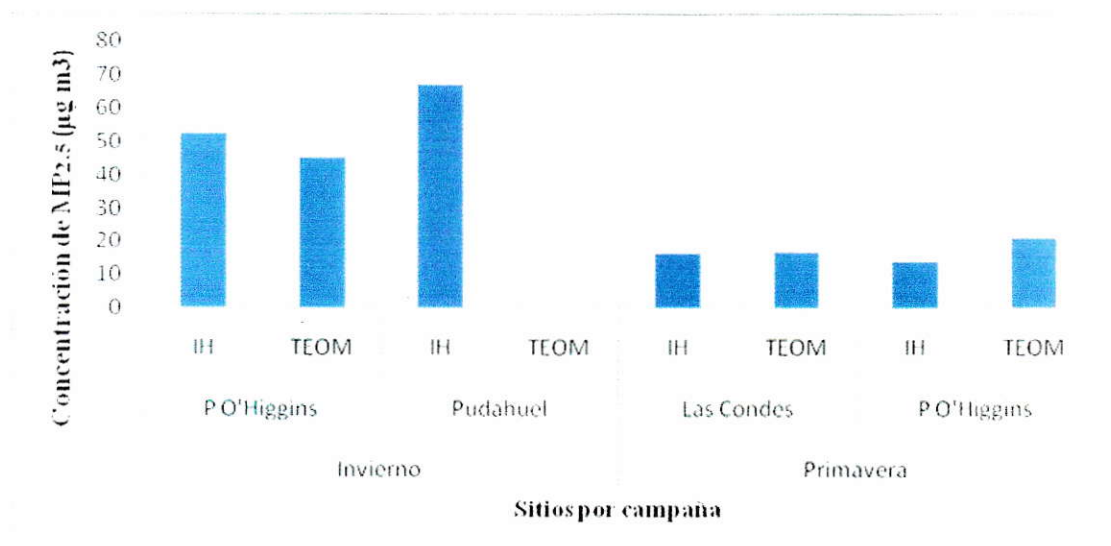
**Tabla 2: Coeficiente f para cada precursor (Kleindienst y col. 2007)**

	$f_{\text{AOS}}$	$f_{\text{COS}}$
Isopreno	0,1680	0,1550
$\alpha$ -Pino	0,0040	0,2310
Tolueno	0,0630	0,0079
$\beta$ -Cariofileno	0,0109	0,0230



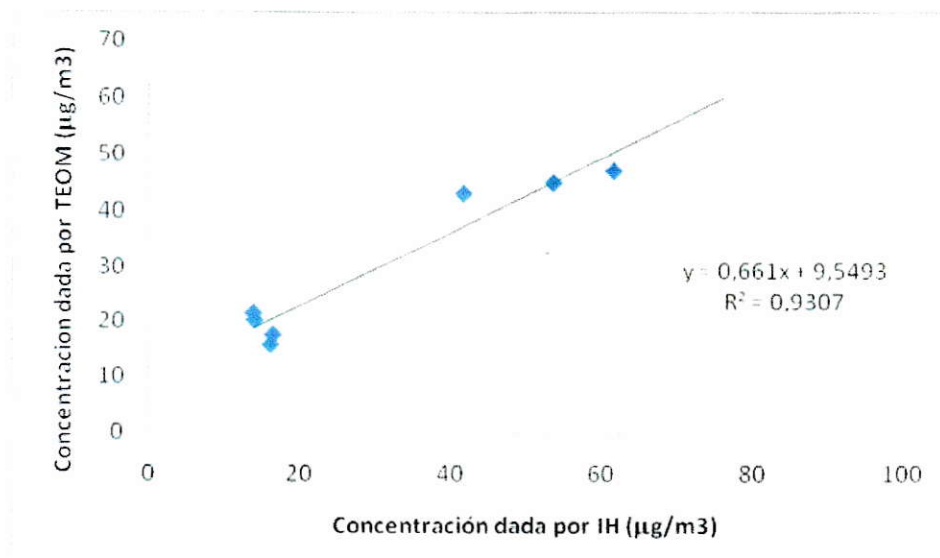
### III RESULTADOS

Para evaluar la calidad de las mediciones se compararon los resultados de  $MP_{2.5}$  obtenidos con los IH con las mediciones de la red MACAM para este parámetro. La figura 10 muestra la comparación de estos resultados. La estación de Pudahuel no contaba con los datos de concentraciones para la fecha de muestreo de la campaña de invierno.



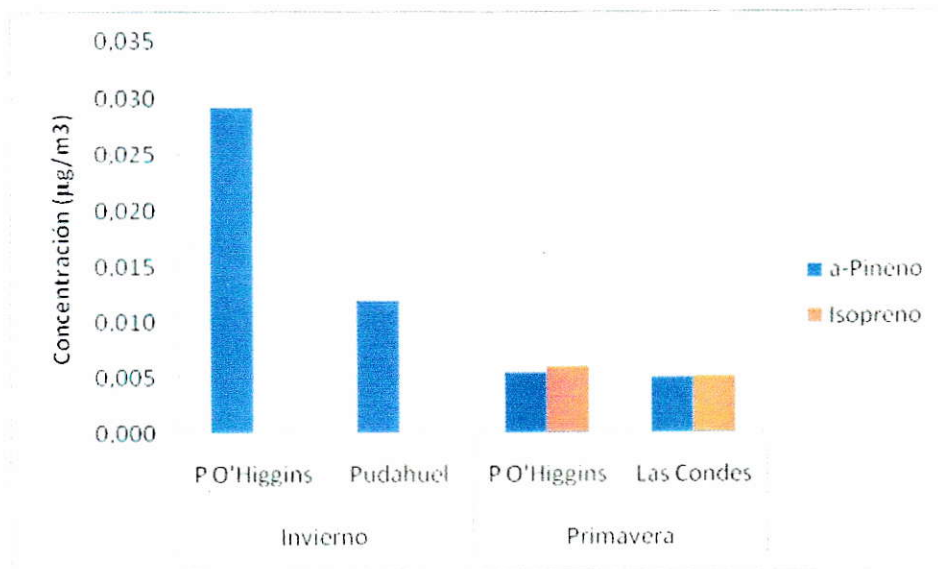
**Figura 10: Comparación de concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de IH con equipo TEOM**

La figura 11 muestra la correlación entre las concentraciones de  $MP_{2.5}$  obtenidas con TEOM e IH.



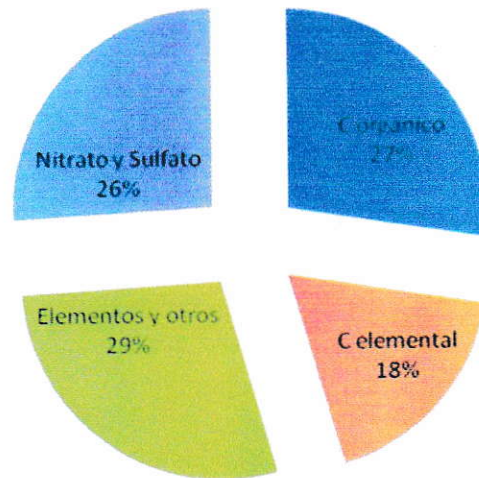
**Figura 11: Correlación entre las concentraciones de  $MP_{2,5}$  obtenidas con TEOM e IH**

De los trazadores biogénicos analizados fue posible determinar isopreno y  $\alpha$ -pineno, los que son ampliamente utilizados para este tipo de estudio. Como era de esperar el isopreno se encontró sólo en la campaña de monitoreo realizada en la Primavera del año 2008 en Las Condes. La fuente principal de isopreno es la floración de la familia de las Acacias, por lo que se estima que durante el invierno está bajo el límite de detección. Por otro lado, se encontró el  $\alpha$ -pineno durante ambos periodos de medición (figura 12).



**Figura 12: Concentración promedio de precursores encontrados**

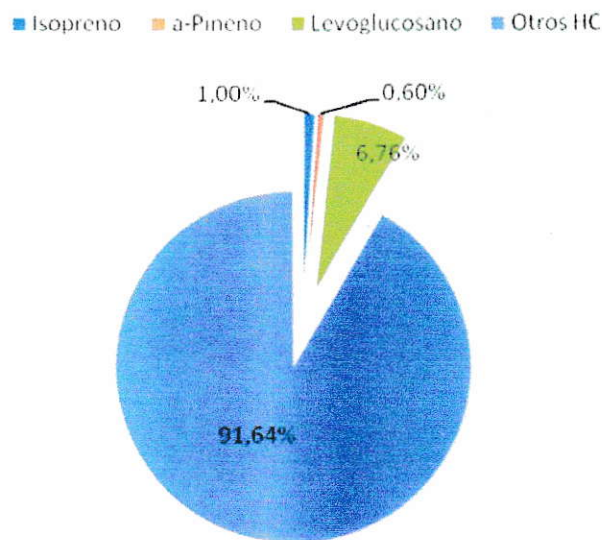
Complementariamente y como apoyo a este estudio se analizó la concentración de elementos (Si, Ca, S, entre otros), concentración de Carbono elemental y orgánico y levoglucosano. Con estos valores es posible construir la figura 13 donde se estiman las contribuciones de cada sustancia de interés en este estudio en términos de masa porcentual (%) presente en  $MP_{2,5}$ .



**Figura 13: Estimación de la composición de MP<sub>2.5</sub>**

Para el período de tiempo de este estudio se puede observar en la figura 14 que la contribución del Carbono orgánico es muy significativa llegando a un 27% del total de MP<sub>2.5</sub>.

En la figura 14 es posible ver la contribución de isopreno,  $\alpha$ -pineno y Levoglucosano al Carbono orgánico con más claridad.



**Figura 14: Estimación de la contribución de precursores al C orgánico**

Es preciso destacar que en esta investigación el interés estuvo en identificar las fuentes que contribuyen a los niveles de concentración de MP en la Región Metropolitana; bajo esta perspectiva las autoridades pertinentes pueden tomar medidas paliativas apropiadas y bien fundamentadas para combatir la contaminación. Demostrar el peso relativo que tienen estas sustancias en las mediciones, queda abierto para futuras investigaciones.



## IV DISCUSIÓN

En la figura 10 se comparan las concentraciones promedio de la serie de datos del equipo TEOM, para la fecha de muestreo, con los obtenidos de los análisis aplicados a las muestras de  $MP_{2.5}$  de los IH. Para ver la significancia entre dichas mediciones y las entregadas por la autoridad de salud a cargo de la red MACAM, se aplicó una correlación entre ambos equipos (figura 11) resultando ser de un 93%. De las concentraciones obtenidas con IH el 66% se ajustan a las obtenidas con TEOM.

Dada la presencia de partículas higroscópicas, la masa colectada sobre el filtro puede ser muy sensible a los cambios de vapor de agua presente en el ambiente. Para eliminar el efecto del agua la muestra colectada se mantiene a 50° C, a esta temperatura se pierde MP semivolátil presente en el filtro (Cyrus y col. 2001, Jaques y col. 2004).

Debido a que la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana presenta una clara distribución temporal (ver figura 4) es necesario que el diseño de monitoreo considere este importante hecho. De ahí entonces se definieron como periodo de interés el invierno y la primavera. La razón de esto es por el amplio uso de combustibles fósiles durante el invierno lo que genera cantidades importantes de BTEX, sustancias que contribuyen en la formación de los AOS de origen antropogénico. De esta misma forma se privilegió la campaña de primavera debido a las potenciales emisiones de COV biogénicos, precursores de AOS biogénico.

Estudios anteriores ejecutados en la región Metropolitana señalan claramente que es el transporte la principal fuente de BTEX (Rappengluck y col. 2000) al igual que en otras ciudades (Truc y col. 2007, Iovino y col. 2008) de ahí entonces se seleccionó la estación Parque O'Higgins para la instalación del sistema de monitoreo usado en este estudio.

Desafortunadamente en el proceso de análisis de los filtros sólo se privilegió el análisis específico de los trazadores biogénicos debido al alto costo de los análisis químicos de estas muestras y los estudios anteriormente indicados señalaban el fuerte rol que juegan los BTEX en la formación de AOS en la región, el interés era corroborar la presencia de los precursores biogénicos, debido a que la zona presenta una escasa forestación.

Con respecto a la concentración de isopreno, concuerda con lo descrito en la literatura, se encontró sólo en época de primavera cuando las temperaturas son más altas y coincide con el florecimiento de árboles y plantas.

En la figura 14 se puede ver que la fracción de Carbono orgánico, denominado Otros HC (hidrocarburos) es más del 90% de la masa de éste. En estos HC se cuentan todos los compuestos orgánicos de origen antropogénico y biogénico que son emitidos de forma directa (emisiones primarias).

En base a lo anteriormente señalado se debe priorizar medidas de control de las emisiones de los COV provenientes del transporte, distribución de combustible y del sector industrial, como por ejemplo, la industria que utiliza solventes químicos orgánicos, lo que significaría que la autoridad debe aplicar en el PPDA medidas que reduzcan la presencia de estas sustancias en la atmósfera de la Región Metropolitana.

## V CONCLUSIONES

Las campañas de monitoreo han entregado los resultados preliminares para establecer cuáles son los aportes relativos a la masa de  $MP_{2,5}$  de distintos compuestos orgánicos e inorgánicos.

La metodología propuesta para la determinación de AOS ha sido una herramienta útil para llevar a cabo este estudio. Se han podido analizar sin mayores contratiempos algunos de los compuestos orgánicos nombrados al inicio.

El aporte de los COV en la formación de AOS no incide cuantitativamente en el aumento de la masa de  $MP_{2,5}$ , pero son fundamentales para entender los fenómenos de formación del MP total lo que permite, haciendo uso de trazadores específicos, identificar de forma muy clara las principales fuentes de MP en la región.

Existen precursores de AOS de origen biogénico detectables en la atmósfera de Santiago, al igual que precursores de AOS de origen antropogénico, aunque no se han podido comparar los aportes de cada tipo al total de la masa de material particulado orgánico, dado el alto porcentaje que aportan otros hidrocarburos, posiblemente de origen primario.

Este tipo de estudios es tema para estudios futuros donde se pueda realizar un perfil anual del aporte de distintas especies al  $MP_{2,5}$ , en especial ver la variación estacional del Carbono orgánico.



## VI BIBLIOGRAFÍA

- Alfarra M., Paulsen D., Gysel M., Garforth A., Dommen J., Prévôt A., Wosnop D., Baltensperger U., Coe H. 2006. A mass spectrometric study of secondary organic aerosols formed from the photooxidation of anthropogenic and biogenic precursors in a reaction chamber. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Rev. 6: 5279-5293
- Cakmak S., Dales R., Gultekin T., Blanco C., Fernandez M., Rubio M.A., Oyola P. 2009. Components of particulate air pollution and emergency department visits in Chile. *Environmental and Occupational Health*. Rev 64: 148-155
- Chen L., Chow J.C., Watson J.G., Moosmüller H., Arnott W.P. 2004. Modeling reflectance and transmittance of quartz-fiber filter samples containing elemental carbon particles: Implications for thermal/optical analysis. *Journal Aerosol Science*. Rev. 35:765-780
- Cyrus J., Dietrich G., Kreyling W., Tuch T., Heinrich J. 2001. PM<sub>2,5</sub> measurements in ambient aerosol: comparison between Harvard Impactor (HI) and the Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) system. *The Science of the Total Environment*. Rev. 278: 191-197
- Dales R., Cakmak S., Blanco C. 2009. Air pollution and hospitalization for headache in Chile. *American Journal of Epidemiology*. Rev. 170: 1057-1066
- Docherty K., Yongbinlim W., Ziemann P. 2005. Contributions of organic peroxides to secondary aerosol formed from reactions of monoterpenes with O<sub>3</sub>. *Environmental Science and Technology*. Rev. 39: 4049-4059
- Dockery D.W., Pope C.A., Xu X.P., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M.E., Ferris B.G., Speizer F.E. 1993. An Association Between Air-Pollution And Mortality In 6 United-States Cities. *New England Journal of Medicine*. Rev. 329: 1753-1759
- Edney E.O., Kleindienst T.E., Jaoui M., Lewandowski M., Offenbergl J.H., Wang W., Claeys M. 2005. Formation of 2-methyl tetrols and 2-methylglyceric acid in secondary organic aerosol from laboratory irradiated isoprene/NOX/SO<sub>2</sub>/air mixtures and their detection in ambient PM<sub>2,5</sub> samples collected in the eastern United States. *Atmospheric Environment*. Rev. 39: 5281-5289
- Forstner H.L., Flagan R.C., Seinfeld H.J. 1997. Secondary Organic Aerosol from the Photooxidation of Aromatic Hydrocarbons: Molecular Composition. *Environmental Science and Technology*. Rev. 31: 1345-1358

- Gramsch E., Catalan N., Ormeño I., Palma G. 2000. Traffic and seasonal dependence of the light absorption coefficient in Santiago, Chile. *Applied Optics*. Rev. 39: 4895-4901
- Iovino P., Polverino R., Salvestrini S., Capasso S. 2008. Temporal and spatial distribution of BTEX pollutants in the atmosphere of metropolitan areas and neighbouring towns. *Environmental monitoring and assessment*. Rev. 150: 437-444
- Jaoui M., Kleindienst T.E., Lewandowski M., Offenbergl J.H., Edney E.O. 2005. Identification and quantification of aerosol polar oxygenated compounds bearing carboxylic or hydroxyl groups. 2. Organic tracer compounds from monoterpenes. *Environmental Science and Technology*. Rev.39: 5661–5673
- Jaoui M., Lewandowski M., Kleindienst T.E., Offenbergl J.H., Edney .EO. 2007. b-Caryophyllinic acid: an atmospheric tracer for b-caryophyllene secondary organic aerosol. *Geophysical Research Letters*. Rev. 34: L05816
- Jaques P., Ambs J., Grant W., Sioutas C. 2004. Field evaluation of the differential TEOM monitor for continuous PM<sub>2,5</sub> mass concentrations. *Aerosol Science and Technology*. Rev. 36: 49-59
- Kanakidou M., Seinfeld J.H., Pandis S.N . 1995. Organic aerosol and global climate modelling: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Rev. 5: 1053-1123
- Kleindienst T.E., Conner T.S., McIver C.D., Edney E.O. 2004. Determination of secondary organic aerosol products from the photooxidation of toluene and their implication in ambient PM<sub>2.5</sub>. *Journal of Atmospheric Chemistry*. Rev. 47: 70–100
- Kleindienst T.E., Jaoui M., Lewandowski M . 2007. Estimates of the contributions of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to secondary organic aerosol at a southeastern US location. *Atmospheric Environment*. Rev. 41: 8288-8300
- Kroll J., Seinfeld J. 2008. Chemistry of secondary organic aerosol: Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere. *Atmospheric Environment*. Rev. 42: 3593-3624
- Perez P., Trier A., Reyes J. 2000. Prediction of PM<sub>2,5</sub> concentrations several hours in advance using neural networks in Santiago, Chile. *Atmospheric Environment*. Rev. 34: 1196-1198
- Pio C., Alves C., Duarte A. 2001. Organic components of aerosols in a forested area of central Greece. *Atmospheric Environment*. Rev. 35: 389-401

- Pope C.A., Dockery D.W. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*. Rev. 56: 709-742
- Rappengluck B., Oyola P., Olaeta I., Fabian P. 2000. The evolution of photochemical smog in the metropolitan area of Santiago de Chile. *Journal of Applied Meteorology*. Rev. 39: 275-290
- Rappengluck B., Schmitz R., Bauerfeind M., Cereceda-Balic F., von Baer D., Jorquera H., Silva Y., Oyola P. 2005. An urban photochemistry study in Santiago de Chile. *Atmospheric Environment*. Rev. 39: 2913-2931
- Schauer, J. J., and Cass, G. R. 2000. Source apportionment of wintertime gas-phase and particle-phase air pollutants using organic compounds as tracers. *Environmental Science and Technology*. Rev. 34:1821–1832
- Schauer J.J., Fraser M.P., Cass G.R., Simoneit B.R. 2002. Source reconciliation of atmospheric gas-phase and particle-phase pollutants during a severe photochemical smog episode. *Environmental Science and Technology*. Rev. 36: 3806-3814
- Schwartz J., Dockery D.W., Neas L.M. 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles?. *Journal of the Air and Waste Management Association*. Rev. 46: 929–939
- Truc V., Oanh N. 2007. Roadside BTEX and other gaseous pollutants in relation to emission sources. *Atmospheric environment*. Rev. 41: 7685-7697

**ANEXO**

## VII ANEXO

### 7.1 Descripción de campañas

#### 7.1.1 Campaña de Invierno

El período de muestreo fue del 14 al 28 de julio de 2008. Los equipos Impactadores de Harvard se instalaron en las estaciones de la red MACAM de Pudahuel y Parque O'Higgins en paralelo (figura 5). Se tomaron muestras en filtros que se expusieron durante 7, 5 y 3 días, con un flujo de 4 LPM, controlado diariamente. La tabla 3 resume la toma de muestras.

#### 7.1.2 Campaña de Primavera

El período de muestreo fue del 20 de octubre al 3 de noviembre de 2008. Los equipos se instalaron en las estaciones de la red MACAM de Las Condes y Parque O'Higgins en paralelo (figura 5). Para el muestreo de primavera era necesario tener una mayor cantidad de muestra, por lo tanto, se tomaron 2 muestras en cada sitio, en filtros que se expusieron por 24 h, con un flujo de 10 LPM, controlado diariamente. Las tablas 4 y 5 resumen la toma de muestras.



Sitio	Tipo	Periodo	Fecha Inicio	Hora inicio	Fecha Fin	Hora Fin	Código	Flujo 1 L/min	Flujo 2 L/min	Flujo 3 L/min	Flujo 4 L/min	Flujo 5 L/min	Flujo 6 L/min	Flujo Promedio L/min	T min	V m <sup>3</sup>
Parque O'Higgins	PM2.5	14jul/21jul	14-07-2008	17:21	21-07-2008	9:09	T4881	4,25	3,91	4,09	4,07	4,20	1,52	3,67	9588	35,23
Pudahuel	PM2.5	14jul/21jul	14-07-2008	13:44	21-07-2008	10:16	T4885	4,28	4,04	4,04	3,79	4,00	0,13	3,38	9872	33,34
Parque O'Higgins	PM2.5	21jul/25jul	21-07-2008	15:10	25-07-2008	10:16	T4879	4,36	4,09	4,01	3,64	3,87		3,97	5502	21,85
Pudahuel	PM2.5	21jul/25jul	21-07-2008	15:10	25-07-2008	10:16	T4886	4,20	4,01	3,94	2,22	2,70		3,30	5466	18,01
Parque O'Higgins	PM2.5	25jul/28jul	25-07-2008	12:09	28-07-2008	12:24	T4875	4,16					4,01	4,09	4335	17,71
Pudahuel	PM2.5	25jul/28jul	25-07-2008	10:39	28-07-2008		T4873	4,06					3,97	4,02	3681	14,78

**Tabla 3: Detalle de mediciones tomadas en campaña invierno**

Sitio	Periodo	Fecha Inicio	Hora Inicio	Fecha Fin	Hora Fin	T min	ID HI 1	Flujo Inicio L/min	Flujo Fin L/min	Flujo Promedio L/min	V m3	ID HI 2	Flujo Inicio L/min	Flujo Fin L/min	Flujo Promedio L/min	V m3	V total m <sup>3</sup>
Las Condes	20oct/27oct	20-10-2008	18:10	21-10-2008	13:31	1161	CH6-004-SA	9,84	10,07	9,96	11,56	CH6-003-SA	9,84	9,73	9,79	11,36	22,92
Las Condes	20oct/27oct	21-10-2008	13:41	22-10-2008	15:20	1539	CH6-007-SA	10,07	9,96	10,02	15,42	CH6-008-SA	9,84	9,96	9,90	15,24	30,65
Las Condes	20oct/27oct	22-10-2008	15:30	23-10-2008	16:35	1505	CH6-011-SA	9,96	9,61	9,79	14,73	CH6-012-SA	9,96	9,73	9,84	14,81	29,54
Las Condes	20oct/27oct	23-10-2008	16:40	24-10-2008	10:00	1040	CH6-013-SA	9,84	9,84	9,84	10,24	CH6-014-SA	9,84	9,96	9,90	10,30	20,53
Las Condes	20oct/27oct	24-10-2008	10:07	25-10-2008	10:30	1463	CH6-019-SA	9,96	9,84	9,90	14,49	CH6-020-SA	9,96	9,84	9,90	14,49	28,97
Las Condes	20oct/27oct	25-10-2008	10:38	27-10-2008	11:39	2941	CH6-023-SA	9,84	10,07	9,96	29,29	CH6-024-SA	9,84	9,84	9,84	28,95	58,24
Parque O'Higgins	20oct/27oct	20-10-2008	16:45	21-10-2008	11:51	1146	CH6-001-SA	9,84	10,07	9,96	11,41	CH6-002-SA	9,84	9,96	9,90	11,35	22,76
Parque O'Higgins	20oct/27oct	21-10-2008	12:05	22-10-2008	13:37	1532	CH6-005-SA	9,73	9,73	9,73	14,90	CH6-006-SA	9,96	9,96	9,96	15,26	30,16
Parque O'Higgins	20oct/27oct	22-10-2008	13:42	23-10-2008	17:55	1693	CH6-009-SA	9,73	9,61	9,67	16,37	CH6-010-SA	9,96	9,84	9,90	16,76	33,13
Parque O'Higgins	20oct/27oct	23-10-2008	18:05	24-10-2008	9:19	914	CH6-015-SA	9,96	9,61	9,79	8,94	CH6-016-SA	9,96	9,61	9,79	8,94	17,89
Parque O'Higgins	20oct/27oct	24-10-2008	9:25	25-10-2008	9:30	1445	CH6-017-SA	9,84	9,73	9,79	14,14	CH6-018-SA	9,84	9,73	9,79	14,14	28,28
Parque O'Higgins	20oct/27oct	25-10-2008	9:37	26-10-2008	9:20	1423	CH6-021-SA	9,73	9,61	9,67	13,76	CH6-022-SA	9,73	9,61	9,67	13,76	27,52
Parque O'Higgins	20oct/27oct	26-10-2008	9:26	27-10-2008	10:48	1522	CH6-025-SA	9,96	10,07	10,02	15,25	CH6-026-SA	9,84	9,96	9,90	15,07	30,31

**Tabla 4: Detalle de mediciones tomadas en campaña primavera**

Sitio	Periodo	Fecha Inicio	Hora Inicio	Fecha Fin	Hora Fin	T min	ID HI 1	Flujo Inicio L/min	Flujo Fin L/min	Flujo Promedio L/min	V m3	ID HI 2	Flujo Inicio L/min	Flujo Fin L/min	Flujo Promedio L/min	V m3	V total m <sup>3</sup>
Las Condes	27oct/3nov	27-10-2008	11:47	28-10-2008	10:25	1358	CH6-027-SA	10,07	9,73	9,90	13,45	CH6-028-SA	10,07	9,96	10,02	13,60	27,05
Las Condes	27oct/3nov	28-10-2008	10:30	29-10-2008	9:57	1407	CH6-033-SA	9,84	9,61	9,73	13,69	CH6-034-SA	10,07	10,07	10,07	14,17	27,86
Las Condes	27oct/3nov	29-10-2008	10:05	30-10-2008	10:00	1435	CH6-037-SA	9,84	9,73	9,79	14,04	CH6-038-SA	10,07	9,96	10,02	14,37	28,42
Las Condes	27oct/3nov	30-10-2008	10:05	31-10-2008	10:37	1472	CH6-041-SA	9,84	9,84	9,84	14,49	CH6-042-SA	9,96	9,84	9,90	14,57	29,06
Las Condes	27oct/3nov	31-10-2008	10:43	01-11-2008	11:23	1480	CH6-049-SA	9,84	9,84	9,84	14,57	CH6-050-SA	9,84	9,84	9,84	14,57	29,14
Las Condes	27oct/3nov	01-11-2008	11:30	02-11-2008	11:28	1438	CH6-045-SA	9,84	9,84	9,84	14,15	CH6-046-SA	9,96	10,07	10,02	14,40	28,56
Parque O'Higgins	27oct/3nov	02-11-2008	11:35	03-11-2008	11:00	1405	CH6-053-SA	9,96	9,84	9,90	13,91	CH6-054-SA	10,07	9,96	10,02	14,07	27,98
Parque O'Higgins	27oct/3nov	27-10-2008	10:55	28-10-2008	9:08	1333	CH6-029-SA	10,13	9,96	10,05	13,39	CH6-030-SA	10,07	9,84	9,96	13,28	26,67
Parque O'Higgins	27oct/3nov	28-10-2008	9:15	29-10-2008	8:55	1420	CH6-031-SA	9,96	9,84	9,90	14,06	CH6-032-SA	9,84	9,73	9,79	13,90	27,96
Parque O'Higgins	27oct/3nov	29-10-2008	9:02	30-10-2008	8:55	1433	CH6-035-SA	9,96	9,96	9,96	14,27	CH6-036-SA	9,84	9,73	9,79	14,02	28,29
Parque O'Higgins	27oct/3nov	30-10-2008	9:02	31-10-2008	9:26	1464	CH6-039-SA	9,96	9,84	9,90	14,50	CH6-040-SA	9,84	9,73	9,79	14,33	28,82
Parque O'Higgins	27oct/3nov	31-10-2008	9:34	01-11-2008	10:20	1486	CH6-047-SA	10,02	9,84	9,93	14,76	CH6-048-SA	9,96	9,73	9,84	14,63	29,38
Parque O'Higgins	27oct/3nov	01-11-2008	10:26	02-11-2008	10:20	1434	CH6-043-SA	9,96	9,73	9,84	14,12	CH6-044-SA	9,84	9,61	9,73	13,95	28,07
Parque O'Higgins	27oct/3nov	02-11-2008	10:30	03-11-2008	9:00	1350	CH6-051-SA	10,02	9,84	9,93	13,41	CH6-052-SA	9,84	9,73	9,79	13,21	26,62

**Tabla 5: Detalle de mediciones tomadas en campaña primavera**



Con el flujo a 10 LPM en cada filtro se logró colectar aproximadamente 30 m<sup>3</sup> de muestra por día.

Vale decir que, para ambas campañas cada periodo de muestreo constituye una muestra, sin importar el número de filtros que éste tenga. Por ejemplo, el periodo de 14jul/21jul en Parque O'Higgins tiene una muestra de 1 filtro, equivalente a 35,23 m<sup>3</sup>. En cambio, el periodo de 20oct/27oct en el mismo sitio tiene una muestra de 7 filtros, equivalente a 190 m<sup>3</sup>.

## 7.2 Cálculo de resultados

El reporte de los análisis de trazadores de AOS es entregado en masa por muestra. La tabla 6 resume las masas de los trazadores encontrados.

Sitio	Periodo	V total m <sup>3</sup>	Isopreno (I2) ng	Isopreno (I3) ng	a-Pineno (PA) ng	α-Pineno (A3) ng	α-Pineno (PNA) ng	Levoglucosano μg
Parque O'Higgins	14jul/21jul	39,16				960		61,63
Pudahuel	14jul/28jul	79,50				475		97,04
Las Condes	20oct/27oct	190,86	1527,5	257,5	647,5	2122,5	685	18,90
	27oct/3nov	198,07	2342,5	535			1102,5	15,72
Parque O'Higgins	20oct/27oct	190,06					942,5	11,22
	27oct/3nov	195,80					1007,5	15,86

**Tabla 6: Resultados de análisis por GCMS**

La concentración final del precursor de AOS es la suma de las concentraciones de sus trazadores. Con la concentración del precursor y el coeficiente de formación de AOS y COS se calcula la concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de aerosol que forma cada precursor (tabla 7).

Sitio	Periodo	Isopreno (I2)	Isopreno (I3)	Isopreno	$[\text{SOC}]_{\text{iso}}$	$[\text{SOA}]_{\text{iso}}$	$\alpha$ -Pineno (PA)	$\alpha$ -Pineno (A3)	$\alpha$ -Pineno (PNA)	$\alpha$ -Pineno	$[\text{SOC}]_{\alpha\text{-Pin}}$	$[\text{SOA}]_{\alpha\text{-Pin}}$
Parque O'Higgins	14jul/21jul							0,0245		0,0245	<b>0,1061</b>	<b>0,1459</b>
Pudahuel	14jul/28jul							0,0060		0,0060	<b>0,0259</b>	<b>0,0356</b>
Las Condes	20oct/27oct	0,0080	0,0013	0,0094	<b>0,0603</b>	<b>0,1484</b>	0,0034	0,0111	0,0036	0,0181	<b>0,0784</b>	<b>0,1078</b>
Las Condes	27oct/3nov	0,0118	0,0027	0,0145	<b>0,0937</b>	<b>0,2306</b>			0,0056	0,0056	<b>0,0241</b>	<b>0,0331</b>
Parque O'Higgins	20oct/27oct								0,0050	0,0050	<b>0,0215</b>	<b>0,0295</b>
Parque O'Higgins	27oct/3nov								0,0051	0,0051	<b>0,0223</b>	<b>0,0306</b>

**Tabla 7: Concentraciones de trazadores y precursores**

Las figuras 14 y 15 fueron construidas a partir de la comparación de concentraciones de  $MP_{2,5}$ , carbono elemental y orgánico, elementos, nitrato y sulfato, con la de los precursores encontrados. Estas concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) fueron calculadas para los mismos periodos de muestreo (tabla 8)

Sitio	Periodo	$MP_{2,5}$	C orgánico	C elemental	Na	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$	Levoglucosano
Parque O'Higgins	14jul/21jul	41.76	13.97	7.24		0.26	0.66	0.50	0.18	0.14	0.31	4.44	10.58	1.57
Pudahuel	14jul/28jul	65.16	18.19	9.16	0.07	0.47	0.76	1.32	0.40	0.16	0.38	0.10	0.30	1.22
Las Condes	20oct/27oct	16.26	3.69	2.26	0.12	0.21	0.85		0.12	0.09	0.14	3.05	4.36	0.10
Las Condes	27oct/3nov	16.50	3.31	8.00	0.18	0.15	0.95		0.11	0.07	0.11	3.30	4.03	0.08
Parque O'Higgins	20oct/27oct	14.10	3.59	2.00	0.20	0.24	0.73	0.01	0.13	0.09	0.13	3.34	2.97	0.06
Parque O'Higgins	27oct/3nov	13.94	3.33	1.65	0.25	0.16	1.11	0.02	0.14	0.07	0.11	4.02	3.02	0.08
	promedio	27.95	7.68	5.05	0.14	0.25	0.84	0.31	0.18	0.10	0.20	3.04	4.21	0.52

**Tabla 8: Concentraciones de compuestos adicionales al estudio**