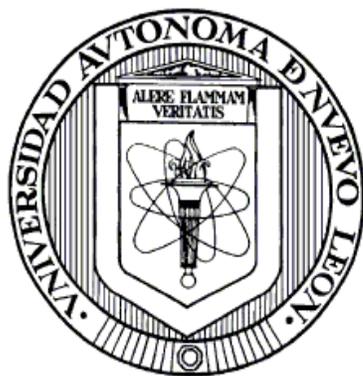


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**CARACTERIZACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL MATERIAL  
PARTICULADO SUSPENDIDO EN LA ATMÓSFERA  
DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY**

Por

DAISY IRANIA BARAJAS HERRERA

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientación en  
Química Analítica Ambiental

Diciembre, 2007

**CARACTERIZACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL MATERIAL  
PARTICULADO SUSPENDIDO EN LA ATMÓSFERA  
DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY**

Aprobación de la tesis:

---

Dr. Juan Manuel Alfaro Barbosa.  
**Asesor de la Tesis**

---

---

---

---

---

Dra. Maria Teresa Garza González.  
**Subdirector de Estudios de Posgrado**

## RESUMEN

Daisy Irania Barajas Herrera. Fecha de Graduación: Diciembre, 2007

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título del Estudio: CARACTERIZACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL MATERIAL PARTICULADO SUSPENDIDO EN LA ATMÓSFERA DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY

Número de páginas: 128 Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Química Analítica Ambiental

Área de Estudio: Química Analítica Ambiental

**Propósito y Método del Estudio:** Dentro de los contaminantes criterio, el ozono y las partículas tienen una mayor importancia debido a la magnitud de sus concentraciones en el aire y la frecuencia en la que exceden las normas oficiales en el AMM. Por ello, el propósito de esta investigación es emitir juicios sobre el origen del material particulado. Para lograr los objetivos se tomaron muestras de PST en 10 puntos del AMM, cuyo periodo de muestreo comprendió de julio a diciembre del 2006, los metales analizados fueron: Cd, Cu, Cr, Fe, Pb, Mg, Mn, K y Zn, los cuales fueron analizados por F-AAS, previa digestión por microondas de los filtros impactados. Algunos filtros seleccionados fueron además sometidos a un Análisis Elemental y SEM-EDS.

**Contribuciones y Conclusiones:** La base de datos obtenida se sometió a un Análisis de Factores, el cual revela la presencia de 4 factores y su correspondiente origen de contaminación predominantemente de origen antropogénico; el Análisis por Agrupamiento nos revela la presencia de 3 grupos importantes corroborando los resultados del análisis de factores. El análisis por SEM-EDS corrobora los resultados obtenidos por el análisis quimiométrico, donde se encontró que los posibles orígenes de emisión del material particulado son actividades industriales como la industria metal-mecánica, de pinturas y pigmentos; la erosión del suelo y obras públicas.

**FIRMA DEL ASESOR:** \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a Dios por darme salud y la oportunidad de llegar al final de esta etapa de mi vida.

A la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León por la beca otorgada para la realización de mis estudios.

A la Agencia de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales y al Sistema Integral de Monitoreo Ambiental por permitirme el uso de su equipo y su invaluable ayuda en el desarrollo de este estudio. En especial a la M.C Ma. Idolina de la Cerda, Ing. Jaime de la Garza, Ing. Rubén Romo, Ing. Gerardo Argullín.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Juan Manuel Alfaro Barbosa Asesor de mi tesis. A mis profesores por toda la enseñanza que me brindaron. A los departamentos de Síntesis Orgánica e Inorgánica de la Facultad de Ciencias Químicas.

Y sobre todo a mi familia por el apoyo moral que siempre me ha brindado y a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

### Capítulo

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 1.1 Fundamento Teórico.....  | 2  |
| 1.1.1 Contaminación Atmosférica .....  | 2  |
| 1.1.1.1 Clasificación de los Contaminantes Atmosféricos .....  | 3  |
| 1.1.1.1.1 Contaminantes Primarios.....   | 4  |
| 1.1.1.1.2 Contaminantes Secundarios .....  | 5  |
| 1.1.1.2 Fuentes de Emisiones a la Atmósfera .....  | 5  |
| 1.1.1.2.1 Fuentes Puntuales .....  | 6  |
| 1.1.1.2.2 Fuentes de Área .....  | 6  |
| 1.1.1.2.3 Fuentes Naturales.....   | 7  |
| 1.1.1.2.4 Fuentes Móviles.....   | 7  |
| 1.1.2 Principales Contaminantes de Aire y su Normatividad.....   | 8  |
| 1.1.3 Material Particulado .....   | 9  |
| 1.1.3.1 Clasificación de las Partículas Suspendidas .....  | 10 |
| 1.1.3.2 Efectos de las Partículas Atmosféricas en la Salud Humana y en el Entorno.....   | 12 |
| 1.1.3.2.1 Efectos en la Salud Humana.....  | 12 |
| 1.1.3.2.2 Efectos en Animales .....  | 14 |
| 1.1.3.2.3 Efectos en la Vegetación .....   | 15 |
| 1.1.3.2.4 Efectos en las Condiciones Atmosféricas ..   | 15 |
| 1.1.3.2.5 Efectos en Bienes Materiales.....  | 17 |
| 1.1.4 Análisis de Días sobre la Norma Presentes en el Área Metropolitana de Monterrey por Partículas menores a 10 micras ..... | 17 |
| 1.2 Revisión Bibliográfica.....  | 20 |
| 1.2.1 Antecedentes .....   | 20 |
| 1.3 Hipótesis y Objetivos .....  | 27 |
| 1.3.1 Hipótesis .....  | 27 |
| 1.3.2 Objetivos .....  | 27 |
| 1.3.2.1 Objetivo General .....   | 27 |
| 1.3.2.2 Objetivos Particulares.....  | 27 |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....   | 29 |
| 2.1 Metodología del Proyecto .....   | 30 |
| 2.2 Recolección de Partículas Suspendidas Totales .....  | 32 |
| 2.2.1 Zonas de Muestreo .....  | 32 |
| 2.2.2 Ubicación de las Estaciones de Monitoreo .....   | 33 |
| 2.3 Muestreador de Partículas Suspendidas Totales.....   | 35 |
| 2.3.1 Equipo de Medición de PST y Materiales .....   | 36 |
| 2.4 Digestión por Microondas .....   | 37 |

|                                |  |     |
|--------------------------------|--|-----|
| 2.4.1                          | Preparación de la Muestra .....  | 39  |
| 2.5                            | Técnicas de Caracterización.....   | 42  |
| 2.5.1                          | Análisis de Metales por Espectroscopia de Absorción<br>Atómica .....                                       | 42  |
| 2.5.1.1                        | Operación del Equipo de Absorción Atómica .....  | 43  |
| 2.5.1.2                        | Preparación de los Estándares .....  | 44  |
| 2.5.2                          | Análisis Elemental.....  | 45  |
| 2.5.3                          | Microscopía Electrónica de Barrido.....  | 46  |
| 2.6                            | Evaluación de Datos .....  | 49  |
| 2.6.1                          | Análisis de Factores.....  | 49  |
| 2.6.2                          | Análisis por Agrupamiento .....  | 50  |
| RESULTADOS Y DISCUSIONES ..... |  | 52  |
| 3.1                            | Muestreo .....   | 52  |
| 3.2                            | Calibración del Método Analítico.....  | 58  |
| 3.2.1                          | Procesamiento de Datos para la Función de Calibración de<br>Primer Orden .....                             | 58  |
| 3.2.2                          | Verificación de la Linealidad de la Función de Calibración ..  | 62  |
| 3.2.3                          | Limite de Detección.....   | 63  |
| 3.2.4                          | Concentraciones de Metales en Partículas Suspendidas<br>Totales .....                                      | 64  |
| 3.2.5                          | Comparación de la Concentración de los Metales en PST ..   | 69  |
| 3.3                            | Puntos Críticos y Normatividad.....  | 75  |
| 3.4                            | Análisis Elemental de las Muestras .....   | 77  |
| 3.5                            | Análisis de los Filtros de PST por Microscopia Electrónica de<br>Barrido con Microanálisis de Rayos X..... | 80  |
| 3.5.1                          | Análisis Estadístico del SEM-EDS .....   | 81  |
| 3.5.2                          | Análisis Microestructural por SEM-EDS.....   | 84  |
| 3.6                            | Evaluación Quimiométrica de Resultados Analíticos .....  | 93  |
| 3.6.1                          | Análisis de Factores.....  | 93  |
| 3.6.1.1                        | Primer Muestreo.....   | 94  |
| 3.6.1.2                        | Segundo Muestreo .....   | 97  |
| 3.6.2                          | Análisis por Agrupamiento .....  | 100 |
| 3.6.2.1                        | Primer Muestreo .....  | 101 |
| 3.6.2.2                        | Segundo Muestro .....  | 103 |
| CONCLUSIONES .....             |  | 106 |
| BIBLIOGRAFÍA .....             |  | 110 |

## LISTA DE TABLAS

### Tabla

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE LA CALIDAD DEL AIRE .....   | 9  |
| 2  | DÍAS SOBRE LA NORMA POR $PM_{10}$ EN EL AMM .....   | 19 |
| 3  | CONDICIONES DE TRABAJO HI-VOL Y CARACTERÍSTICAS<br>DEL FILTRO .....   | 37 |
| 4  | DIGESTIÓN POR MICROONDAS .....  | 41 |
| 5  | CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE<br>METALES POR EAA .....  | 44 |
| 6  | COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....  | 53 |
| 7  | CONDICIONES METEREOLÓGICAS Y CONCENTRACIÓN DE PST<br>EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DURANTE EL PERÍODO DE<br>SEPTIEMBRE A DICIEMBRE 2006 ..... | 54 |
| 8  | PRUEBA DE VERIFICACIÓN DE LINEALIDAD Y LÍMITES DE<br>DETECCIÓN.....   | 64 |
| 9  | CONCENTRACIÓN DE METALES EN PST DEL PERÍODO DE<br>MUESTREO JULIO-SEPTIEMBRE .....   | 65 |
| 10 | VALORES MÁXIMOS DE CONCENTRACIÓN POR METAL<br>PERÍODO DE MUESTREO JULIO-SEPTIEMBRE.....   | 66 |
| 11 | CONCENTRACIÓN DE METALES EN PST DEL PERÍODO DE<br>MUESTREO OCTUBRE-DICIEMBRE .....  | 67 |
| 12 | VALORES MÁXIMOS DE CONCENTRACIÓN POR METAL DEL<br>MUESTREO 2 .....  | 68 |
| 13 | COMPARACIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS ANALIZADOS .....   | 76 |
| 14 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS MUESTRAS<br>DE PST PARA EL PERÍODO JULIO-SEPTIEMBRE.....   | 78 |
| 15 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS MUESTRAS<br>DE PST PARA EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE.....  | 79 |
| 16 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL<br>PUNTO 1.1 POR SEM-EDS .....   | 85 |
| 17 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL<br>PUNTO 2.1 POR SEM-EDS .....   | 87 |
| 18 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL<br>PUNTO 7.5 POR SEM-EDS .....   | 89 |
| 19 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL<br>PUNTO 8.1 POR SEM-EDS .....   | 91 |
| 20 | RESUMEN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS POR SEM-EDS .....   | 92 |

## LISTA DE FIGURAS

| Figura   | Página |
|--|--------|
| 1. Funciones que realiza la Atmósfera .....                                  | 3      |
| 2. Fuentes de emisión por Material Particulado .....                         | 10     |
| 3. Composición de las Partículas Suspendidas .....                           | 11     |
| 4. Retención de la Partículas Suspendidas en el tracto Respiratorio.....     | 13     |
| 5. Días sobre la Norma de PM10 en el AMM 1993-2006.....                      | 18     |
| 6. Esquema de la metodología del Proyecto .....                              | 31     |
| 7. Estaciones de monitoreo del SIMA .....                                    | 33     |
| 8. Funcionamiento del Muestreador de Alto Volumen .....                      | 35     |
| 9. Muestreador Hi-Vol .....  | 36     |
| 10. Equipo Microondas .....  | 38     |
| 11. Espectrómetro de Absorción Atómica .....                                 | 43     |
| 12. Analizador Elemental .....   | 46     |
| 13. Microscopio Electrónico de Barrido.....                                  | 47     |
| 14. Ubicación de los puntos de muestreo .....                                | 53     |
| 15. Concentración de PST en el AMM de septiembre a diciembre.....            | 57     |
| 16. Curva de Calibración de Cadmio .....                                     | 60     |
| 17. Curva de Calibración de Cromo.....                                       | 60     |
| 18. Curva de Calibración de Magnesio .....                                   | 60     |
| 19. Curva de Calibración de Cobre.....                                       | 60     |
| 20. Curva de Calibración de Hierro .....                                     | 60     |
| 21. Curva de Calibración de Manganeso .....                                  | 60     |
| 22. Curva de Calibración de Plomo .....                                      | 61     |
| 23. Curva de Calibración de Potasio.....                                     | 61     |
| 24. Curva de Calibración de Zinc.....  | 61     |
| 25. Comparación de las concentraciones de cadmio del 1° y 2° muestreo .....  | 69     |
| 26. Comparación de las concentraciones de cobre del 1° y 2° muestreo .....   | 70     |
| 27. Comparación de las concentraciones de cromo del 1° y 2° muestreo .....   | 70     |
| 28. Comparación de las concentraciones de hierro del 1° y 2° muestreo .....  | 71     |
| 29. Comparación de las concentraciones de magnesio del 1° y 2° muestreo ..   | 72     |
| 30. Comparación de las concentraciones de manganeso del 1° y 2° muestreo     | 72     |
| 31. Comparación de las concentraciones de plomo del 1° y 2° muestreo .....   | 73     |
| 32. Comparación de las concentraciones de potasio del 1° y 2° muestreo ..... | 74     |
| 33. Comparación de las concentraciones de zinc del 1° y 2° muestreo .....    | 74     |
| 34. Plano factorial para la muestra del punto 1.1.....                       | 82     |
| 35. Plano factorial para la muestra del punto 2.1 .....                      | 83     |
| 36. Plano factorial para la muestra del punto 7.5.....                       | 83     |
| 37. Plano factorial para la muestra del punto 8.1.....                       | 84     |
| 38. Micrografía del punto 1.1 asociaciones de cobre y óxidos de hierro.....  | 86     |
| 39. Micrografía del punto 1.1 asociaciones de hierro con cloro .....         | 87     |
| 40. Micrografía del punto 2.1 asociaciones de hierro con zinc .....          | 88     |
| 41. Micrografía del punto 2.1 asociaciones de oxido de zinc.....             | 88     |

|  |     |
|--|-----|
| 42. Micrografía del punto 7.5 asociaciones de óxidos de hierro .....                               | 90  |
| 43. Micrografía del punto 7.5 asociaciones de óxidos de hierro .....                               | 90  |
| 44. Micrografía del punto 8.1 asociaciones de óxidos de plomo.....                                 | 91  |
| 45. Matriz de correlación de los metales.....  | 94  |
| 46. Determinación del número de factores a extraer .....   | 95  |
| 47. Valores de factores del muestreo comprendido julio a septiembre .....                          | 96  |
| 48. Matriz de Correlación de los metales.....  | 97  |
| 49. Determinación del número de factores a extraer .....   | 98  |
| 50. Valores de factores del muestreo comprendido octubre a diciembre .....                         | 99  |
| 51. Dendrograma del análisis por agrupamiento del muestreo<br>comprendido julio a septiembre ..... | 102 |
| 52. Dendrograma del análisis por agrupamiento del muestreo<br>comprendido octubre a diciembre..... | 104 |

## NOMENCLATURA

|                     |   |
|---------------------|---|
| AAS                 | Atomic Absorption Spectroscopy, Espectroscopia de Absorción Atómica   |
| ACP                 | Análisis Estadístico de Componentes Principales   |
| AMM                 | Área Metropolitana de Monterrey   |
| <i>A priori</i>     | Lo que precede  |
| atm                 | Atmósfera   |
| C                   | Carbono   |
| °C                  | Grado centígrado  |
| Ca                  | Calcio  |
| Cd,                 | Cadmio  |
| cm                  | Centímetro  |
| Cr                  | Cromo   |
| CO <sub>2</sub>     | Bióxido de Carbono  |
| COV's               | Compuestos Orgánicos Volátiles  |
| Cu                  | Cobre   |
| d <sub>a</sub>      | Diámetro aerodinámico   |
| DS <sup>2</sup>     | La diferencia de las varianzas  |
| EAA                 | Espectroscopia de Absorción Atómica   |
| EDS                 | Energy Dispersion Spectroscopy, Espectroscopia de Dispersión de Energía   |
| F-AAS               | Flame- Atomic Absorption Spectroscopy, Espectroscopia de Absorción Atómica por flama  |
| Fe                  | Hierro  |
| h                   | Hora  |
| HC                  | Hidrocarburos   |
| HCl                 | Acido Clorhídrico   |
| Hi-Vol              | High Volume, Alto volumen   |
| HNO <sub>3</sub>    | Acido Nítrico   |
| HR                  | Humedad Relativa  |
| ICP-AES             | Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, Espectroscopia de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente. |
| ICP-MS              | Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente.                     |
| inHg                | Pulgadas de mercurio  |
| K                   | Potasio   |
| Kv                  | Kilobyte  |
| m <sup>3</sup>      | Metro cúbico  |
| m <sup>3</sup> /min | Metro cúbico por minuto   |
| Mg                  | Magnesio  |
| mg                  | Miligramo   |

|                   |  |
|-------------------|--|
| MHz               | Mega hertz   |
| mL                | Mililitro  |
| mm                | milimetro  |
| Mn                | Manganeso  |
| N <sub>2</sub>    | Nitrógeno  |
| Ni                | Níquel   |
| NL                | Nuevo León   |
| nm                | Nanómetro  |
| NO <sub>2</sub>   | Dióxido de Nitrógeno   |
| NOM               | Normas Oficiales Mexicanas   |
| O <sub>3</sub>    | Ozono  |
| OMS               | Organización Mundial de la Salud   |
| Pb                | Plomo  |
| PFA               | Perfluoroalcano alcoxi   |
| PIXE              | Particle Induced x-ray Emission, Emisión de Partículas Inducidas por Rayos X.  |
| PM <sub>2.5</sub> | Partículas menores a 2.5 micras  |
| PM <sub>10</sub>  | Partículas menores a 10 micras   |
| ppm               | Partes por millón  |
| PST               | Partículas Suspendidas Totales   |
| <i>Psi</i>        | Pounds per Square Inch. Equivale a 1 <u>libra</u> por <u>pulgada</u> cuadrada.   |
| S                 | Azufre   |
| SEMARNAT          | Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales   |
| SEM-EDX           | Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Detection (EDX). Microscopía Electrónica de Barrido con Detección de Energía Dispersiva de Rayos X. |
| SIMA              | Sistema Integral de Monitoreo Ambiental  |
| SO <sub>2</sub>   | Bióxido de Azufre  |
| Sr                | Estroncio  |
| SW                | Sludge wastes, residuos sólidos  |
| Sy                | Desviación estándar de los residuales  |
| Ti                | Titanio  |
| TV                | valor de la prueba   |
| µg/m <sup>3</sup> | Microgramos por metro cúbico   |
| µm                | Microgramos  |
| USA               | United Status of America, Estados Unidos de América  |
| USEPA             | United States Environmetal Protection Agency, Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos  |
| V                 | Vanadio  |
| WD                | Wind Direction, Dirección Del Viento   |
| WS                | Wind Speed, Velocidad Del Viento   |
| Zn                | Zinc   |



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los problemas más complejos y de mayor impacto ambiental a nivel mundial, está relacionado directamente con la gran densidad de población, elevado número de vehículos y con la presencia de núcleos industriales inmersos en las áreas urbanas <sup>1</sup>.

Un ejemplo típico en nuestro País es la ciudad de Monterrey, que se encuentra localizada geográficamente en una cuenca cerrada por el macizo de montañas que la rodea, la cual dificulta la dispersión de contaminantes, si los vientos no son favorables.

Dentro de los principales componentes del material emitido a la atmósfera en una ciudad con alta actividad industrial como es el AMM, se encuentra el material particulado suspendido, cuyos componentes son muy diversos, tales como, silicatos, sulfatos, carbonatos, metales pesados, asimismo, se encuentran gases como son CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y COV's <sup>2</sup>.

El tamaño y la composición de la materia particulada suspendida son de gran relevancia en una gran variedad de procesos, lo que ha motivado que actualmente se desarrollen a nivel mundial diversas investigaciones con el objeto de proporcionar información sobre su impacto en los ecosistemas.

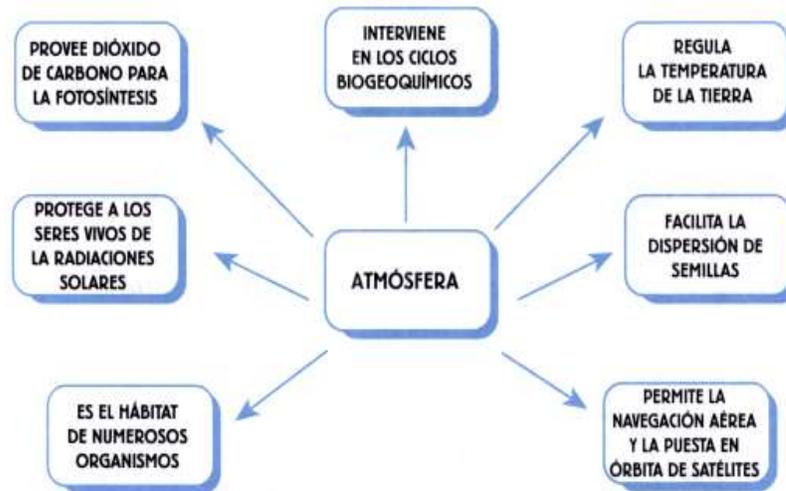
De lo anterior expuesto se desprende la necesidad de emprender un proyecto, cuyo objetivo sea conocer la calidad del aire del AMM tomando como indicador la composición química de las PST y así inferir sobre el posible origen de la contaminación por metales tóxicos.

## **1.1 Fundamento Teórico**

En este apartado se presenta una revisión bibliográfica sobre la contaminación atmosférica, tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos, la normatividad aplicable a cada uno de ellos, la clasificación y efectos del material particulado y finalmente el muestreo y caracterización de las partículas suspendidas.

### **1.1.1 Contaminación Atmosférica**

La Atmósfera es la envoltura gaseosa de unos 200 kilómetros de espesor, que rodea al planeta Tierra, la cual constituye el principal mecanismo de defensa de las distintas formas de vida <sup>3</sup>. En la figura 1 se muestran algunas funciones las cuales realiza la Atmósfera en nuestro planeta.



**Figura 1. Funciones que realiza la Atmósfera**

La contaminación del aire puede definirse como la presencia en la atmósfera de una o más sustancias o sus combinaciones, está presente en las grandes ciudades debido a la intensa actividad industrial y flujo vehicular que se refleja en el elevado consumo de energía. Además de los procesos industriales y vehículos automotores existen condiciones naturales que también aportan parte de la contaminación <sup>4</sup>.

#### 1.1.1.1 Clasificación de los Contaminantes Atmosféricos

La contaminación del aire incluye elementos de origen natural y emisiones resultantes de actividades humanas. Una primera clasificación, atendiendo a cómo se forman, es la que distingue entre contaminantes primarios y contaminantes secundarios <sup>5</sup>.

#### 1.1.1.1.1 Contaminantes Primarios

Sustancias contaminantes que son vertidas directamente a la atmósfera y provienen de muy diversas fuentes dando lugar a la llamada contaminación convencional. Entre los contaminantes atmosféricos más frecuentes que causan alteraciones en la atmósfera se encuentran:

- Aerosoles
- Óxidos de azufre
- Monóxido de carbono
- Óxidos de nitrógeno
- Hidrocarburos
- Dióxido de carbono

Además de estas sustancias, en la atmósfera se encuentran una serie de contaminantes que se presentan más raramente, pero que pueden producir efectos negativos sobre determinadas zonas por ser su emisión a la atmósfera muy localizada. Entre otros, se encuentra como más significativos los siguientes:

- Halógenos y sus derivados.
- Arsénico y sus derivados.
- Componentes orgánicos.
- Partículas que contienen compuestos de metales pesados y ligeros, como el plomo, mercurio, cobre, zinc.

#### 1.1.1.1.2 Contaminantes Secundarios

Los contaminantes atmosféricos secundarios no se vierten directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la misma. Un ejemplo de ello es el ozono.

Las principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios son:

- la contaminación fotoquímica;
- la acidificación del medio;
- la disminución del espesor de la capa de ozono.

#### 1.1.1.2 Fuentes de Emisiones a la Atmósfera

Entre las diferentes fuentes de emisiones a la atmósfera podemos distinguir dos grandes tipos: las fuentes fijas (puntuales, de área y naturales) y las móviles. Existen tres tipos de fuentes fijas generadoras de emisiones, las cuales se describen a continuación.

#### 1.1.1.2.1 Fuentes Puntuales

Derivadas de la generación de energía eléctrica y de actividades industriales, como son: la química, textil, alimentaria, maderera, metalúrgica, metálica, manufacturera y procesadora de productos vegetales y animales, entre otras. La composición de las emisiones derivadas de la combustión utilizada para la generación de energía o vapor depende de la calidad de los combustibles y de la eficiencia de los quemadores, mantenimiento del equipo y de la presencia de equipo de control al final del proceso. Los principales contaminantes asociados a la combustión son partículas, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, HC <sup>5</sup>.

#### 1.1.1.2.2 Fuentes de Área

Incluyen la generación de aquellas emisiones inherentes a actividades y procesos, tales como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, recubrimiento de superficies arquitectónicas, industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas LP, principalmente. Esta fuente también incluye las emisiones derivadas de actividades como son: el tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo, rellenos sanitarios, entre otros <sup>5</sup>.

#### 1.1.1.2.3 Fuentes Naturales

Se refiere a la generación de emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales. En particular a todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos se les denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono. Las emisiones biogénicas incluyen óxido de nitrógeno, hidrocarburos no metanogénicos, metano, dióxido y monóxido de carbono y compuestos nitrogenados y azufrados <sup>5</sup>.

#### 1.1.1.2.4 Fuentes Móviles

Ejemplos de fuentes móviles son los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares, que por su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Si bien, la definición de fuente móvil incluye prácticamente a todos los vehículos automotores, la norma para fuentes móviles se refiere básicamente a las emisiones de automóviles y camiones <sup>5</sup>.

### 1.1.2 Principales Contaminantes de Aire y su Normatividad

Entre los principales contaminantes en el aire y que se encuentran normados en México, son: Óxidos de nitrógeno, Óxidos de azufre, Monóxido de carbono, Partículas Suspendidas Totales, Partículas menores a 10 micras, Partículas menores a 2,5 micras y el Ozono.

Las normas de calidad del aire fijan límites máximos permisibles de concentración de contaminantes, con el propósito de proteger la salud de la población en general y de los grupos de mayor susceptibilidad, los cuales incluyen un margen adecuado de seguridad. Las normas vigentes de calidad del aire fueron publicadas por la Secretaría de Salud en el *Diario Oficial de la Federación* en diciembre de 1994.

En la tabla 1 se muestra la relación de contaminantes criterio, sus respectivos valores de concentración y períodos de tiempo de exposición asociados para la verificación de su cumplimiento<sup>6-11</sup>.

**TABLA 1**  
**NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE LA CALIDAD DEL AIRE**

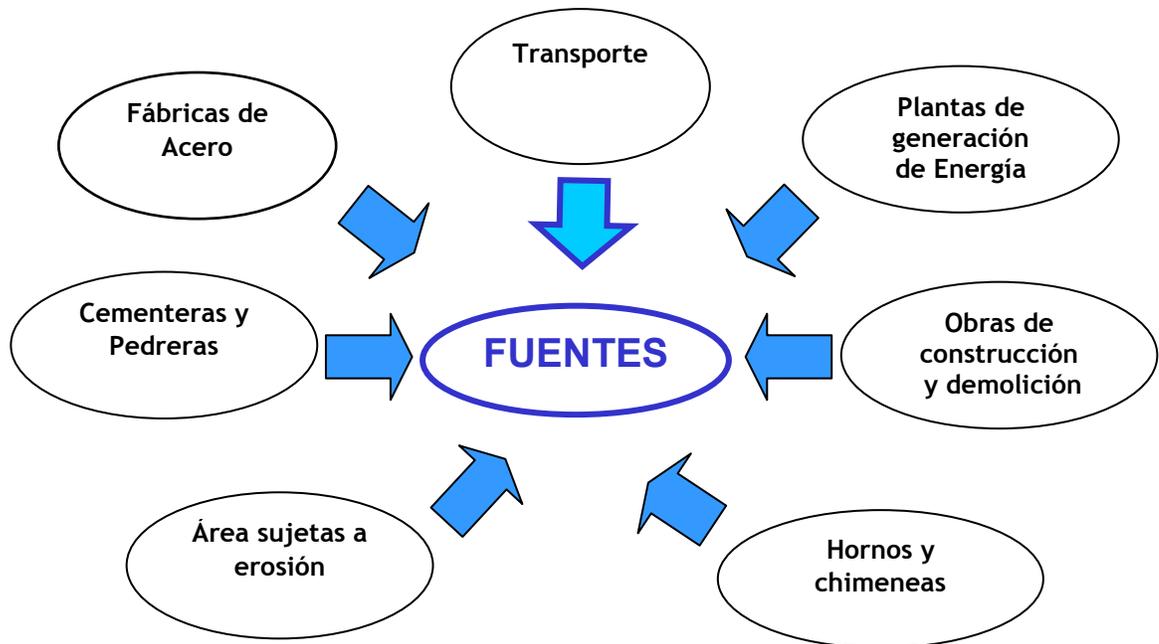
| Contaminante  | Norma Oficial Mexicana | Valores Límite                        |  |
|---|------------------------|---------------------------------------|--|
|   |                        | Exposición Aguda                      | Exposición Crónica   |
|   |                        | Concentración y tiempo promedio       | ( para protección de la salud de la población susceptible) |
| Monóxido de Carbono (CO)                            | NOM-020-SA1-1993       | 11 ppm,<br>(8 Horas)                  | ND   |
| Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )                | NOM-021-SSA1-1993      | 0.13 ppm,<br>(24 Horas)               | 0.03 ppm<br>(media aritmética anual)                       |
| Ozono (O <sub>3</sub> )                             | NOM-022-SSA1-1993      | 0.11 ppm,<br>(1 Hora)                 | ND   |
| Bióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )             | NOM-023-SSA1-1993      | 0.21 ppm,<br>(1 Hora)                 | ND   |
| Partículas Suspendidas Totales (PST)                | NOM-025-SSA1-1993      | 210 µg/m <sup>3</sup> , (24 Horas)    | 75 µg/m <sup>3</sup> ( media aritmética anual )            |
| Partículas fracción respirable (PM <sub>10</sub> )  | NOM-025-SSA1-1993      | 120 µg/m <sup>3</sup> ,<br>(24 Horas) | 50 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)              |
| Partículas fracción respirable (PM <sub>2.5</sub> ) | NOM-025-SSA1-1993      | 65 µg/m <sup>3</sup> ,<br>(24 Horas)  | 15 µg/m <sup>3</sup> promedio anual                        |
| Plomo (Pb)  | NOM-026-SSA1-1993      | ND                                    | 1.5 µg/m <sup>3</sup><br>(promedio aritmético en 3 Meses ) |

ppm: partes por millón, µg: microgramos. Cada una de estas concentraciones equivalen a 100 puntos IMECA (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire). ND: No determinado

### 1.1.3 Material Particulado

La Materia particulada es el término utilizado para una mezcla de sustancias que existen en forma de material sólido o líquido finamente particulado con un amplio intervalo de tamaño (0.005 µm a 100 µm) que se encuentran suspendidas en un medio gaseoso (el aire) <sup>4</sup>.

Donde el tamaño es la característica física más importante para determinar su toxicidad. En la figura 2 se presentan las posibles fuentes de emisión.



**Figura 2. Fuentes de emisión por Material Particulado**

### 1.1.3.1 Clasificación de las Partículas Suspendidas

Las partículas de materia sólida o líquida finamente fragmentadas y cuyo tamaño aerodinámico oscila de hasta 45  $\mu\text{m}$  de diámetro se le conoce como Partículas Suspendidas Totales (PST) <sup>5</sup>.

Las partículas cuyo tamaño va de 0.3 a 10 micrómetros de diámetro y penetran hasta el espacio alveolar del pulmón a las cuales se les conoce con el nombre de "partículas menores de 10 micras o fracción respirable" (PM<sub>10</sub>). Se conocen como las partículas torácicas de las PST.

Las partículas PM<sub>2.5</sub> corresponden a partículas en suspensión que han sido fraccionadas de modo que 50% tienen un tamaño aerodinámico equivalente a < 2.5 µm. Se conocen también como la fracción inhalable de las PST.

En la figura 3 se muestra la composición de las partículas según su distribución de tamaño.

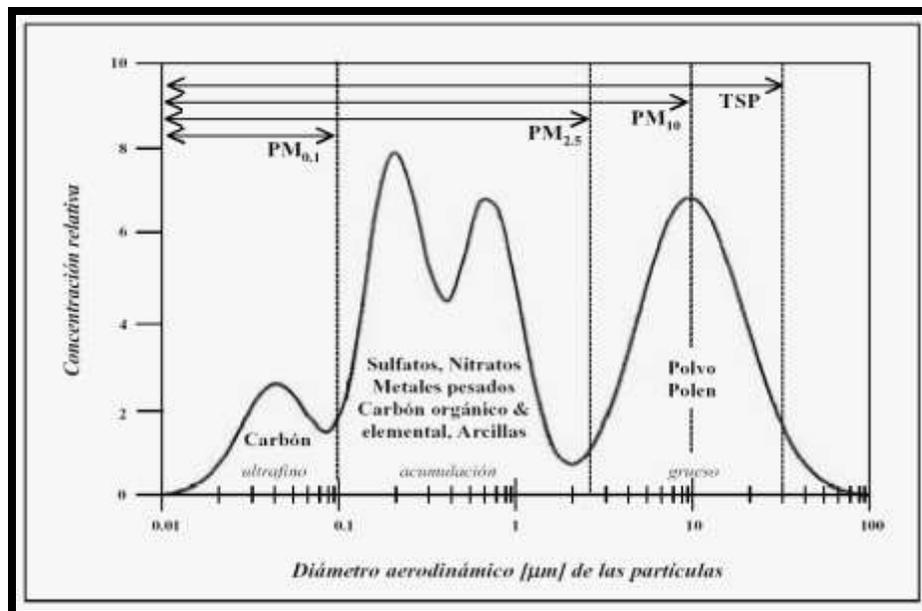


Figura 3. Composición de las Partículas Suspendidas

### 1.1.3.2 Efectos de las Partículas Atmosféricas en la Salud Humana y en el Entorno

Existe una evidencia sustancial que demuestra que la contaminación atmosférica afecta a la salud humana y la de los animales, daña la vegetación y el suelo, produce el deterioro de materiales, afecta al clima, reduce la visibilidad y la radiación solar.

Los daños a la salud humana, dependen de sus propiedades físicas y químicas, de la dosis que se inhala y del tiempo de exposición. Dentro de los contaminantes criterio, el ozono y las partículas son los contaminantes que tienen una mayor importancia debido a sus efectos a la salud, la magnitud de sus concentraciones en el aire y la frecuencia en la que exceden las normas de protección a la salud en el AMM.

#### 1.1.3.2.1 Efectos en la Salud Humana

Es importante enfatizar, que los efectos a la salud y los problemas debidos a la contaminación por partículas, derivan de su composición química y de sus propiedades como: diámetro aerodinámico, área superficial, forma, densidad, propiedades de movimiento y propiedades ópticas<sup>3-5</sup>. Los problemas en vías respiratorias son debido a aquellas partículas con menor tamaño, ya que penetran a los pulmones con mayor facilidad. En especial, las partículas que contienen sílice o metales las cuales suelen ser peligrosas.

Las partículas en forma de polvo, humo y aerosoles pueden tener un efecto en la salud a corto y largo plazo. Estos efectos van desde irritación de ojos y garganta a la reducción de la resistencia a infecciones y pueden dar origen a enfermedades respiratorias crónicas.

En la figura 4 se presenta la ubicación donde se quedan retenidas las partículas según su tamaño. Las partículas que miden más de 10 micrómetros se retienen básicamente en las vías respiratorias superiores. Las que miden menos de 10 micrómetros predominan en la fracción respirable y penetran el espacio alveolar del pulmón.

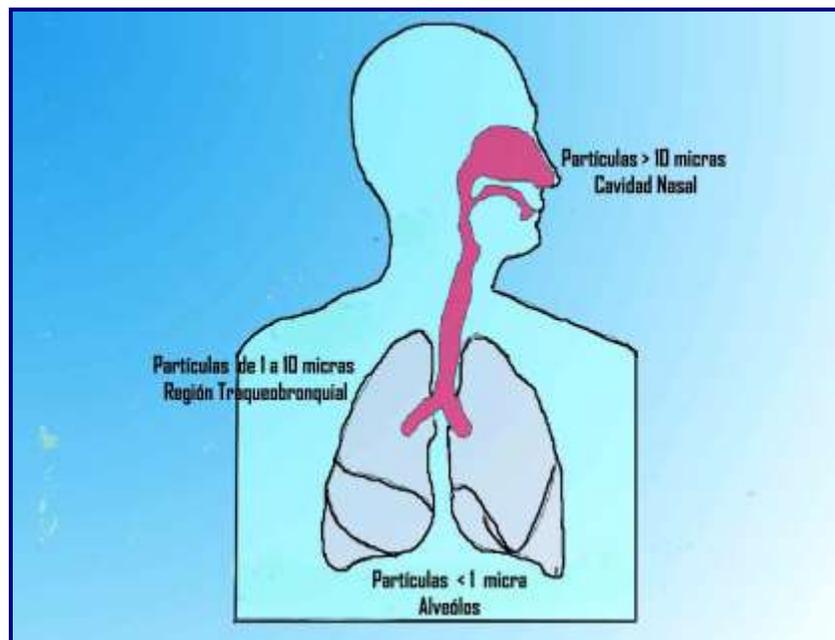


Figura 4. Retención de la Partículas Suspendidas en el tracto Respiratorio

Los grupos de la población con mayor susceptibilidad a los efectos de las partículas incluyen:

- Niños
- Ancianos
- Personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares previas
- Fumadores
- Personas que respiran por la boca

Entre los efectos adversos asociados con exposiciones cortas a partículas en suspensión se encuentra el aumento de ataques de asma, incidencia mayor de enfermedades respiratorias, bronquitis crónica, decremento en las funciones pulmonares y aumento de las tasas de mortalidad <sup>5</sup>.

#### 1.1.3.2.2 Efectos en Animales

Los animales respiran aire contaminado o comen pasto o hierba que han sido afectados por el depósito de residuos de contaminantes atmosféricos. Se ha reportado que el arsénico, que se libera al aire en forma de trióxido de arsénico durante el proceso de fundición de cobre, puede causar la muerte de ovejas, ganado vacuno y caballos. Por otro lado, los contaminantes atmosféricos ocasionan una menor puesta de huevos en gallinas, una producción inferior de leche a las vacas y de lana a las ovejas <sup>5</sup>.

Un efecto similar es el que se obtiene del envenenamiento por molibdeno, que se genera en los procesos de producción de acero, plomo o zinc, provenientes de la fundición de estos dos metales.

#### 1.1.3.2.3 Efectos en la Vegetación

La vegetación se afecta muy rápidamente a causa de la contaminación atmosférica. Al respecto se observa la destrucción de cosechas, la aparición de manchas y decaimiento de matorrales y plantas ornamentales, que puede desencadenar en su destrucción completa <sup>3,5</sup>.

En las plantas, el polvo, que es producido por las fábricas de cemento, puede causar incrustaciones que interfieran con el proceso de la fotosíntesis, debido a que interceptan la luz solar. También se ha observado que las partículas que contienen fluoruros parecen causar daños a las plantas y el óxido de magnesio que cae en los terrenos agrícolas ha dado como resultado un crecimiento no satisfactorio de la planta.

#### 1.1.3.2.4 Efectos en las Condiciones Atmosféricas

Los contaminantes del aire afectan las condiciones atmosféricas provocando reducción de la visibilidad, formación de niebla y precipitación,

disminución de la radiación solar y alteración de la temperatura y de la distribución de vientos <sup>5</sup>.

Además actualmente hay un gran interés en explorar los posibles efectos de los contaminantes del aire, principalmente bióxido de carbono y partículas, sobre el clima global del planeta.

Quizá el efecto más evidente de la contaminación sobre las propiedades de la atmósfera es la reducción de la visibilidad. La absorción de luz de ciertas longitudes de onda por moléculas gaseosas y partículas es algunas veces responsable de las coloraciones de la atmósfera. Sin embargo, la dispersión de luz es el principal fenómeno responsable del deterioro de la visibilidad <sup>12</sup>.

La presencia de humedad junto con las partículas (principalmente las constituidas por sulfatos y nitratos), incrementa el efecto de dispersión de la luz con respecto al efecto provocado por las partículas secas. De esta manera, la reducción de la visibilidad es mayor cuando existe en la atmósfera una humedad relativa considerable. En algunos trabajos se ha encontrado que existe una correlación entre la absorción óptica de las partículas finas y la concentración de carbono orgánico en éstas.

#### 1.1.3.2.5 Efectos en Bienes Materiales

Los efectos sobre los bienes materiales son tanto físicos como resultado de reacciones químicas. Si existe una erosión de la superficie de los materiales por partículas se produce un desgaste de las superficies, provocando oradaciones en ellas e incluso puede llegar a destruirlas. Las partículas de polvo transportadas por las corrientes de aire se depositan en los edificios lo que obliga a tomar acciones de mantenimiento <sup>3</sup>.

El ataque químico en los materiales puede deberse a la presencia de contaminantes gaseosos o partículas. Los factores que influyen en el deterioro de materiales incluyen la concentración del contaminante, las reacciones combinadas de diferentes contaminantes, la presencia de humedad, el efecto de la temperatura, la intensidad de luz solar y el grado de movimiento del aire, incluyendo la velocidad y dirección del viento. El acero, hierro, zinc, latón, cobre, níquel, plomo, estaño y aluminio se corroen más rápidamente en áreas urbano-industriales <sup>5</sup>.

#### 1.1.4 Análisis de Días sobre la Norma Presentes en el Área Metropolitana de Monterrey por Partículas menores a 10 micras

En el Área Metropolitana de Monterrey los principales contaminantes que están presentes y sobrepasan la norma son las partículas menores a diez

micrómetros y el ozono, el clima es un factor que influye en la presencia o dispersión de los contaminantes.

A lo largo del año se distinguen en el AMM dos épocas climáticas: la época de lluvias (junio-octubre), la cual se asocia con la afluencia de aire marítimo tropical con alto contenido de humedad, y la época de secas (noviembre-mayo), asociada con el flujo de aire polar con bajo contenido de humedad <sup>13</sup>.

En la figura 5 se muestran los días que sobrepasan las PM<sub>10</sub> a la Norma Oficial Mexicana como también el porcentaje de días sobre la norma con respecto a la época climática presente en el Área Metropolitana.

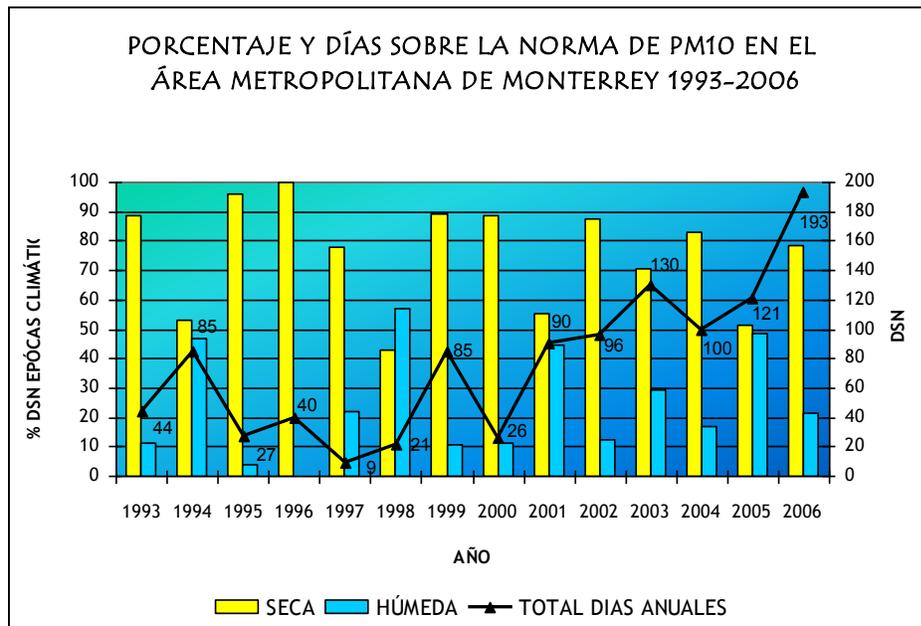


Figura 5. Días sobre la Norma de PM10 en el AMM 1993-2006

En la tabla 2 se presenta los años en donde se encuentra un mayor índice de días que sobrepasan las  $PM_{10}$  en el Área Metropolitana de Monterrey.

**TABLA 2**  
**DÍAS SOBRE LA NORMA POR  $PM_{10}$  EN EL AMM**

| <b>Año</b> | <b>Días sobre la norma</b> |
|------------|----------------------------|
| 1994       | 85                         |
| 1999       | 85                         |
| 2001       | 90                         |
| 2002       | 96                         |
| 2003       | 130                        |
| 2004       | 100                        |
| 2005       | 121                        |
| 2006       | 193                        |

Como se puede observar, los años donde existe un incremento considerable en los días sobre la norma son del 2003 al 2006. De una manera general, con respecto a la época climática, se ve un mayor incremento en temporada seca, ya que existe una mayor resuspensión del material particulado.

## 1.2 Revisión Bibliográfica

En la literatura se puede encontrar una gran variedad de estudios en los que se ha concluido sobre la calidad del aire en diversas zonas urbanas, en donde se observa la importancia que tienen la caracterización química de las partículas en materia suspendida y los efectos que estas provocan, en algunos casos se ha empleado la estadística para su cuantificación. A continuación se describen algunos trabajos con relación al presente estudio.

### 1.2.1 Antecedentes

En la actualidad existe un amplio conocimiento sobre la problemática de la contaminación ambiental, en particular la del aire. Una atmósfera contaminada no solamente repercute sobre la salud de las personas y afecta a la vida de las plantas y de los animales, sino, además, los cambios que se producen en su composición química pueden cambiar el clima, producir lluvia ácida, destruir la capa de ozono en la estratosfera o promover la formación de ozono en la troposfera, todos estos fenómenos poseen una gran importancia a nivel global <sup>1</sup>.

Es un hecho que la urbanización e industrialización del AMM ha originado una modificación del clima local al desarrollarse el efecto de la "Isla Urbana de Calor" <sup>14</sup>. La intensidad y escala de este efecto se incrementa por la deforestación, por la emisión de gases invernadero y de precursores del smog fotoquímico provenientes de las actividades industriales y por el transporte <sup>15</sup>.

Por lo tanto, es de especial interés conocer los niveles de agentes contaminantes en la atmósfera en las grandes zonas urbanas y elucidar los procesos de formación de contaminantes secundarios, para de esta forma desarrollar e implementar tecnologías en procesos industriales que eviten en la medida de lo posible la emisión de sustancias tóxicas que afecten la vida del ser humano y en general de toda la biosfera <sup>16</sup>.

Adicionalmente se ha planteado la hipótesis que algunos metales, cuando están adsorbidos a la materia particulada suspendida del orden de algunos nanómetros, contribuyen como catalizadores de reacciones fotoquímicas en la formación de el smog fotoquímico, que como ya se mencionó es uno de los contaminantes mas peligrosos en la atmósfera a nivel superficial <sup>17, 19</sup>.

En este sentido, el crecimiento del AMM se ha desarrollado en base a una carente o ineficiente administración de la planificación urbana y a una arquitectura aridizante, dando lugar a la desertificación urbana, que causa la eliminación o reducción de la cubierta vegetal, la degradación y contaminación del medio ambiente.

La evaluación de la calidad del aire en México tiene sus inicios en la Zona Metropolitana del Valle de México en 1986, posteriormente, empieza a distribuirse la redes de monitoreo a otras ciudades donde existe un nivel importante de contaminación, el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental del

Área Metropolitana de Monterrey inicia sus operaciones en 1992, con 5 estaciones de monitoreo estratégicamente instaladas.

Desde entonces se lleva un registro a cada hora de las concentraciones de CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> presentes en la atmósfera de esta zona urbana. Además se registran algunos parámetros meteorológicos, como son la precipitación pluvial, la humedad relativa, temperatura, radiación solar y presión atmosférica<sup>18</sup>. De acuerdo a los reportes emitidos por el SIMA, de todos los contaminantes monitoreados, las PM<sub>10</sub> son de los que con más frecuencia rebasan las Normas Oficiales Mexicanas.

Además del control del material particulado es necesaria su caracterización química, ya que agentes tóxicos, como metales pesados, pueden adsorberse a ellas y participar como catalizadores generando radicales libres<sup>20</sup>. De esta forma, la exposición representa una vía de incorporación de metales tóxicos al torrente sanguíneo de los seres vivos.

Por otra parte, los niveles de contaminación del aire no tan extremos también se han asociado con mortalidad prematura. Un análisis estadístico de datos procedentes de Estados Unidos ha mostrado una asociación entre la mortalidad y un amplio rango de concentraciones de contaminantes, sin que exista evidencia de un umbral<sup>20</sup>.

En un estudio realizado por investigadores de la UANL en colaboración con el ININ se caracterizaron las partículas sólidas de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  obtenidas en la estación de monitoreo de San Bernabé del SIMA, el muestreo se realizó durante días laborables entre el 9 de Diciembre de 1996 y el 14 de enero de 1997. En este estudio se encontró que los elementos analizados en las dos fracciones presentaban el mismo patrón de contaminación atmosférica de zonas industriales o ciudades densamente pobladas como Xalostoc y la ciudad de México <sup>21</sup>.

La caracterización química del material particulado del AMM ha sido objeto de pocos estudios. Montoya en 1999 realizó un análisis de la materia suspendida en la Zona Noroeste de la Ciudad de Monterrey el cual proporcionó información de metales encontrados como Ca, K, Fe, Zn, S, Ni, Cu, Pb, V, Mn, Ti y Sr en partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  utilizando la técnica PIXE, para la evaluación estadística de la matriz de datos utilizo análisis de factores <sup>22</sup>.

En el año 2002 se realizó un estudio de metales en material particulado en 2 complejos industriales de la ciudad de Taejon, Corea. Las muestras fueron tomadas en el periodo comprendido de los años 1997 al 1999. La concentración de los metales fue analizada con respecto a la geoquímica del área urbanizada y se utilizo para ello ICP-AES y ICP-MS.

Se analizaron los datos obtenidos mediante la aplicación de análisis de correlación, además se tomaron en cuenta las variables meteorológicas de cada período de muestreo <sup>23</sup>.

Zabalza y Col., en 2004, realizaron un proyecto en Alsasua, España, estudiaron la contribución de fuentes, niveles y composición en PM<sub>10</sub>, el muestreo fue durante el año 2002 al 2003, para analizar las características morfológicas y estructurales del material particulado utilizaron (SEM-EDX) y las concentraciones de metales presentes utilizando ICP-AES e ICP-MS. Mediante la aplicación de un análisis estadístico de componentes principales se detectó y cuantificó la contribución de 4 factores o fuentes principales <sup>24</sup>.

En el año 2004 se efectuó un trabajo de investigación donde se midieron metales enlazados a Partículas Suspendidas Totales en 7 diferentes puntos urbanizados en Seúl, Corea en el período comprendido de marzo 2001 a mayo 2002, las concentraciones de los metales Cd, Cr, Pb, Mn, Cu, Fe se obtuvieron a partir del análisis por AAS, las mediciones de los datos fueron analizados y se obtuvieron factores espaciales como control de mecanismos de las características de distribución para cada metal <sup>25</sup>.

Por otro lado, en el año 2004 se efectuó un análisis de concentraciones de carbón elemental y carbón orgánico en material particulado, el muestreo se efectuó en 4 locaciones del World Trade Center, el período fue de septiembre

del 2001 a enero del 2002, se utilizó un analizador elemental para obtener las concentraciones de carbón presentes en el material particulado. Las concentraciones reportadas fueron de 1.5 a 6.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para carbón elemental, de 10.2 a 31.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para carbón orgánico y de 22.6 a 66.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{2.5}$ <sup>26</sup>.

En el 2004 se hizo un estudio sobre las características fisicoquímicas de material particulado en dos puntos de París, se estudiaron simultáneamente dos tamaños las  $\text{PM}_{2.5}$  y PST, se realizó un análisis de las concentraciones mediante una digestión ácida y posterior medición por un ICP-AES, para la caracterización morfológica utilizaron un SEM-EDX<sup>27</sup>.

En el año 2005 en el Reino Unido específicamente en el camino Marelyebone, Harrison y Col., monitorearon materia particulada que comprendían desde  $\text{PM}_{2.5-10}$ , en este estudio se realizó un análisis de factores que permitió conocer las altas concentraciones encontradas en ese lugar, los resultados arrojados determinaban que las fuentes de tal suceso eran el tráfico pesado que consumía diesel, como también emisiones de polvo suspendido provenientes de procesos de abrasión, todo este estudio se ayudó con parámetros como: velocidad del viento, dirección del aire y densidad del tráfico etc.<sup>28</sup>.

En el año 2006 en los Ángeles California se realizó un estudio de la concentración, distribución de tamaño y proporción de la deposición seca de metales asociados a material particulado, las muestras fueron tomadas durante

las cuatro estaciones del año en 6 sitios urbanos desde agosto del 2002 a junio del 2003. Los metales se analizaron por medio de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). Y realizaron un tratamiento estadístico donde presentan los resultados de los diferentes metales con respecto a la estación del año analizada, se muestra el efecto de la resuspensión y deposición del polvo por el movimiento de vehículos y el viento debido a los resultados obtenidos <sup>29</sup>.

En el 2006 Djordjevic y Col., realizaron un monitoreo en el periodo comprendido de los años 1995 al 2000 en puntos localizados en las costas de Montenegro, el muestreo fue de 24 horas por muestreadores de Alto Volumen utilizando filtros de fibra de vidrio, la especiación de metales traza la realizaron mediante F-AAS. Utilizaron estadística de variables múltiples para la caracterización del origen de la contaminación <sup>30</sup>.

Por lo anterior expuesto, en esta propuesta de tesis plantea una investigación que contribuya al conocimiento del comportamiento y distribución de contaminantes en la atmósfera del AMM. Para ello se propone, no solamente los análisis realizados en las estaciones de monitoreo del SIMA, sino además la caracterización y cuantificación de los contaminantes inorgánicos adsorbidos en el material particulado, que como ya se mencionó, juega un papel determinante en la incorporación de contaminantes en los seres vivos y en los mecanismos de formación de smog fotoquímico.

## **1.3 Hipótesis y Objetivos**

### **1.3.1 Hipótesis**

La aplicación de la estadística de variables múltiples proporciona información fehaciente sobre el origen de la contaminación del aire por material particulado en la Atmósfera del Área Metropolitana de Monterrey.

### **1.3.2 Objetivos**

#### **1.3.2.1 Objetivo General**

Emitir juicios sobre el origen del material particulado en la atmósfera del Área Metropolitana de Monterrey mediante su caracterización química y aplicación de herramientas quimiométricas, específicamente el análisis de factores y análisis por agrupamiento.

#### **1.3.2.2 Objetivos Particulares**

- Realizar un muestreo en puntos impactados por material particulado y en cuatro estaciones del SIMA durante los períodos de (julio a diciembre del 2006).

- Determinar los niveles de concentración de los metales Pb, Cu, Cd, Zn, K, Mn, Mg, Ni, Fe y Cr, mediante la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica por Flama, previa digestión por microondas y asegurar la calidad de los datos analíticos obtenidos, utilizando materiales de referencia certificados.
- Determinar el contenido de carbono y azufre en las muestras del material particulado mediante el analizador elemental.
- Caracterizar la composición mineralógica y estructural de las partículas suspendidas mediante Microscopia Electrónica de Barrido con Dispersión de Rayos X.
- Evaluar los datos mediante el uso de la estadística de variables múltiples y predecir su posible origen de contaminación en cada uno de los puntos de muestreo.

## **CAPÍTULO 2**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

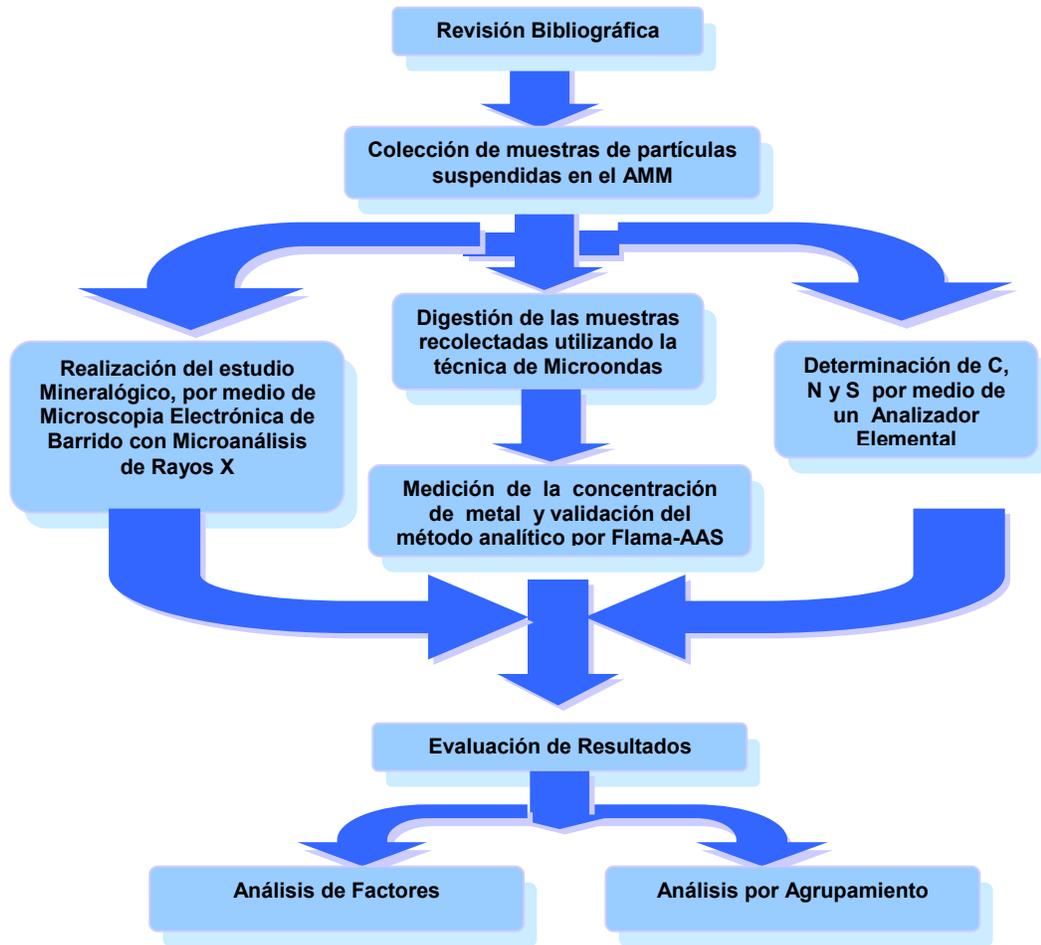
En este estudio se ha aplicado la herramienta quimiométrica, para la determinación de estructuras de contaminación en material particulado. En el capítulo se presenta la metodología del procedimiento seguido para la realización de este trabajo de tesis, los puntos, período de muestreo y la técnica utilizada para recolectar PST, son mostradas en la secciones 2.1, 2.2, 2.3 para determinar la concentración de estas partículas en el aire junto con su método de medición se presenta en las secciones 2.4 y 2.5.1, posteriormente en la sección 2.5.2 se muestra un análisis elemental realizado a los filtros muestreados, como también un análisis mineralógico y morfológico en demostrados en la sección 2.5.3, para la integración de los datos y determinación de las posibles fuentes de emisión de PST se uso el análisis multivariado presentado en el apartado 2.6.

## 2.1 Metodología del Proyecto

La evaluación de la calidad del aire en una cuenca atmosférica puede realizarse en principio siguiendo dos metodologías, una de ellas es monitorear periódicamente determinados parámetros en donde se refleje el número de violaciones a la normatividad. Otra, es con el objetivo de conocer la distribución de los contaminantes por zonas y por períodos importantes para aplicar modelos matemáticos que describan su comportamiento en el espacio y tiempo <sup>31</sup>.

Los datos del aire ambiental se utilizan para diagnosticar las condiciones de un área antes de construir una nueva fuente de contaminación, para desarrollar modelos de dispersión, realizar estudios científicos y para evaluar la exposición humana a contaminantes, así como también daño al ambiente.

En la figura 6 se presenta el esquema general de la metodología del proyecto que se llevo acabo en este estudio.



**Figura 6. Esquema de la metodología del Proyecto**

En este estudio se hizo uso de los datos recolectados en las estaciones de monitoreo del SIMA y por otra parte se generó una base de datos a través de los análisis de contaminantes adsorbidos en las fracciones de partícula de materia suspendida. Donde se contempló la determinación de metales pesados.

## **2.2 Recolección de Partículas Suspendidas Totales**

Los componentes de un sistema de monitoreo de la contaminación del aire incluyen la recolección de muestras de aire ambiental y el muestreo de emisiones de fuentes específicas; el análisis o medición de la concentración de los contaminantes; y la comunicación y uso de la información recopilada.

### **2.2.1 Zonas de Muestreo**

Las actividades de muestreo se llevaron a cabo durante el período de julio a diciembre del 2006, donde se instalaron muestreadores Hi-Vol para PST en cuatro estaciones del SIMA, como se muestra en la Figura 2. 1, y en algunos puntos específicos donde la Agencia de Protección al Medio Ambiente tuvo una mayor demanda en incidentes contaminantes, el tiempo de muestreo elegido comprendió, tanto periodos de alta radiación solar (julio – agosto), como de altas precipitaciones pluviales (septiembre – noviembre).

Figura 7 se muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo de las estaciones fijas en el Área Metropolitana de Monterrey del SIMA.



**Figura 7. Estaciones de monitoreo del SIMA**

### 2.2.2 Ubicación de las Estaciones de Monitoreo

A continuación se presentan las características de los sitios dónde están ubicadas cada una de las estaciones fijas con las que cuenta el SIMA en el área metropolitana, que fueron utilizadas para este estudio <sup>32</sup>.

#### *Estación centro*

Ubicada en los patios de Agua y Drenaje de Monterrey en el área del Obispado, Esta estación fue ubicada para monitorear la contaminación de fuentes vehiculares e industriales en el centro del AMM para medir impactos del tráfico y la mezcla de los contaminantes de la mayoría de las fuentes industriales.

### *Estación noreste*

Ubicada en la colonia Unidad Laboral en San Nicolás de los Garza, N.L. Esta estación está localizada a favor del viento de un corredor industrial en un área altamente poblada. Dicha estación sirve para determinar los impactos de las fuentes fijas en la parte Norte del área Metropolitana de Monterrey.

### *Estación noroeste*

Ubicada en los talleres de Metrorrey en la Colonia San Bernabé, Monterrey, N.L. Esta estación está localizada a favor del viento de salida hacia el Oeste de la mayoría de las fuentes industriales y del tráfico del área Metropolitana de Monterrey en un área de alta concentración de población.

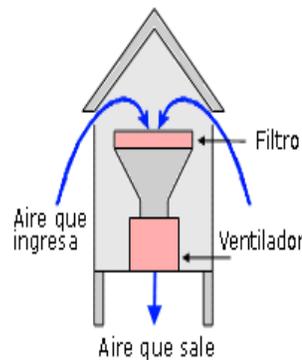
### *Estación suroeste*

Ubicada en el centro de Santa Catarina, N.L. Esta estación está localizada a favor del viento de la mayoría de las fuentes industriales en Monterrey, San Pedro Garza García y Santa Catarina.

## 2.3 Muestreador de Partículas Suspendidas Totales

El Método de referencia para la determinación de materia particulada en la atmósfera es la Norma Oficial Mexicana 035-SEMARNAT-1993, la cual establece los métodos de medición para determinar la concentración PST en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de equipos de medición. Los equipos más utilizados para realizar el muestreo son los muestreadores de alto volumen conocidos como Hi-Vol <sup>33</sup>.

En la figura 8 se presenta un muestreador que se usa como un método manual para medir PST y Pb en el aire.



**Figura 8. Funcionamiento del Muestreador de Alto Volumen**

La bomba en el muestreador crea un vacío que lleva el aire a una caseta cubierta. El aire pasa a través de un filtro que atrapa el material particulado. Para determinar la cantidad de material particulado en la muestra, se utiliza un proceso gravimétrico. La diferencia de peso es la cantidad de material particulado atrapado en el filtro en cierto volumen de aire <sup>34</sup>.

Típicamente los Hi-Vol operan a velocidades de flujo de 1.1 a 1.7 m<sup>3</sup>/min y hacen un muestreo por períodos de 24 horas. La mayoría de los muestreadores operan con filtros estándares de 8 x 10 pulgadas <sup>14</sup>. Los filtros más comunes son los de fibra de vidrio, los cuales deben tener una eficiencia de recolección mínima del 99% para partículas de 0.3  $\mu\text{m}$  <sup>35</sup>.

### 2.3.1 Equipo de Medición de PST y Materiales

Para este método se usó un muestreador de alto volumen calibrado, el cual se muestra en la figura 9.



**Figura 9. Muestreador Hi-Vol**

En la tabla 3 se muestran las condiciones y características de los filtros que fueron utilizados para el proyecto, donde se dejaron impactar por 24 horas, y se tomaron 3 muestras de PST en cada punto de muestreo, a lo largo de una semana de actividad normal.

**TABLA 3**  
**CONDICIONES DE TRABAJO HI-VOL Y CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO**

| <b>Condiciones de trabajo del Hi-Vol</b> |                           | <b>Características del Filtro</b> |                 |
|--|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| <b>Marca</b>                             | Wedding & Associates, Inc | <b>Marca</b>                      | Grase by MW     |
| <b>Presión</b>                           | 1.1 inHg                  | <b>Tipo Filtro</b>                | Fibra de Vidrio |
| <b>Flujo Aire</b>                        | 1.5 m <sup>3</sup> /min   |                                   |                 |
| <b>Volumen</b>                           | 2200 m <sup>3</sup>       | <b>Dimensiones</b>                | 20.3 x 25.4 cm  |
| <b>Tiempo de muestreo</b>                | 24 h                      |                                   |                 |

Para el estudio gravimétrico se utilizó una balanza analítica la cual tenía una sensibilidad de 0.001 mg. Se mantuvo en condiciones ambientales (25°C y 1 atm) controladas al filtro durante 24 horas.

## 2.4 Digestión por Microondas

Las microondas son energía electromagnética, su rango de frecuencia es de 300 a 300000 MHz. La energía de microondas es radiación no ionizante que provoca movimiento molecular por migración de iones y rotación de dipolos, sin causar cambios en la estructura molecular.

Cabe señalar que solo las moléculas polares son activas a las microondas, la energía hace que giren tanto las moléculas en el centro de la muestra como las que se encuentran en la superficie y esta propiedad hace posible que un horno de microondas caliente con rapidez toda la muestra. El calor que producen las moléculas en el centro al girar, calienta rápidamente toda la muestra.

El aparato está equipado con un diseminador, el cual se encarga de disipar la energía de microondas no absorbida en forma de calor. Además posee un disco giratorio o carrusel donde se colocan los recipientes de las muestras <sup>36</sup>.

Para el proceso de digestión de las muestras se utilizó un equipo de microondas marca CEM Modelo MSP 1000, el cual se muestra en la figura 10.



**Figura 10. Equipo Microondas**

Esta tecnología presenta varias ventajas sobre la digestión a vaso abierto las cuales son mencionadas a continuación:

- Se utiliza menos cantidad de muestra y se emplea menos cantidad de disolvente.
- Se invierte menos tiempo.
- Las pérdidas por volatilización de especie son menores o nulas.

El calentamiento de la muestra es homogéneo. La digestión se realiza a vaso cerrado, uno de los parámetros a controlar es la presión, para ello, el equipo cuenta con un sensor de presión y un sistema de seguridad, este último en caso de fuga de vapores, provoca que se aborte automáticamente y se detiene el proceso. Los vasos son de teflón, de un material inerte al ataque químico de ácidos y solventes orgánicos y resiste la presión aplicada. Los vasos de perfluoroalcano alcoxi (PFA) que es un material transparente a la radiación de microondas, por esto la energía es solo absorbida por la muestra.

#### 2.4.1 Preparación de la Muestra

La digestión de las Partículas Suspendidas Totales, depositadas en los filtros, se realizó de acuerdo al Método SW 3051- USEPA, el cual es recomendado para la digestión ácida de desechos sólidos.

## Procedimiento para la digestión de las muestras del material particulado

### *Limpieza de los Vasos de Teflón*

- Se selecciona los vasos de teflón, se lavan con detergente Extran y enjuagan con agua nanopura.
- Se colocan los vasos limpios en un vaso precipitado de 4L con agua nanopura, se añade unos 10 mL de  $\text{HNO}_3$  concentrado y se calienta en una plancha a una temperatura de 40 a 50°C.
- Después se colocan los vasos de teflón en un baño de ultrasonido y se calienta por una hora. Se enjuagan los vasos de teflón con agua nanopura y por ultimo se secan en un cuarto libre de partículas.

Una vez secos se comienza con el proceso de digestión. Se selecciona y programa el método, el cual consiste en hacer la muestra lo más soluble posible.

- Se colocó la mitad del filtro impactado con PST en el vaso de teflón y se añadieron 24 mL de la mezcla 3:1  $\text{HNO}_3$ : HCl.
- Se colocaron las membranas, taparon y sellaron los vasos.
- Se conectó al vaso controlador y se colocaron en la tornamesa.
- Se introdujo en el equipo microondas y se corrió el programa de digestión.

La digestión se llevó a cabo en tres etapas manteniendo la temperatura constante. En la tabla 4 se muestran las condiciones del programa utilizado en el equipo Microondas.

**TABLA 4**  
**DIGESTIÓN POR MICROONDAS**

| <b>Condiciones de trabajo del Equipo Microondas</b> |                |                |                |
|---|----------------|----------------|----------------|
| <b>Condiciones</b>                                  | <b>Etapa 1</b> | <b>Etapa 2</b> | <b>Etapa 3</b> |
| Potencia (W)  | 60             | 60             | 60             |
| Presión (PSI)                                       | 50             | 100            | 120            |
| Tiempo (min)  | 10             | 15             | 15             |
| TAP (min)   | 5              | 10             | 10             |

\*TAP: Tiempo al que se alcanza la presión establecida y se queda constante.

Este programa de digestión puede repetirse, si al terminar la tercera etapa, la apariencia del material digerido no es la esperada, es decir, cuando se observa en los restos del filtro tratado material no digerido.

Al terminar la digestión,

- Se esperó a que la presión del equipo se igualará a la atmosférica, se sacó la tornamesa del horno de microondas y se trasladó a una campana de extracción.
- Se desconectaron los vasos y se filtró la disolución resultante de las muestras de PST. Utilizando un embudo de filtración rápida y papel filtro Whatman # 41.
- Por último se aforó con agua nanopura hasta completar 25 mL, se almacenaron los filtrados en frascos de plástico de 30mL.

A este líquido final se le determinó el metal de interés por Absorción Atómica.

## 2.5 Técnicas de Caracterización

### 2.5.1 Análisis de Metales por Espectroscopia de Absorción Atómica

La Absorción Atómica se basa en la absorción de radiación electromagnética por parte de los átomos; generada en una lámpara de cátodo hueco, esta absorción se produce de forma selectiva para cada elemento a unas determinadas longitudes de onda. Se emplea en la determinación cuantitativa de metales en disolución.

El intervalo de longitudes de onda apto para trabajar en Absorción Atómica se presenta en la zona del ultravioleta-visible. Por debajo de 190 nm, zona del ultravioleta de vacío, absorben los elementos no metálicos, por lo que estos metales no pueden determinarse mediante esta técnica tradicional <sup>37</sup>.

Los átomos emplean la energía recibida en excitar los electrones de las capas externas a niveles energéticos superiores, pasando a un estado excitado. La absorción selectiva a las diversas longitudes de onda origina el espectro de absorción característico de cada elemento.

Entra las ventajas que tiene esta técnica son su especificidad, rapidez, así como excelente sensibilidad. Los límites de detección están en el rango de partes por millón (ppm). La técnica de AAS constituye un medio sensible para la determinación cuantitativa de más de 60 elementos <sup>38</sup>.

### 2.5.1.1 Operación del Equipo de Absorción Atómica

En la figura 11 se muestra el equipo utilizado de Absorción Atómica y posteriormente se presenta el procedimiento que se uso para operar el equipo.



**Figura 11. Espectrómetro de Absorción Atómica**

#### *Procedimiento:*

- Se abren los cilindros contenedores de los gases que son utilizados para formar la flama aire-acetileno, se abren los medidores de presión para Aire son 55 psi y Acetileno 9 psi y posteriormente se ajustan.
- Se introduce la lámpara de cátodo hueco correspondiente al metal a determinar. Se enciende el equipo de absorción atómica. Y se establece el método para el metal a determinar.
- Se alinea el haz de luz, además se coloca el quemador para una llama de aire-acetileno, se optimizan las lámparas de cátodo hueco y de deuterio.
- Se enciende la flama de aire-acetileno y se realizan las lecturas de la absorbancia de los estándares de metales, para obtener las gráficas de calibración.

Las condiciones a las cuales se operó el Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) marca GBC Modelo 932 AA, se muestra en la tabla 5.

**TABLA 5**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE METALES POR EAA**

| <b>Metal</b> | <b>Longitud de onda (nm)</b> | <b>Rango de Trabajo Óptimo (mg/L)</b> | <b>Tipo de Flama</b>     |
|--------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Plomo        | 217                          | 2.5 – 20                              | Aire-Acetileno Oxidante  |
| Cadmio       | 228.8                        | 0.2 – 1.8                             | Aire-Acetileno Oxidante  |
| Cromo        | 357.9                        | 2 -15                                 | Aire-Acetileno reductora |
| Zinc         | 213.9                        | 0.4 – 1.5                             | Aire-Acetileno Oxidante  |
| Magnesio     | 285.2                        | 8-20                                  | Aire-Acetileno Oxidante  |
| Hierro       | 248.3                        | 30-150                                | Aire-Acetileno Oxidante  |
| Manganeso    | 279.5                        | 1- 3.6                                | Aire-Acetileno Oxidante  |
| Cobre        | 324.7                        | 1-5                                   | Aire-Acetileno Oxidante  |
| Potasio      | 404.4                        | 140-600                               | Aire-Acetileno Oxidante  |

#### 2.5.1.2 Preparación de los Estándares

Mediante un estándar certificado de 1000ppm de los siguientes metales: Cu, Fe, K, Mg, Mn, Zn, Cd, y Pb, se prepararon las diluciones correspondientes, para realizar su curva de calibración, según el intervalo de trabajo.

*Procedimiento:*

Se calcularon y midieron, el volumen y la masa del estándar requerido de cada uno de los estándares ya antes mencionados, a partir de una disolución de 100ppm y posteriormente se aforó a un volumen de 100ml.

Los estándares se prepararon por pesada, para disminuir el error de preparación, posteriormente, se determinó la concentración de los mismos utilizando los datos de densidad correspondiente.

### 2.5.2 Análisis Elemental

El análisis elemental es utilizado principalmente en la investigación del ambiente para averiguar el contenido orgánico en muestras de suelos, plantas y material filtrado del agua o del aire. La técnica de análisis se basa en la combustión de las muestras que contienen C, N y S para convertir los elementos antes mencionados en gases simples ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , y  $\text{SO}_2$ ) y posteriormente ser cuantificados.

El estudio de los contenidos de carbono y nitrógeno permite controlar la evolución de formas de vida micro y macroscópicas en determinados ambientes y/o circunstancias. El contenido en azufre es un indicador de contaminación del aire, contaminación del suelo o el agua <sup>39</sup>. En la figura 12 se presenta el analizador elemental utilizado junto con sus condiciones de trabajo.



**Figura 12. Analizador Elemental**

El equipo utilizado fue un Analizador Elemental Serie II CHNS/O 2400 marca Perkin Elmer, la columna que se utilizó fue para analizar Carbono y Azufre. El estándar utilizado para calibrar el equipo fue Cistina. Y la temperatura de Combustión fue de 975°C y de Reducción de 500°C.

### 2.5.3 Microscopía Electrónica de Barrido

El Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) proporciona información morfológica y topográfica sobre la superficie de los sólidos que normalmente es necesaria para entender el comportamiento de las superficies del estudio en cuestión. La versatilidad del microscopio para el estudio de sólidos proviene de la amplia variedad de señales que se generan cuando el haz de electrones interactúa con el sólido e.g. los electrones retrodispersados, los electrones secundarios y la emisión de rayos X.

Este microscopio se barre mediante un rastreo programado de superficie del sólido con un haz de electrones de energía elevada y como consecuencia de ello se producen en la superficie diversos tipos de señales <sup>39</sup>.

Después de realizar el muestreo de las partículas se realizó un análisis físico para conocer su morfología y así obtener un análisis cualitativo empleando la técnica de Microscopio Electrónico de Barrido con un detector de electrones secundarios.



**Figura 13. Microscopio Electrónico de Barrido**

El equipo que se usó fue un Microscopio Electrónico de Barrido, marca PHILIPS modelo XL 30. Con un Microanalizador de Rayos X por energía Dispersa (EDS). Marca EDAX modelo DX-4.

El análisis químico cualitativo en las partículas se realizó mediante Energía dispersiva de Rayos “X” en el Microscopio electrónico de Barrido como se muestra en la figura 13, efectuando una preparación preliminar con recubrimiento de oro. Las condiciones de operación a las cuales fueron sometidas las muestras son: Distancia de trabajo de 18 mm, con voltaje de 15 Kv utilizando detector de electrones secundarios. Los aumentos utilizados fueron de las siguientes magnitudes: 650X, 1000X, 1400X, 1700X, 2250X y 2800X. Los análisis realizados por el microscopio son semicuantitativos.

El método que se utilizó para confirmar las asociaciones dominantes entre los elementos determinados por el microanálisis de Microscopía Electrónica (SEM-EDS), fue un Análisis Estadístico de Componentes Principales (ACP), el cual consiste en expresar un conjunto de variables en un conjunto de combinaciones lineales de factores no correlacionados entre sí. Este método permite representar los datos originales (objetos y variables) en un espacio de dimensión inferior del espacio original, procurando que se limite al máximo la pérdida de información <sup>40</sup>. El software que se uso para realizar el estudio estadístico fue Xlstat Pro.

## 2.6 Evaluación de Datos

Para la evaluación de la matriz de datos se utilizaron técnicas estadísticas de variables múltiples como son el análisis de factores y el análisis por agrupamiento, las cuales han sido utilizadas eficientemente en investigaciones del ambiente para obtener principalmente información sobre fuentes de contaminación. El uso de las herramientas estadísticas en este trabajo servirá para obtener tanto de forma cualitativa como cuantitativa la contribución de las distintas fuentes de PST, las técnicas se basan en modelos orientados al receptor.

Mediante el análisis de factores es posible descubrir correlaciones entre las variables o parámetros de contaminación que indiquen una misma fuente de emisión, el análisis por agrupamiento en cambio agrupa los objetos o puntos de muestreo que están sujetos a una misma influencia.

### 2.6.1 Análisis de Factores

El análisis de factores es una técnica que consiste en resumir la información contenida en una matriz de datos con múltiples variables, identifica un número de nuevas variables llamadas factores, los cuales representan a las variables originales, con una pérdida mínima de información. Cada factor puede ser usado para representar la relación entre un conjunto de varias variables interrelacionadas <sup>41</sup>.

Se partió de una matriz de concentraciones de los componentes para cada día de muestreo donde se obtuvo factores principales, que son combinaciones lineales de todos los elementos considerados. *A priori* cada factor determina una fuente, puesto que los principales elementos emitidos por cada una de ellas presentarán unos coeficientes (o cargas) más altos en el factor correspondiente.

Este tipo de análisis utiliza los coeficientes de correlación múltiples para la obtención de los factores. Es necesario estandarizar previamente la matriz de los datos para tener en cuenta la información que puedan aportar aquellos elementos presentes en concentraciones del orden de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 2.6.2 Análisis por Agrupamiento

Es un método estadístico multivariante de clasificación automática de datos que sean tan similares como sea posible, formando un grupo. Ésta herramienta sirvió para clasificar los puntos muestreados en categorías o grupos. A través del análisis por agrupamiento se obtuvo el dendrograma, el cual expresa la semejanza que existe entre puntos de muestreo y entre grupos de acuerdo a las proximidades entre ellos.

El objetivo del análisis por agrupamiento es obtener *grupos de objetos* de forma que, por un lado, los objetos pertenecientes a un mismo grupo sean muy semejantes entre sí, y por el otro lado, los objetos pertenecientes a grupos diferentes tenga un comportamiento distinto con respecto a las *variables analizadas*, es decir, que cada grupo este aislado externamente de los demás grupos <sup>41</sup>. Los conceptos fundamentales del análisis son:

- El concepto de distancia el cual determina cuánto se alejan dos objetos entre sí.
- El concepto de similitud que atiende a una medida de cercanía entre los objetos.

Para la caracterización quimiométrica la matriz de datos se sometió a un Análisis de Factores y un Análisis por Agrupamiento, para ello se hizo uso del Software SPSS versión 15.0, 2007.

## **CAPÍTULO 3**

### **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

En este Capítulo se presenta los resultados y discusiones pertinentes al estudio en cuestión, en la sección 3.1 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo, además condiciones metereológicas y concentración de PST, en la sección 3.2 se presenta la calibración del método analítico, en la sección 3.3 y 3.4 la concentración de metales de partículas en el aire junto con la normatividad aplicable, posteriormente en la sección 3.5 se muestra los resultados del análisis elemental, así como los resultados del análisis mineralógico y morfológico son mostrados en la sección 3.6. Para la integración de los datos y determinación de las posibles fuentes de emisión de PST se usó el análisis multivariado presentado en el apartado 3.7.

#### **3.1 Muestreo**

En la figura 14 se observa los puntos de muestreo, el criterio para determinar su ubicación fue que proporcionaran muestras significativas de distintas zonas del Área Metropolitana de Monterrey. En la figura se representa tanto las estaciones del SIMA como también los puntos que representaron un mayor riesgo debido a que se originaron a través de la denuncia ciudadana.



**Figura 14. Ubicación de los puntos de muestreo**

En la tabla 6 se muestra la georreferenciación de cada uno de los puntos que fueron muestreados.

**TABLA 6  
COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO**

| <b>Punto de Muestreo</b> | <b>Latitud (N)</b> | <b>Longitud (W)</b> | <b>Elevación (msnm)</b> |
|--------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| 1                        | 25°43'19"          | 100°18'35"          | 526                     |
| 2                        | 25°44'58"          | 100°18'52"          | 512                     |
| 3                        | 25°40'32"          | 100°20'18"          | 556                     |
| 4                        | 25°40'30"          | 100°17'34"          | 524                     |
| 5                        | 25°44'42"          | 100°15'17"          | 500                     |
| 6                        | 25°45'11"          | 100°22'11"          | 554                     |
| 7                        | 25°44'43"          | 100°10',44"         | 456                     |
| 8                        | 25°45'33"          | 100°18'56"          | 507                     |
| 9                        | 25°40'35"          | 100°28'10"          | 714                     |
| 10                       | 25°41'33"          | 100°18'24"          | 541                     |

En la tabla 6 se presenta los resultados de la concentración de partículas suspendidas totales por metro cúbico de aire del muestreo comprendido de julio a diciembre, de las cuales se obtuvieron a partir de la siguiente ecuación matemática:

$$\text{Partículas } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{(P_{\text{final}} - P_{\text{inicial}})}{(Q_{\text{real}})(t_{\text{muestreo}})}$$

En donde:  $P_{\text{final}}$ : Peso final del filtro ( $\mu\text{g}$ )

$P_{\text{inicial}}$  : Peso inicial del filtro( $\mu\text{g}$ )

$Q_{\text{real}}$  : Flujo real durante el muestreo ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$t_{\text{muestreo}}$  : Tiempo de muestreo (minutos)

En la tabla 8 también se muestran las condiciones metereológicas las cuales prevalecieron durante el periodo de muestreo.

**TABLA 7**

**CONDICIONES METEREOLÓGICAS Y CONCENTRACIÓN DE PST EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DURANTE EL PERÍODO DE SEPTIEMBRE A DICIEMBRE 2006**

| PUNTO | MUESTRA | FECHA         | PST          | WS  | T    | HR | LLUVIA | WD      |
|-------|---------|---------------|--------------|-----|------|----|--------|---------|
| 1     | M1      | 21,22/07/2006 | 204.7        | 7.3 | 29.2 | 56 | 0.0    | Este    |
|       | M2      | 23,24/07/2006 | 101.8        | 5.5 | 27.8 | 61 | 13.7   | Este    |
|       | M3      | 25,26/07/2006 | 107.1        | 4.8 | 28.4 | 61 | 0.0    | Sureste |
|       | M4      | 29,30/09/2006 | 132.0        | 6.0 | 25.0 | 76 | 0.0    | Sur     |
|       | M5      | 02,03/10/2006 | 102.8        | 5.6 | 24.3 | 74 | 0.0    | Noreste |
|       | M6      | 04,05/10/2006 | 150.8        | 7.5 | 23.9 | 74 | 0.0    | Noreste |
| 2     | M1      | 28,29/07/2006 | 75.2         | 8.7 | 28.3 | 58 | 0.0    | Este    |
|       | M2      | 30,31/07/2006 | 49.3         | 8.2 | 28.6 | 56 | 0.0    | Este    |
|       | M3      | 01,02/08/2006 | 84.1         | 8.2 | 28.8 | 57 | 0.0    | Este    |
|       | M4      | 13,14/10/2006 | 44.9         | 8.6 | 21.9 | 86 | 0.2    | Sureste |
|       | M5      | 16,17/10/2006 | <b>266.5</b> | 6.5 | 28.5 | 63 | 0.0    | Sur     |
|       | M6      | 18,19/10/2006 | <b>235.6</b> | 8.4 | 28.2 | 57 | 0.0    | Sur     |

Continuación tabla 8:

|   |    |               |              |      |      |    |       |          |
|---|----|---------------|--------------|------|------|----|-------|----------|
| 3 | M1 | 04,05/08/2006 | 49.6         | 7.5  | 25.7 | 78 | 0.0   | Este     |
|   | M2 | 06,07/08/2006 | 43.1         | 7.1  | 26.0 | 71 | 0.0   | Noreste  |
|   | M3 | 08,09/08/2006 | 47.8         | 8.3  | 27.0 | 66 | 0.0   | Este     |
|   | M4 | 06,07/10/2006 | 60.0         | 7.3  | 24.1 | 68 | 0.0   | Este     |
|   | M5 | 09,10/10/2006 | 49.5         | 5.1  | 25.3 | 77 | 0.0   | Este     |
|   | M6 | 11,12/10/2006 | 59.5         | 5.4  | 25.7 | 78 | 0.0   | Sureste  |
| 4 | M1 | 11,12/08/2006 | 142.2        | 6.2  | 29.9 | 57 | 0.0   | Este     |
|   | M2 | 13,14/08/2006 | 124.0        | 6.4  | 28.7 | 64 | 0.0   | Este     |
|   | M3 | 15,16/08/2006 | <b>287.1</b> | 7.6  | 29.9 | 59 | 0.0   | Este     |
|   | M4 | 20,21/10/2006 | 185.6        | 4.7  | 20.2 | 67 | 0.0   | Sureste  |
|   | M5 | 23,24/10/2006 | 54.0         | 3.3  | 14.6 | 92 | 0.0   | Este     |
|   | M6 | 25,26/10/2006 | 146.2        | 2.3  | 24.6 | 78 | 0.0   | Sur      |
| 5 | M1 | 18,19/08/2006 | 75.6         | 7.4  | 29.1 | 56 | 0.0   | Noreste  |
|   | M2 | 20,21/08/2006 | 60.2         | 8.6  | 29.6 | 55 | 0.0   | Noreste  |
|   | M3 | 22,23/08/2006 | 68.6         | 6.9  | 27.8 | 63 | 0.0   | Noreste  |
|   | M4 | 27,28/10/2006 | 78.4         | 6.7  | 20.4 | 31 | 0.0   | Noreste  |
|   | M5 | 30,31/10/2006 | 92.5         | 4.9  | 22.6 | 58 | 0.0   | Noreste  |
|   | M6 | 01,02/11/2006 | 50.6         | 7.6  | 19.9 | 81 | 0.0   | Noreste  |
| 6 | M1 | 25,26/08/2006 | 89.6         | 9.1  | 30.0 | 55 | 0.0   | Este     |
|   | M2 | 27,28/08/2006 | 82.5         | 9.9  | 29.3 | 57 | 0.0   | Sureste  |
|   | M3 | 29,30/08/2006 | 106.1        | 12.3 | 29.2 | 54 | 0.0   | Sureste  |
|   | M4 | 03,04/11/2006 | 26.0         | 3.1  | 14.4 | 90 | 0.1   | Oeste    |
|   | M5 | 06,07/11/2006 | 191.8        | 4.3  | 23.2 | 73 | 0.0   | Suroeste |
|   | M6 | 08,09/11/2006 | <b>223.0</b> | 7.8  | 24.7 | 53 | 0.0   | Oeste    |
| 7 | M1 | 01,02/09/2006 | 155.6        | 10.5 | 28.7 | 56 | 0.0   | Noreste  |
|   | M2 | 03,04/09/2006 | 96.4         | 9.3  | 28.0 | 51 | 0.0   | Noreste  |
|   | M3 | 05,06/09/2006 | 138.3        | 6.3  | 24.9 | 72 | 0.0   | Noreste  |
|   | M4 | 10,11/11/2006 | <b>479.2</b> | 8.8  | 23.1 | 47 | 0.0   | Noreste  |
|   | M5 | 13,14/11/2006 | <b>229.5</b> | 4.6  | 20.6 | 75 | 0.0   | Noreste  |
|   | M6 | 15,16/11/2006 | <b>403.1</b> | 6.7  | 16.0 | 20 | 0.0   | Noreste  |
| 8 | M1 | 08,09/09/2006 | 62.3         | 6.0  | 25.5 | 73 | 0.0   | Sur      |
|   | M2 | 10,11/09/2006 | 33.5         | 6.4  | 26.5 | 72 | 7.9   | Sur      |
|   | M3 | 12,13/09/2006 | 33.4         | 3.1  | 23.0 | 86 | 132.6 | Sur      |
|   | M4 | 17,18/11/2006 | 144.3        | 7.8  | 19.8 | 37 | 0.0   | Oeste    |
|   | M5 | 21,22/11/2006 | 112.9        | 7.7  | 16.5 | 55 | 0.0   | Suroeste |
|   | M6 | 23,24/11/2006 | 103.4        | 7.1  | 17.8 | 53 | 0.0   | Suroeste |
| 9 | M1 | 15,16/09/2006 | 82.4         | 6.9  | 25.9 | 72 | 73.0  | Sureste  |
|   | M2 | 17,18/09/2006 | 82.4         | 4.4  | 25.8 | 69 | 69.8  | Sur      |
|   | M3 | 19,20/09/2006 | 84.8         | 8.6  | 24.4 | 48 | 49.2  | Sureste  |
|   | M4 | 24,25/11/2006 | 164.3        | 6.0  | 15.9 | 57 | 0.0   | Sur      |

Continuación tabla 8:

|    |    |               |              |     |      |    |      |          |
|----|----|---------------|--------------|-----|------|----|------|----------|
| 9  | M5 | 27,28/11/2006 | <b>244.1</b> | 5.0 | 19.1 | 63 | 0.0  | Suroeste |
|    | M6 | 29,30/11/2006 | <b>324.4</b> | 6.3 | 18.5 | 57 | 0.0  | Suroeste |
| 10 | M1 | 22,23/09/2006 | 108.9        | 6.2 | 30.0 | 65 | 0.0  | Sureste  |
|    | M2 | 24,25/09/2006 | 25.1         | 5.4 | 19.1 | 80 | 5.6  | Sureste  |
|    | M3 | 26,27/09/2006 | 78.8         | 4.8 | 24.1 | 62 | 0.3  | Sureste  |
|    | M4 | 04,05/12/2006 | 56.6         | 4.9 | 8.8  | 67 | 0.0  | Este     |
|    | M5 | 06,07/12/2006 | 114.5        | 3.5 | 15.5 | 74 | 14.0 | Sureste  |
|    | M6 | 11,12/12/2006 | 180.0        | 2.4 | 16.5 | 79 | 0.0  | Sur      |

\*PST= Partículas Suspensas Totales ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )    \*WS= Velocidad del Viento (Km/h)    \*T=Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 \*HR= Humedad Relativa (%)    \*Lluvia= (mm)    \*WD= Dirección del Viento

Como se puede observar en la tabla 8, nueve días estuvieron fuera de norma en el monitoreo realizado en el área metropolitana, principalmente en los meses de octubre y noviembre. Las mayores acumulaciones de lluvia predominaron en el mes de septiembre en los puntos 8 y 9. Las temperaturas promedio osciló alrededor de los  $24^{\circ}\text{C}$ . Las velocidades de viento tenían un promedio de 7 km/h provenientes del Este.

En la figura 15 se presenta el contenido de PST en microgramos por metro cúbico de aire, aquí se observa que en los puntos 2, 4, 6, 7 y 9 estuvo por encima de la norma NOM-025-SSA1-1993<sup>10</sup> que establece un valor de  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en un promedio de 24 horas. El día 11 de noviembre del 2006 se presentó el mayor índice de contaminación en el punto 7 con un valor de  $479 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El día 11 de noviembre del 2006.

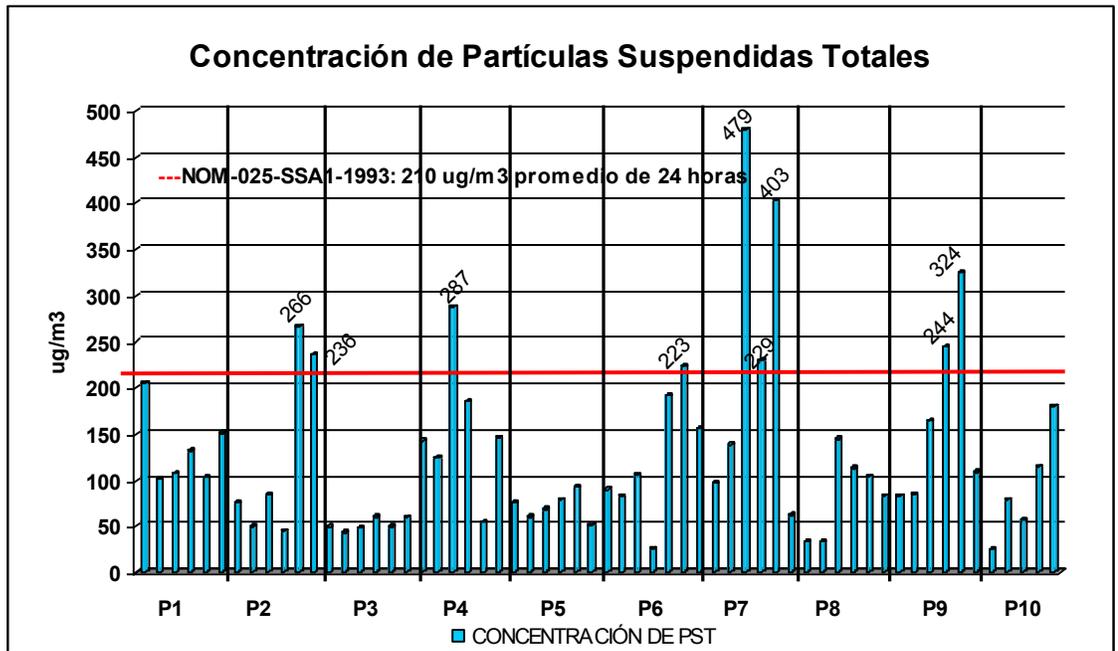


Figura 15. Concentración de PST en el AMM de septiembre a diciembre

## 3.2 Calibración del Método Analítico

A continuación se presenta el procedimiento estadístico para la calibración del espectrofotómetro de Absorción Atómica. Mediante el uso de estándares certificados de cada uno de los metales analizados se obtuvieron las curvas de calibración, se determinó la linealidad, así como los límites de detección para cada metal.

### 3.2.1 Procesamiento de Datos para la Función de Calibración de Primer Orden

De acuerdo con la ley de Lambert y Beer, existe una relación directamente proporcional entre la absorbancia y la concentración de metal en la muestra. Para asegurar la calidad de los datos es necesario obtener una gráfica de calibración de primer orden <sup>42</sup>.

Al realizar un análisis de regresión con los datos obtenidos, la función de calibración lineal debe cumplir con la ecuación de una línea recta que es:

$$y = a + bx$$

Donde  $y$  es la respuesta (absorbancia) al cambio en la variable  $x$  (concentración),  $b$  es la pendiente de la recta y  $a$  es la intersección con el eje  $y$ .

La pendiente ( $b$ ), que es una medida de la sensibilidad del método, se calcula con la siguiente fórmula:

$$b = \frac{\sum[(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sum(x_i - \bar{x})^2}$$

La intersección ( $a$ ) en el eje de las ordenadas se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

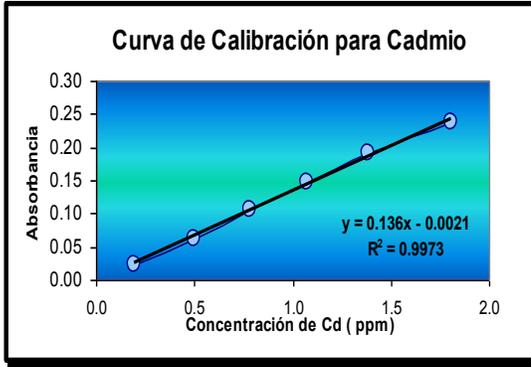
La desviación estándar de los residuales ( $S_y$ ) es la dispersión de los valores medidos alrededor de la línea de regresión, y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{N - 2}}$$

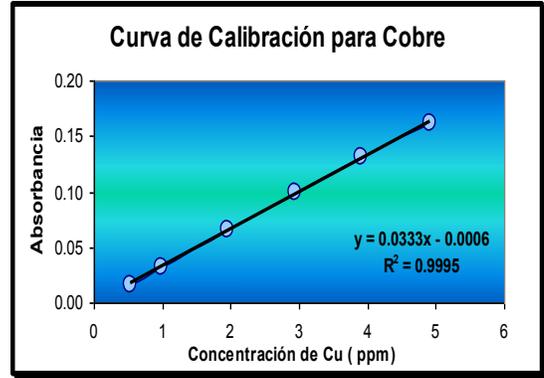
El residual  $y_i - \hat{y}_i$  es la distancia vertical de las observaciones de la curva de regresión.

Para  $i = 1, \dots, n$  con  $y_i$  = observación y  $\hat{y}_i$  = valor estimado de  $y_i$  (de la función de regresión).

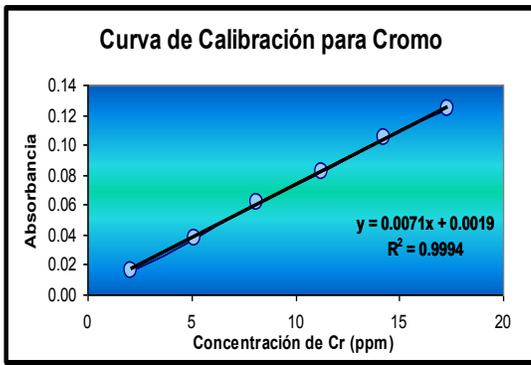
En las figuras 16 a la 24 se muestran las gráficas de las Curvas de Calibración que se obtuvieron a partir del análisis por absorción atómica.



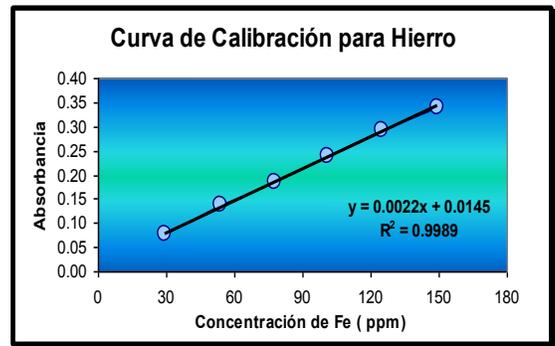
**Figura 16. Curva de Calibración de Cadmio**



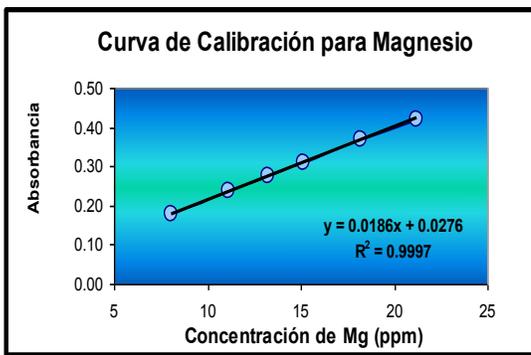
**Figura 19. Curva de Calibración de Cobre**



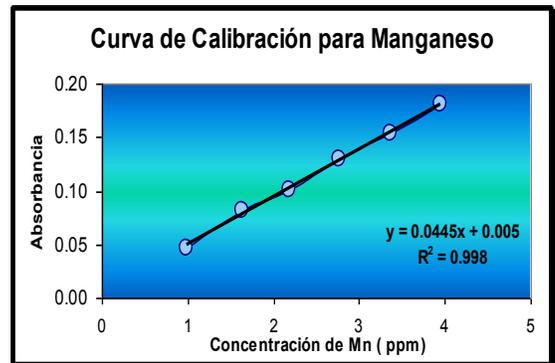
**Figura 17. Curva de Calibración de Cromo**



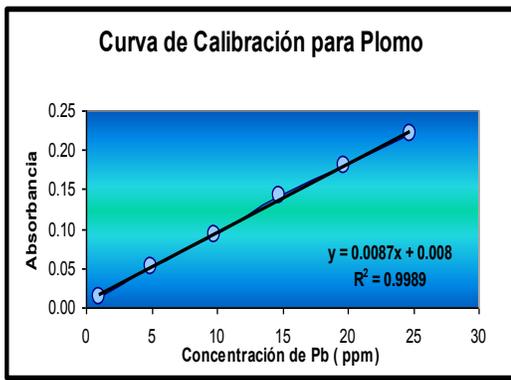
**Figura 20. Curva de Calibración de Hierro**



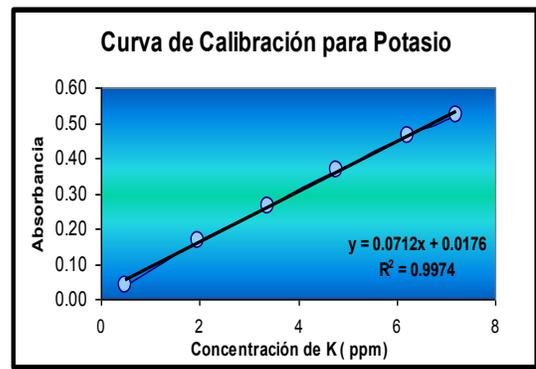
**Figura 18. Curva de Calibración de Magnesio**



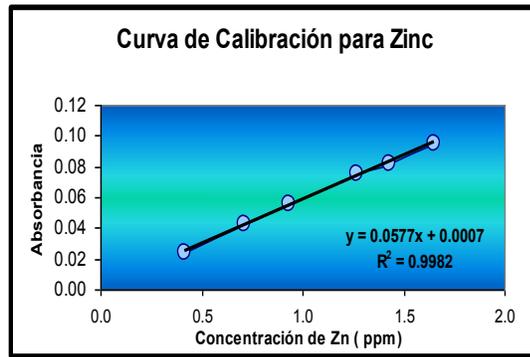
**Figura 21. Curva de Calibración de Manganeso**



**Figura 22. Curva de Calibración de Plomo**



**Figura 23. Curva de Calibración de Potasio**



**Figura 24. Curva de Calibración de Zinc**

Como se puede observar en las figuras anteriores se obtuvo una linealidad aceptable, debido a que cuanto mayor se acerca la curva a una recta, mejor es su linealidad, es decir, mejor es la calidad de la medición de la curva, donde los valores de  $r^2$  son superiores a 0.9970, sin embargo, se debe validar su linealidad mediante el uso de pruebas estadísticas.

### 3.2.2 Verificación de la Linealidad de la Función de Calibración

A efecto de conocer la linealidad de las curvas, se realizó un tratamiento estadístico para probar que el modelo de calibración es el adecuado, es decir, que los datos presentan un comportamiento de una función de calibración de primer orden, en el cual se empleó la prueba de Mandel <sup>43</sup>.

Esta prueba es recomendada para la verificación matemática de la linealidad. Para esta prueba se utilizan la función de primer orden ( $y = a + bx$ ) y segundo orden ( $y = a + bx + cx^2$ ) de calibración, incluyendo sus respectivas desviaciones estándar residuales ( $Sy$ ) que son usadas.

La diferencia de las varianzas  $DS^2$  es calculada utilizando desviaciones estándar residuales ( $Sy_1$ ) de la función de primer orden de calibración y ( $Sy_2$ ) de la función de segundo orden de calibración.

$$DS^2 = (N-2) S^2y_1 - (N-3) S^2y_2 \quad \text{con el grado de libertad } f=1$$

El valor de la prueba TV es calculado por:

$$TV = \frac{DS^2}{S^2y_2}$$

y es comparado con el valor obtenido de la tabla F ( $f1=1$ ,  $f2= N-3$ ,  $P= 95\%$ ).

Si  $TV \leq F$ , entonces la función de segundo orden de calibración, no provee una mejor significancia, y la función es lineal.

### 3.2.3 Limite de Detección

El límite de detección es la cantidad de concentración de analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco ( $y_B$ ) más tres veces la desviación estándar del blanco ( $s_B$ ), la concentración más pequeña de un analito que puede ser detectada con una confiabilidad del 95%, depende de la sensibilidad del equipo y se calcula con la siguiente expresión <sup>42</sup>:

$$LD = y_B + 3 s_B$$

Donde:

$y_B$  = absorbancia media del blanco y

$s_B$  = desviación estándar del blanco

Estos valores pueden obtenerse a partir de la curva de calibración, donde:

$y_B$  = intersección en el eje de las "y"

$s_B$  = desviación estándar residual ( $S_y$ )

Siguiendo el procedimiento anterior se determinó la linealidad de las curvas de calibración, donde se encontró que todas y cada una de ellas eran de primer orden ya que el valor de prueba TV era menor al valor crítico de F como se muestra en la tabla 8.

Así mismo, se obtuvieron los resultados de los límites de detección para cada uno de los metales analizados, los cuales son mostrados en la tabla 8.

**TABLA 8**

**PRUEBA DE VERIFICACIÓN DE LINEALIDAD Y LÍMITES DE DETECCIÓN**

| METAL     | ECUACIÓN               | Sy <sub>1</sub> | TV   | F (TABLA) | LD (µg/ml) |
|-----------|------------------------|-----------------|------|-----------|------------|
| <b>Cd</b> | $y = 0.1360x - 0.0021$ | 0.0046          | 7.0  | 34.12     | 0.10       |
| <b>Cu</b> | $y = 0.0333x - 0.0006$ | 0.0015          | 12.6 |           | 0.07       |
| <b>Cr</b> | $y = 0.0071x + 0.0019$ | 0.0011          | 3.0  |           | 0.54       |
| <b>Fe</b> | $y = 0.0022x + 0.0145$ | 0.0037          | 2.6  |           | 5.01       |
| <b>Mg</b> | $y = 0.0186x + 0.0276$ | 0.0019          | 3.0  |           | 0.31       |
| <b>Mn</b> | $y = 0.0445x + 0.0050$ | 0.0025          | 1.3  |           | 0.03       |
| <b>Pb</b> | $y = 0.0087x + 0.0080$ | 0.0029          | 2.5  |           | 0.36       |
| <b>K</b>  | $y = 0.0712x + 0.0176$ | 0.0104          | 23.6 |           | 0.44       |
| <b>Zn</b> | $y = 0.0577x + 0.0007$ | 0.0013          | 10.4 |           | 0.01       |

**3.2.4 Concentraciones de Metales en Partículas Suspendidas Totales**

Como se mencionó anteriormente el muestreo se llevó a cabo en dos etapas, la primera etapa de muestreo comprendió del mes de julio a septiembre y la segunda del mes de octubre a diciembre 2006. En las tablas 9 y 11 se muestran los resultados de las concentraciones de metales obtenidas a partir de la digestión por microondas y posterior análisis por Espectroscopia de Absorción Atómica. En la tabla 9 se muestra información generada de la concentración de cada uno de los metales presentes periodo de muestreo julio a septiembre 2006. Los valores máximos de concentración para cada uno de los metales son

marcados en negrita, en el cual se puede observar que en los puntos 1.2 y 10.1 están presentes hasta dos metales con las máximas concentraciones.

**TABLA 9**  
**CONCENTRACIÓN DE METALES EN PST DEL PERÍODO DE MUESTREO JULIO-SEPTIEMBRE**

| Punto                            | Pb                | Mg            | Fe            | Zn           | K            | Cr           | Cd           | Cu           | Mn           |
|----------------------------------|-------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                  | µg/m <sup>3</sup> |               |               |              |              |              |              |              |              |
| 1.1                              | 0.032             | 1.714         | <b>22.855</b> | 0.053        | 0.002        | 0.018        | 0.001        | 0.208        | 2.950        |
| 1.2                              | 0.045             | <b>10.411</b> | 6.935         | 0.017        | <b>1.877</b> | 0.002        | 0.002        | 0.199        | 2.821        |
| 1.3                              | 0.063             | 0.310         | 2.032         | 0.047        | 1.001        | 0.016        | 0.002        | 0.321        | <b>4.668</b> |
| 2.1                              | 0.011             | 0.159         | 0.462         | <b>0.452</b> | 1.246        | 0.017        | 0.001        | 0.028        | 0.227        |
| 2.2                              | 0.029             | 0.102         | 0.225         | 0.180        | 0.767        | 0.015        | 0.001        | 0.027        | 0.209        |
| 2.3                              | 0.026             | 0.199         | 0.484         | 0.206        | 1.227        | 0.015        | 0.001        | 0.028        | 0.220        |
| 3.1                              | 0.010             | 0.064         | 0.169         | 0.140        | 0.222        | 0.001        | 0.001        | 0.182        | 2.561        |
| 3.2                              | 0.012             | 0.060         | 0.198         | 0.170        | 0.229        | 0.004        | 0.002        | 0.233        | 3.333        |
| 3.3                              | 0.004             | 0.080         | 0.218         | 0.033        | 0.454        | 0.007        | 0.001        | 0.071        | 0.883        |
| 4.1                              | 0.227             | 0.717         | 2.239         | 0.032        | 1.393        | 0.014        | 0.002        | 0.073        | 0.914        |
| 4.2                              | 0.159             | 0.449         | 0.643         | 0.023        | 1.593        | 0.011        | 0.002        | 0.062        | 0.741        |
| 4.3                              | 0.467             | 1.786         | 9.337         | 0.007        | 1.420        | 0.013        | 0.004        | 0.106        | 1.409        |
| 5.1                              | 0.034             | 0.264         | 1.054         | 0.022        | 0.153        | 0.003        | 0.001        | 0.090        | 2.136        |
| 5.2                              | 0.021             | 0.210         | 0.729         | 0.016        | 0.126        | 0.006        | 0.001        | 0.090        | 2.151        |
| 5.3                              | 0.031             | 0.239         | 0.837         | 0.018        | 0.135        | 0.006        | 0.001        | 0.117        | 2.830        |
| 6.1                              | 0.081             | 0.271         | 0.868         | 0.019        | 0.156        | 0.006        | 0.001        | 0.084        | 1.985        |
| 6.2                              | 0.024             | 0.274         | 0.771         | 0.017        | 0.164        | 0.006        | 0.001        | 0.076        | 1.783        |
| 6.3                              | 0.031             | 0.389         | 1.099         | 0.023        | 0.047        | 0.008        | 0.001        | 0.066        | 1.544        |
| 7.1                              | 0.016             | 0.417         | 0.963         | 0.012        | 0.047        | 0.012        | 0.001        | 0.089        | 2.131        |
| 7.2                              | 0.005             | 0.242         | 0.441         | 0.006        | 0.166        | 0.013        | 0.001        | 0.068        | 1.596        |
| 7.3                              | 0.027             | 0.221         | 3.262         | 0.004        | 0.159        | 0.016        | 0.001        | 0.180        | 4.414        |
| 8.1                              | <b>1.140</b>      | 1.775         | 0.629         | 0.014        | 0.100        | 0.014        | 0.002        | 0.089        | 2.134        |
| 8.2                              | 0.101             | 0.066         | 0.212         | 0.006        | 0.053        | 0.014        | 0.001        | 0.072        | 1.702        |
| 8.3                              | 0.109             | 0.073         | 0.522         | 0.012        | 0.059        | 0.017        | 0.002        | 0.097        | 2.323        |
| 9.1                              | 0.021             | 0.464         | 0.130         | 0.067        | 0.020        | 0.057        | 0.003        | 0.101        | 0.121        |
| 9.2                              | 0.029             | 0.504         | 0.142         | 0.138        | 0.015        | 0.042        | 0.003        | 0.141        | 0.131        |
| 9.3                              | 0.020             | 0.437         | 0.114         | 0.018        | 0.013        | 0.039        | 0.002        | 0.079        | 0.149        |
| 10.1                             | 0.027             | 0.668         | 0.122         | 0.085        | 0.022        | <b>0.097</b> | <b>0.005</b> | 0.157        | 0.153        |
| 10.2                             | 0.008             | 0.375         | 0.247         | 0.013        | 0.006        | 0.015        | 0.002        | 0.194        | 0.199        |
| 10.3                             | 0.031             | 0.415         | 0.160         | 0.052        | 0.012        | 0.041        | 0.005        | <b>0.384</b> | 0.070        |
| <b>Coefficiente de Variación</b> | 10%               | 1%            | 6%            | 3%           | 7%           | 7%           | 5%           | 2%           | 9%           |

En la tabla anterior se puede observar que las concentraciones referidas tienen unidades de microgramos por metro cúbico de aire y su correspondiente coeficiente de variación oscila alrededor del 1 al 10%.

En la tabla 10 se muestra los valores máximos de concentración por metal de cada uno de los metales presentes en el muestreo 1.

**TABLA 10**  
**VALORES MÁXIMOS DE CONCENTRACIÓN POR METAL**  
**PERÍODO DE MUESTREO JULIO-SEPTIEMBRE**

| Punto       | Pb                       | Mg    | Fe    | Zn   | K    | Cr   | Cd    | Cu   | Mn   |
|-------------|--------------------------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|
|             | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |       |       |      |      |      |       |      |      |
| <b>1.1</b>  |                          |       | 22.86 |      |      |      |       |      |      |
| <b>1.2</b>  |                          | 10.41 |       |      | 1.88 |      |       |      |      |
| <b>1.3</b>  |                          |       |       |      |      |      |       |      | 4.67 |
| <b>2.1</b>  |                          |       |       | 0.45 |      |      |       |      |      |
| <b>8.1</b>  | 1.14                     |       |       |      |      |      |       |      |      |
| <b>10.1</b> |                          |       |       |      |      | 0.09 | 0.005 |      |      |
| <b>10.3</b> |                          |       |       |      |      |      |       | 0.38 |      |

En la tabla 11 se muestra información generada de la concentración de cada uno de los metales presentes en el muestreo 2. El nivel de incertidumbre de la concentración de cada uno de los metales fluctúa alrededor del 1 al 11%. Los valores máximos de concentración de los metales que son encontrados con respecto a todos los puntos muestreados están marcados en negrita, en el punto 4.3 están presente dos metales con las máximas concentraciones.

TABLA 11

CONCENTRACIÓN DE METALES EN PST DEL PERÍODO DE  
MUESTREO OCTUBRE-DICIEMBRE

| Punto                           | Pb                | Mg           | Fe            | Zn           | K             | Cr           | Cd           | Cu           | Mn           |
|---------------------------------|-------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                 | µg/m <sup>3</sup> |              |               |              |               |              |              |              |              |
| 1.1                             | 0.060             | 1.216        | 9.383         | 0.013        | 0.316         | 0.049        | <b>0.029</b> | 0.666        | 0.044        |
| 1.2                             | 0.009             | 0.921        | 8.205         | 0.001        | 0.285         | 0.046        | 0.025        | 0.494        | 0.024        |
| 1.3                             | 0.028             | 1.357        | <b>19.465</b> | 0.047        | 0.345         | 0.030        | 0.006        | 0.186        | 0.012        |
| 2.1                             | 0.062             | 1.485        | 2.224         | 0.337        | 9.978         | 0.033        | 0.003        | 0.071        | 0.006        |
| 2.2                             | 0.230             | 1.705        | 2.552         | 0.337        | 14.380        | 0.032        | 0.004        | 0.173        | 0.003        |
| 2.3                             | 0.182             | 1.550        | 2.334         | 0.331        | 15.252        | 0.042        | 0.004        | 0.042        | 0.007        |
| 3.1                             | 0.037             | 1.958        | 1.002         | 0.247        | 0.153         | 0.043        | 0.007        | 0.067        | 0.002        |
| 3.2                             | 0.004             | 0.915        | 0.265         | 0.467        | 0.786         | 0.050        | 0.007        | 0.016        | 0.002        |
| 3.3                             | 0.027             | 0.998        | 1.370         | 0.552        | 0.782         | 0.042        | 0.004        | 0.089        | 0.003        |
| 4.1                             | 0.082             | 1.357        | 1.667         | 0.392        | 11.933        | 0.038        | 0.004        | 0.017        | 0.011        |
| 4.2                             | 0.030             | 0.945        | 0.503         | 0.396        | 15.047        | 0.046        | 0.004        | 0.356        | 0.008        |
| 4.3                             | 0.054             | 1.360        | 0.849         | <b>0.568</b> | <b>16.929</b> | 0.054        | 0.004        | 0.456        | 0.036        |
| 5.1                             | 0.037             | 0.993        | 0.345         | 0.439        | 13.560        | 0.057        | 0.003        | 0.102        | 0.028        |
| 5.2                             | 0.064             | 1.005        | 0.784         | 0.404        | 12.336        | 0.050        | 0.003        | 1.014        | 0.023        |
| 5.3                             | 0.072             | 0.971        | 0.524         | 0.469        | 13.543        | <b>0.236</b> | 0.004        | 0.021        | 0.030        |
| 6.1                             | 0.035             | 0.392        | 1.408         | 0.421        | 12.419        | 0.010        | 0.004        | <b>1.161</b> | 0.024        |
| 6.2                             | 0.036             | 1.499        | 1.532         | 0.451        | 10.544        | 0.001        | 0.006        | 0.200        | 0.020        |
| 6.3                             | 0.107             | 1.545        | 2.682         | 0.038        | 12.463        | 0.002        | 0.005        | 0.061        | 0.029        |
| 7.1                             | 0.193             | 1.589        | 5.036         | 0.220        | 10.117        | 0.005        | 0.004        | 0.191        | 0.020        |
| 7.2                             | 0.073             | <b>2.804</b> | 10.999        | 0.072        | 6.650         | 0.004        | 0.004        | 0.223        | 0.011        |
| 7.3                             | 0.076             | 1.249        | 1.363         | 0.395        | 5.176         | 0.003        | 0.004        | 0.219        | 0.091        |
| 8.1                             | 0.057             | 1.743        | 0.714         | 0.319        | 9.648         | 0.001        | 0.006        | 0.001        | 0.031        |
| 8.2                             | <b>0.349</b>      | 0.950        | 0.907         | 0.332        | 10.317        | 0.002        | 0.005        | 0.090        | 0.009        |
| 8.3                             | 0.312             | 0.922        | 1.361         | 0.370        | 10.308        | 0.003        | 0.004        | 1.044        | 0.017        |
| 9.1                             | 0.287             | 0.804        | 1.352         | 0.195        | 6.583         | 0.002        | 0.004        | 0.173        | 0.119        |
| 9.2                             | 0.083             | 1.252        | 1.970         | 0.327        | 10.066        | 0.016        | 0.005        | 0.208        | 0.132        |
| 9.3                             | 0.053             | 0.407        | 0.546         | 0.367        | 13.230        | 0.001        | 0.006        | 0.020        | 0.147        |
| 10.1                            | 0.023             | 0.462        | 0.373         | 0.395        | 12.347        | 0.002        | 0.004        | 0.217        | 0.154        |
| 10.2                            | 0.057             | 1.095        | 2.165         | 0.387        | 12.140        | 0.002        | 0.004        | 0.215        | <b>0.195</b> |
| 10.3                            | 0.162             | 1.158        | 1.577         | 0.408        | 13.289        | 0.026        | 0.005        | 0.577        | 0.071        |
| <b>Coeficiente de Variación</b> | 11%               | 1%           | 5%            | 1%           | 4%            | 10%          | 5%           | 2%           | 8%           |

En la tabla 12 se muestra los valores máximos de concentración por metal de cada uno de los metales presentes en el muestreo 2.

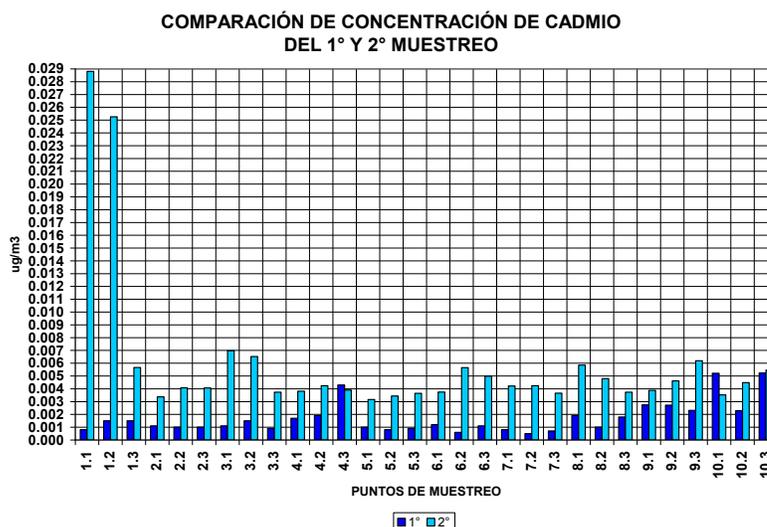
**TABLA 12**  
**VALORES MÁXIMOS DE CONCENTRACIÓN POR METAL**  
**PERÍODO DE MUESTREO OCTUBRE A DICIEMBRE**

| Punto | Pb                       | Mg   | Fe    | Zn   | K     | Cr   | Cd   | Cu   | Mn   |
|-------|--------------------------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|
|       | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |      |       |      |       |      |      |      |      |
| 1.1   |                          |      |       |      |       |      | .029 |      |      |
| 1.3   |                          |      | 19.47 |      |       |      |      |      |      |
| 4.3   |                          |      |       | 0.57 | 16.93 |      |      |      |      |
| 5.3   |                          |      |       |      |       | 0.24 |      |      |      |
| 6.1   |                          |      |       |      |       |      |      | 1.16 |      |
| 7.2   |                          | 2.80 |       |      |       |      |      |      |      |
| 8.2   | 0.35                     |      |       |      |       |      |      |      |      |
| 10.2  |                          |      |       |      |       |      |      |      | 0.19 |

Como se mostró previamente en la tabla 10 y 12 la máxima concentración encontrada de plomo, magnesio, hierro y manganeso se encontraron en el periodo de muestreo correspondiente de junio a septiembre en los puntos 8.1, 1.2, 1.1 y 1.3, mientras que para los metales zinc, potasio, cromo, cadmio y cobre se prevalecen en el muestreo de octubre a diciembre en los puntos 4.3, 5.3, 1.1 y 6.1 respectivamente. Cabe destacar que durante los 6 meses de muestreo en el punto 1 predominaron los valores más altos encontrados de los diferentes metales analizados.

### 3.2.5 Comparación de la Concentración de los Metales en PST

En las figuras 25 a la 33 se muestran las graficas del comportamiento de la contaminación por metales en Partículas Suspensas Totales, en las que se observa una comparación de los 2 períodos de muestreo comprendientes de julio a diciembre.



**Figura 25. Comparación de las concentraciones de cadmio del 1° y 2° muestreo**

Los valores de concentración de cadmio que se obtuvieron fueron similares en todo el período de muestreo con valores alrededor de los 0.005  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sin embargo, se mostró un alza en el periodo de octubre a diciembre en los puntos 1.1 y 1.2.



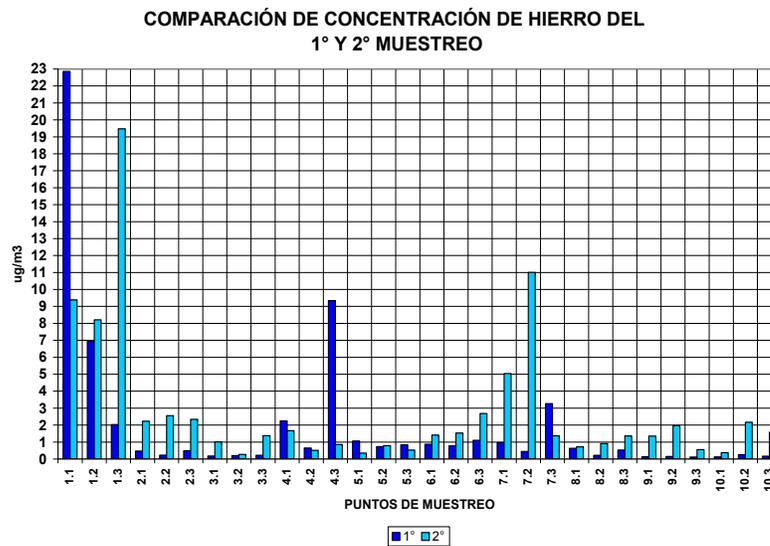
**Figura 26. Comparación de las concentraciones de cobre del 1° y 2° muestreo**

Las concentraciones mayores se observan en el muestreo 2, el mayor valor se encuentra en el punto 6.1 con  $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la mayor concentración del muestreo 1 es  $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ubicado en el punto 10.3.



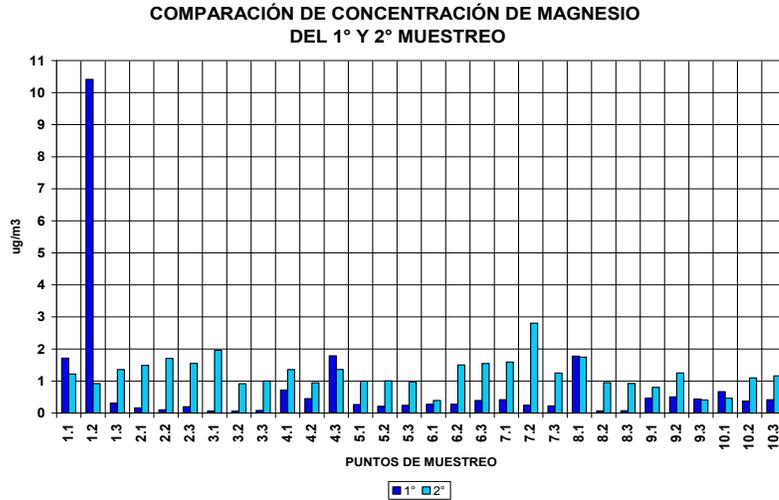
**Figura 27. Comparación de las concentraciones de cromo del 1° y 2° muestreo**

El comportamiento del metal presente en las muestras fue muy variado ya que prevalecen las mayores concentraciones de  $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el muestreo 2 en los puntos 1 al 5, con un incremento de casi 6 veces en el punto 5.3. Por otro lado, el valor mayor del muestreo 1 se encuentra en el punto 10.3 con apenas un  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



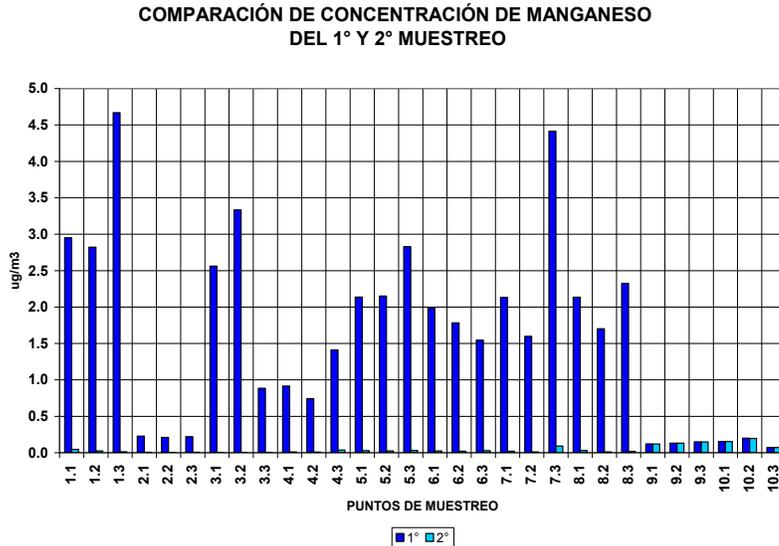
**Figura 28. Comparación de las concentraciones de hierro del 1° y 2° muestreo**

Se obtuvieron muy similares las concentraciones del hierro para ambos períodos de muestreo en el punto 1.2, mientras que el valor mas alto con  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  estuvo presente en el muestreo 1, los mayores valores del muestreo 2 estuvieron en el punto 1.3 y 7.3 y en el punto 4.3 del muestreo 1.



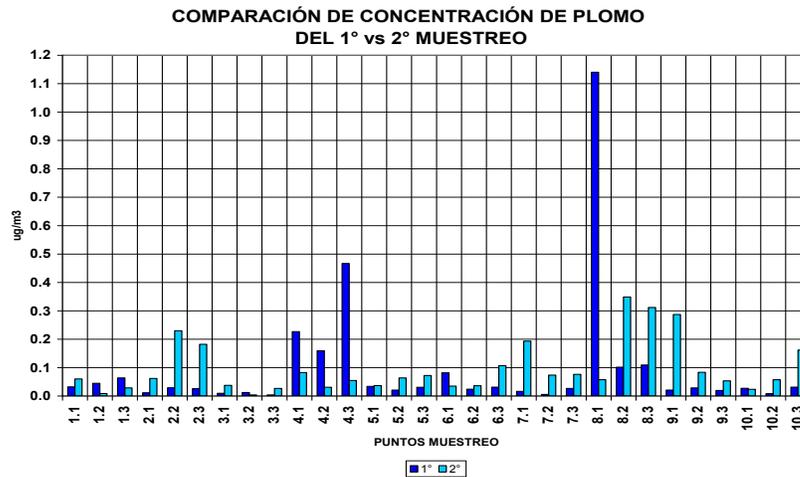
**Figura 29. Comparación de las concentraciones de magnesio del 1° y 2° muestreo**

En general los valores de concentración de magnesio oscilaban alrededor de  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para las dos temporadas de muestreo, con excepción del punto 1.2 que mostró valores de  $10.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el muestreo 1.



**Figura 30. Comparación de las concentraciones de manganeso del 1° y 2° muestreo**

Sobresalen los valores más altos de concentración de manganeso en el muestreo 1, se encuentra en el punto 1.3 con  $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , siguiéndole en orden de importancia el punto 7.3.



**Figura 31. Comparación de las concentraciones de plomo del 1° y 2° muestreo**

El valor de concentración de plomo que sobresale se encuentra en el punto 8.1 con  $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el muestreo 1, en general presenta valores bajos en las concentraciones de plomo presentes en los dos muestreos realizados que fluctúan alrededor de los  $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

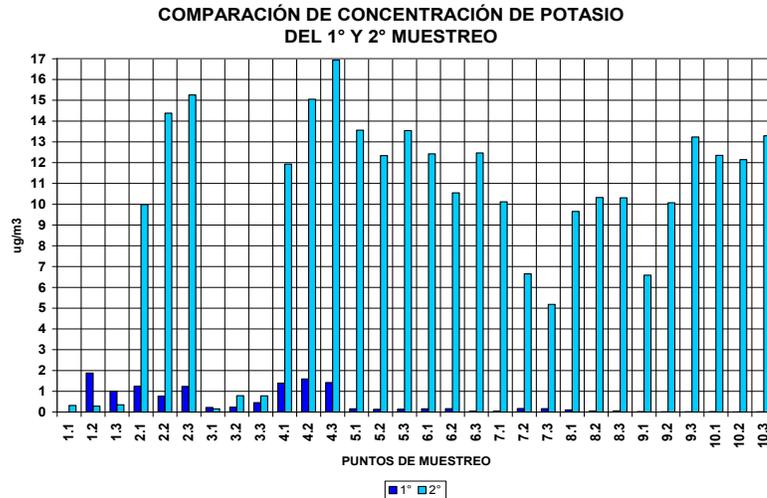


Figura 32. Comparación de las concentraciones de potasio del 1° y 2° muestreo

En la grafica predominan mayores concentraciones de potasio en el muestreo 2 ya que se encuentran por arriba de los 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , el valor mayor está en el punto 4.3 con 17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

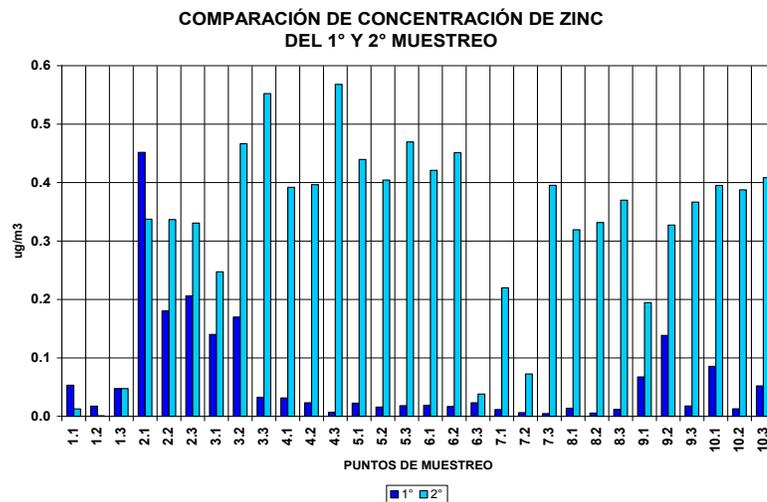


Figura 33. Comparación de las concentraciones de zinc del 1° y 2° muestreo

Los valores mayores de la concentración de zinc se encuentran presentes en el muestreo 2 cuyo valor mas alto está en el punto 4.3 con 0.55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por otro lado, el punto 2.1 del muestreo 1 tiene un valor mayor con 0.45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en comparación a los demás puntos de muestreo de ese mismo período.

Como se puede observar en las figuras 25 a la 33 en general las mayores concentraciones de los metales plomo, magnesio, manganeso, hierro se encontraron en el muestreo 1 comprendido de julio a septiembre, por otro lado, las concentraciones de cadmio, cobre, cromo, potasio y zinc se presentaron en el muestreo 2 el cual se efectuó de los meses de octubre a diciembre. No mostrándose una tendencia similar para los dos períodos de muestreo, salvo para el metal hierro.

### **3.3 Puntos Críticos y Normatividad**

Debido a que no existe alguna normatividad aplicable en México con respecto al estudio de caracterización por metales en Partículas Suspendidas Totales, es necesario recurrir a instancias internacionales como son la leyes normativas de la US-EPA <sup>45,46</sup>, las cuales tienen un apartado para plomo y la Organización Mundial de la Salud (OMS) <sup>47</sup> que ha emitido una guía de niveles críticos para plomo y cromo los cuales se refieren a valores para aire ambiental.

En la tabla 13 se puede observar la comparación de los 3 valores máximos de concentración encontrados en los diez puntos de muestreo, con respecto a la normativa aplicable para los metales plomo, cromo, cadmio cobre y hierro, también muestra la concentración encontrada en los filtros analizados y los valores de algunas ciudades que tienen similar industria y tráfico vehicular.

**TABLA 13**

**COMPARACIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS ANALIZADOS**

| Puntos de Muestreo  | Concentración               | Pb                | Cr                | Cd   | Cu                | Fe   |
|---|-----------------------------|-------------------|-------------------|------|-------------------|------|
|   | de PST (ug/m <sup>3</sup> ) | µg/m <sup>3</sup> | ng/m <sup>3</sup> |      | µg/m <sup>3</sup> |      |
| 1.1   | 204.7                       |                   |                   |      |                   | 22.8 |
| 1.4   | 132.0                       |                   |                   | 28.8 |                   |      |
| 1.5   | 102.8                       |                   |                   | 25.2 |                   |      |
| 1.6   | 150.8                       |                   |                   |      |                   | 19.4 |
| 3.4   | 60.0                        |                   |                   | 66.9 |                   |      |
| 4.1   | 142.2                       | 0.23              |                   |      |                   |      |
| 4.3   | <b>287.1</b>                | 0.47              |                   |      |                   |      |
| 5.5   | 92.5                        |                   |                   |      | 1.01              |      |
| 5.6   | 50.6                        |                   | 235.7             |      |                   |      |
| 6.4   | 26.0                        |                   |                   |      | 1.16              |      |
| 7.5   | <b>229.5</b>                |                   |                   |      |                   | 11.0 |
| 8.1   | 62.3                        | 1.14              |                   |      |                   |      |
| 8.6   | 103.4                       |                   |                   |      | 1.04              |      |
| 9.1   | 82.4                        |                   | 56.9              |      |                   |      |
| 10.1  | 108.9                       |                   | 97.4              |      |                   |      |
| <b>Normatividad y Valores Criterio</b>                            |                             |                   |                   |      |                   |      |
| OMS: Concentración anual en el aire ambiente <sup>44</sup>        |                             | 0.01-2            | 5-200             | x    | x                 | x    |
| US-EPA: Media aritmética máxima por 3 meses <sup>45,46</sup>      |                             | 1.5               | x                 | x    | x                 | x    |
| <b>Valores medios registrados en zonas urbanas e industriales</b> |                             |                   |                   |      |                   |      |
| Hamilton, Ontario Canadá (2001) <sup>47</sup>                     |                             | 0.15              | 110               | 5.72 | 0.14              | 15   |
| Los Ángeles California, USA (1998) <sup>48</sup>                  |                             | 0.15              | x                 | < 5  | x                 | x    |
| Anaheim California, USA (1998) <sup>48</sup>                      |                             | 0.12              | x                 | < 5  | x                 | x    |

Como se puede observar solo dos puntos de muestreo rebasaron la norma referente a la concentración máxima permisible en PST con 287.1 y 229.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , de los cuales presenta valores altos de plomo y hierro.

Los niveles de plomo encontrados en las tres muestras no superan los valores límites establecidos por la US-EPA ni los fijados por la OMS, no obstante, rebasan el orden de concentración de otras zonas urbanas con industria pesada (Hamilton, Ontario Canadá) <sup>47</sup> y con alto tráfico vehicular. Con respecto a la concentración de cromo el punto 5.6 presenta el valor mas alto con 235.7  $\text{ng}/\text{m}^3$ , el cual se encuentra por arriba del valor de la OMS.

El cadmio, cobre y hierro presentan concentraciones superiores a las ciudades con mismo tipo de industria las cuales superan los 66.9  $\text{ng}/\text{m}^3$ , 1.1 y 22.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

### **3.4 Análisis Elemental de las Muestras**

Como se mencionó anteriormente se realizó un análisis elemental a las muestras recolectadas de los puntos de muestreo, donde se les midió el contenido de carbono y azufre. En la tabla 14 se presentan los resultados de carbono y azufre de cada punto de muestreo del período comprendido de julio a septiembre. Las unidades que se manejaron son de microgramos sobre metro cúbico de aire. Se muestra que en el punto 10.3 la concentración mayor de azufre fue de 0.05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Con respecto al carbono el valor mas alto corresponde al punto 4.3 con 1.23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**TABLA 14**

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS MUESTRAS DE PST  
PARA EL PERÍODO JULIO-SEPTIEMBRE**

| MUESTREO 1 | CARBONO                  | AZUFRE |
|------------|--------------------------|--------|
|            | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |        |
| 1.1        | 0.66                     | 0.00   |
| 1.2        | 0.59                     | 0.00   |
| 1.3        | 0.36                     | 0.00   |
| 2.1        | 0.15                     | 0.00   |
| 2.2        | 0.16                     | 0.00   |
| 2.3        | 0.25                     | 0.00   |
| 3.1        | 0.13                     | 0.00   |
| 3.2        | 0.12                     | 0.00   |
| 3.3        | 0.23                     | 0.00   |
| 4.1        | 0.60                     | 0.00   |
| 4.2        | 1.05                     | 0.00   |
| 4.3        | 1.23                     | 0.00   |
| 5.1        | 0.26                     | 0.00   |
| 5.2        | 0.40                     | 0.00   |
| 5.3        | 0.29                     | 0.00   |
| 6.1        | 0.47                     | 0.00   |
| 6.2        | 0.65                     | 0.00   |
| 6.3        | 0.54                     | 0.00   |
| 7.1        | 1.10                     | 0.00   |
| 7.2        | 0.32                     | 0.00   |
| 7.3        | 0.00                     | 0.00   |
| 8.1        | 0.06                     | 0.02   |
| 8.2        | 0.06                     | 0.00   |
| 8.3        | 0.09                     | 0.01   |
| 9.1        | 0.00                     | 0.00   |
| 9.2        | 0.00                     | 0.03   |
| 9.3        | 0.00                     | 0.00   |
| 10.1       | 0.00                     | 0.00   |
| 10.2       | 0.08                     | 0.00   |
| 10.3       | 0.40                     | 0.05   |

En la tabla 15 se presentan los resultados del análisis elemental para el muestreo comprendido de octubre a diciembre donde en el punto 9.3 se

observa el valor superior de azufre con  $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en cambio para el carbono el punto con el máximo nivel de concentración es el punto 7.3 con  $13.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**TABLA 15**  
**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS MUESTRAS DE PST**  
**PARA EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE**

| MUESTREO 1 | CARBONO                  | AZUFRE |
|------------|--------------------------|--------|
|            | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |        |
| 1.1        | 0.00                     | 0.05   |
| 1.2        | 0.00                     | 0.02   |
| 1.3        | 0.00                     | 0.06   |
| 2.1        | 0.27                     | 0.00   |
| 2.2        | 0.00                     | 0.05   |
| 2.3        | 2.36                     | 0.14   |
| 3.1        | 0.00                     | 0.00   |
| 3.2        | 0.00                     | 0.00   |
| 3.3        | 0.00                     | 0.02   |
| 4.1        | 0.00                     | 0.09   |
| 4.2        | 0.00                     | 0.05   |
| 4.3        | 1.45                     | 0.13   |
| 5.1        | 0.11                     | 0.01   |
| 5.2        | 0.31                     | 0.03   |
| 5.3        | 0.00                     | 0.02   |
| 6.1        | 0.00                     | 0.00   |
| 6.2        | 1.90                     | 0.00   |
| 6.3        | 2.85                     | 0.09   |
| 7.1        | 10.26                    | 0.34   |
| 7.2        | 3.03                     | 0.14   |
| 7.3        | 13.83                    | 0.28   |
| 8.1        | 2.50                     | 0.07   |
| 8.2        | 2.22                     | 0.05   |
| 8.3        | 0.40                     | 0.19   |
| 9.1        | 2.60                     | 0.07   |
| 9.2        | 4.74                     | 0.41   |
| 9.3        | 10.15                    | 0.65   |
| 10.1       | 2.51                     | 0.16   |
| 10.2       | 1.13                     | 0.06   |
| 10.3       | 2.36                     | 0.16   |

En general se puede observar que en los dos muestreos comprendidos desde julio a diciembre, el azufre mostró valores bajos, sin embargo, éste se presenta en mayor proporción en el muestreo 2, en los puntos 7.1, 7.3 9.2 y 9.3. Para el carbono las máximas concentraciones se presentan en el muestreo 2 y los puntos mas altos en sentido descendente son 7.3, 7.1 y 9.3.

### **3.5 Análisis de los Filtros de PST por Microscopia Electrónica de Barrido con Microanálisis de Rayos X**

Debido a que en los resultados de los análisis de los filtros se observó una mayor predominancia, tanto de concentraciones de metales como de partículas suspendidas, solo en cuatro de ellos se les realizó un estudio por microscopia electrónica de barrido.

Para cada filtro se realizó un análisis detallado de las partículas de **tipo antropogénico** de mayor abundancia, representativo para cada muestra. Se consideraron un total de 50 partículas por muestra para el análisis químico por microsonda efectuado por microscopía electrónica.

### 3.5.1 Análisis Estadístico del SEM-EDS

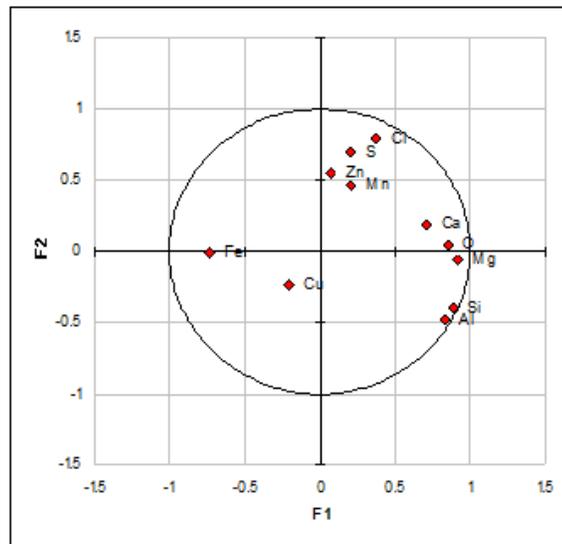
Para remarcar las asociaciones dominantes entre los elementos que constituyen a las muestras de polvo atmosférico, se realizó un análisis estadístico a partir del microanálisis puntual obtenido de 352 partículas de las cuatro muestras analizadas por Microscopía Electrónica (SEM-EDS).

A continuación se presenta la interpretación de las variables representadas en los planos factoriales.

1. Una variable esta bien definida cuando ella está próxima del borde del disco y menos definida cuando esta próxima al centro.
2. Dos variables bien definidas están en relación (variables asociadas) cuando sus representaciones gráficas dentro del disco están próximas una de otra.
3. Dos variables bien definidas, están en relación inversa (variables no asociadas) cuando sus representaciones graficas dentro del disco presentan una simetría con respecto al centro del disco.
4. Dos variables están bien definidas, cuando son independientes sus representaciones gráficas dentro del disco, presentan una rotación de 90°.

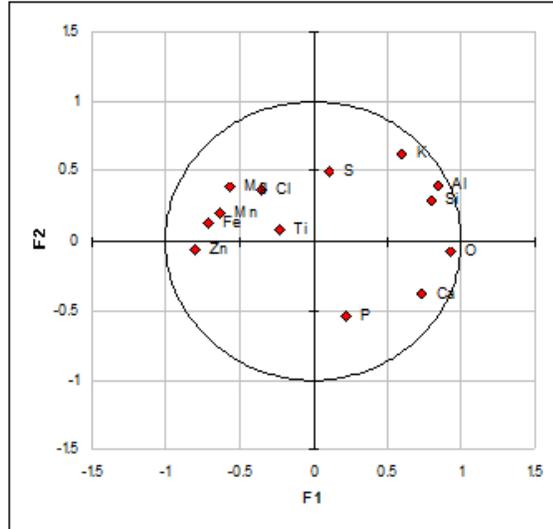
De las figura 34 a la 37 se presentan los resultados que se obtuvieron del análisis estadístico por componentes principales aplicados al microanálisis de los filtros 1.1, 2.1, 7.5 y 8.1, los cuales comprenden todo el período de muestreo, utilizando para ello el software Xlstat Pro.

En la figura 34 se muestra el plano factorial del punto 1 y se observa la presencia de las variables independientes de Fe y Cu correspondientes a partículas de óxidos de hierro y cobre metálico, lo cual está de acuerdo con los resultados observados por SEM-EDS.



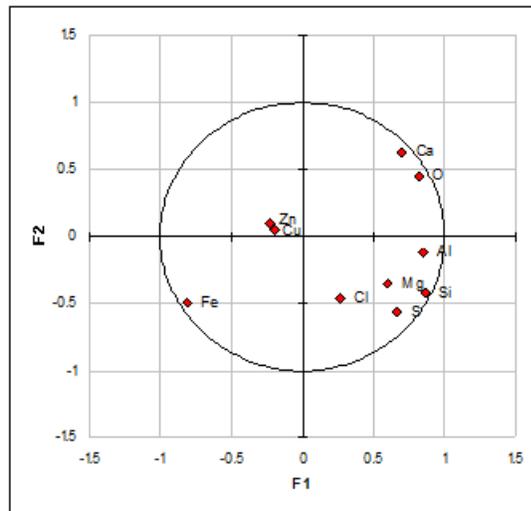
**Figura 34. Plano factorial para la muestra del punto 1.1**

En la figura 35 se presenta el plano factorial del punto 2 donde se observa la presencia de las variables dependientes de Ca-O correspondientes a la presencia de partículas de calcita. Además se observa la asociación de las variables Fe-Zn correspondientes a aglomerados de partículas finas, con la presencia de impurezas con contenidos de Mn, Mg y Cl.



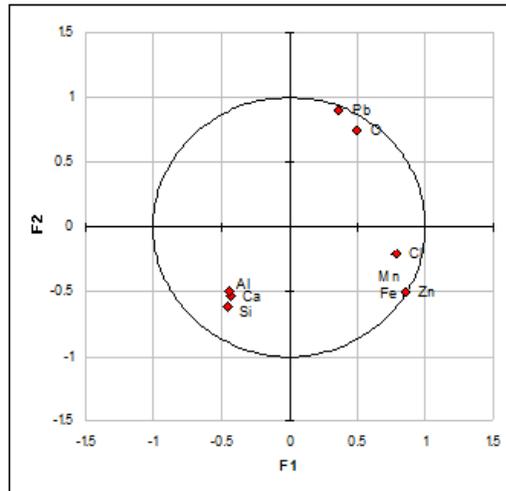
**Figura 35. Plano factorial para la muestra del punto 2.1**

En la figura 36 se presenta el plano factorial del punto 7 y se observa el Fe como variable independiente que corresponde a partículas de ferritas, asimismo, se observó la asociación de las variables de Ca-O correspondientes a partículas de calcita.



**Figura 36. Plano factorial para la muestra del punto 7.5**

En la figura 37 se presenta el plano factorial del punto 8 y se observa la presencia de las variables dependientes de Pb-O y Si, Al, Mg y Ca correspondientes a partículas de óxido de plomo y silicoaluminatos.



**Figura 37. Plano factorial para la muestra del punto 8.1**

### 3.5.2 Análisis Microestructural por SEM-EDS

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos de los filtros analizados por SEM-EDS, donde se utilizó el detector de electrones retrodispersados del SEM para distinguir las partículas ricas en elementos pesados del resto de las partículas correspondientes a otras fases.

La detección de las partículas se realiza por diferencias en el número atómico promedio lo cual se refleja en distintos tonos de grises asociados a cada fase con su particular constitución química.

Conjuntamente con SEM se empleó la técnica de Microanálisis por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X por Energía Dispersa (EDS) para los análisis químicos y determinar el o los elementos de mayor abundancia en cada partícula.

En las tablas 16 a 19 se presentan el análisis microestructural donde se muestra el porcentaje de abundancia, tamaño de las partículas y los metales que se encuentran en ellas. Posteriormente, se presenta las micrografías pertenecientes al punto de muestreo.

En la tabla 16 se observa del punto 1.1, una mayor predominancia de partícula ricas en hierro asociado con cloro con un 51.7% cuyo tamaño oscilaba de 2 a 15  $\mu\text{m}$ . Las partículas ricas en Hierro son originadas de procesos antropogénicos, originadas de procesos de industria de la transformación metal-mecánica.

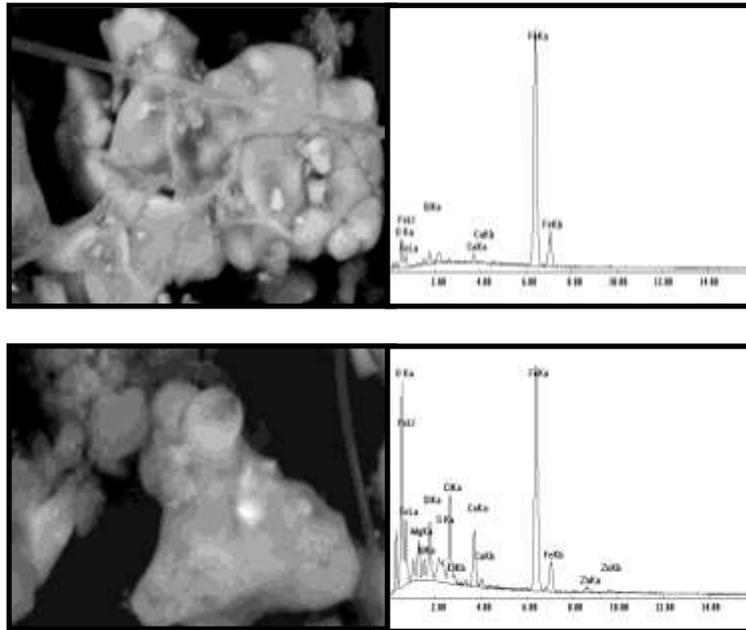
**TABLA 16**

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL PUNTO 1.1 POR SEM-EDS**

| <b>Partículas de origen antropogénico y ricas en Metales</b>  |                 |                      |                         |
|---|-----------------|----------------------|-------------------------|
| Ricas en Fe-Cl  | Ricas en Fe-O   | Ricas en Cu          | Ricas en Si-Al (Óxidos) |
| <b>Porcentaje de abundancia y relación de tamaño de las principales partículas analizadas por SEM-EDS</b> |                 |                      |                         |
| 51.7 %  | 27.6 %          | 13.8 %               | 6.9 %                   |
| $\geq 2 - 15 \mu\text{m}$   | 5 $\mu\text{m}$ | $\leq 3 \mu\text{m}$ | $\leq 10 \mu\text{m}$   |

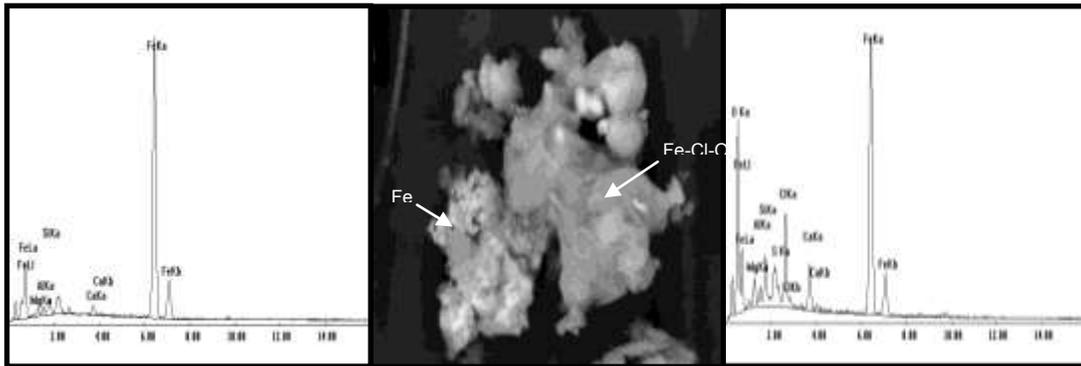
Nota- Se excluyen todas aquellas partículas naturales provenientes de la corteza terrestre (mayormente silicatos).

En la figura 38 se presenta la micrografía correspondiente a las partículas ricas en hierro con asociaciones a cobre y oxígeno, el tamaño que presentan es de 3 y 5  $\mu\text{m}$  presentando morfología irregular.



**Figura 38. Micrografía del punto 1.1 asociaciones de cobre y óxidos de hierro**

En la imagen de la figura 39 se muestra la presencia de las partículas ricas en hierro las cuales presentan texturas diferentes entre sí. Las partículas asociadas químicamente a cloro, se presentan en aglomerados de partículas grandes.



**Figura 39. Micrografía del punto 1.1 asociaciones de hierro con cloro**

En la tabla 17 se presenta los resultados obtenidos del punto 2.1, donde se observa una mayor predominancia de partículas ricas en hierro con asociaciones a zinc con un 74.4% cuyo tamaño de partícula oscila entre 2 a 7  $\mu\text{m}$ . También se puede observar agrupaciones con óxidos de calcio y de zinc.

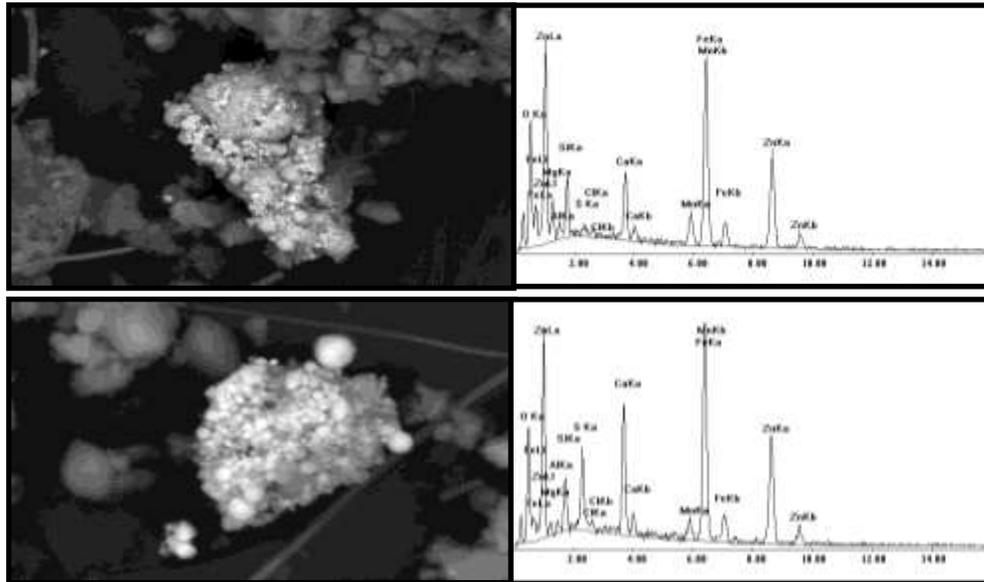
**TABLA 17**

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL PUNTO 2.1 POR SEM-EDS**

| <b>Partículas de origen antropogénico y ricas en Metales</b>  |                         |                      |
|---|-------------------------|----------------------|
| Ricas en Fe-Zn  | Ricas en Ca-O (Calcita) | Ricas en Zn-O        |
| <b>Porcentaje de abundancia y relación de tamaño de las principales partículas analizadas por SEM-EDS</b> |                         |                      |
| 74.4 %  | 23.3 %                  | 2.3 %                |
| $\geq 2 - 7 \mu\text{m}$  | $\leq 3 \mu\text{m}$    | 5 - 10 $\mu\text{m}$ |

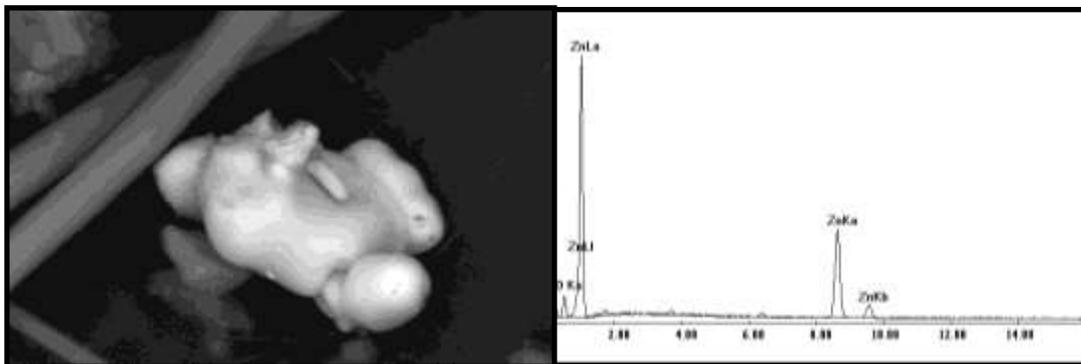
Nota- Se excluyen todas aquellas partículas naturales provenientes de la corteza terrestre (mayormente silicatos).

En la figura 40 se presenta la micrografía correspondiente al punto 2 donde se encontraron aglomerados de partículas ultrafinas menores a  $1\mu\text{m}$  ricas en Fe-Zn, las cuales pueden ser originadas de procesos de industrias acereras.



**Figura 40. Micrografía del punto 2.1 asociaciones de hierro con zinc**

Asimismo en la figura 41 se muestra la presencia de partículas óxidos Zinc con textura lisa y morfología redondeada, su origen posiblemente está asociado a fundiciones de aluminio-bronce.



**Figura 41. Micrografía del punto 2.1 asociaciones de oxido de zinc**

En la tabla 18 se observa del punto 7.5 una mayor predominancia de partículas ricas en óxidos de calcio y hierro con porcentajes de abundancia de 51.7% y 48.3% y tamaños de partículas menores a 5  $\mu\text{m}$ .

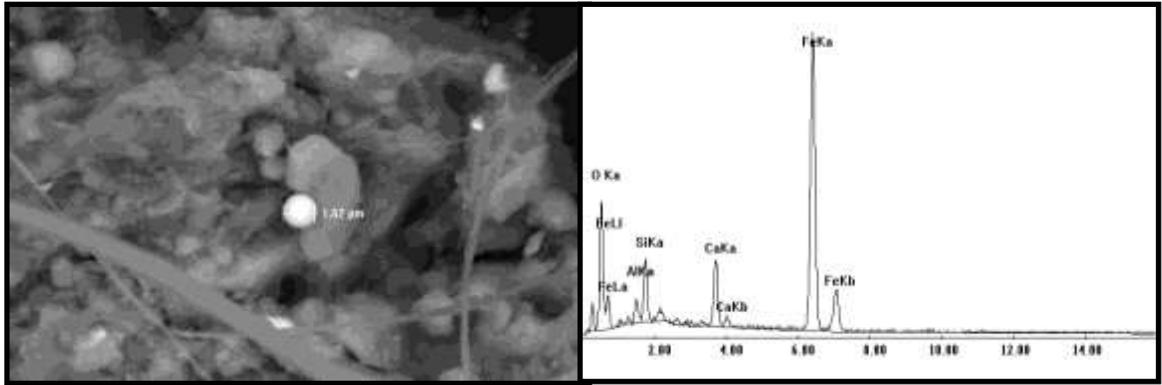
**TABLA 18**

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL PUNTO 7.5 POR SEM-EDS**

| <b>Partículas de origen antropogénico y ricas en Metales</b>  |                                |
|---|--------------------------------|
| <b>Ricas en Fe-O</b>  | <b>Ricas en Ca-O (Calcita)</b> |
| <b>Porcentaje de abundancia y relación de tamaño de las principales partículas analizadas por SEM-EDS</b> |                                |
| 48.3 %  | 51.7 %                         |
| $\leq 5 \mu\text{m}$  | $\leq 4 \mu\text{m}$           |

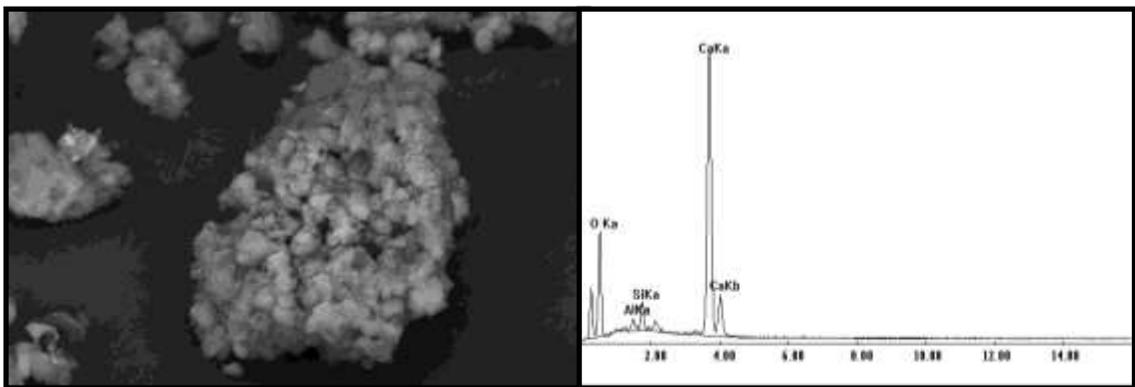
Nota- Se excluyen todas aquellas partículas naturales provenientes de la corteza terrestre (mayormente silicatos).

En la figura 42 se presenta la micrografía correspondiente al punto 7, donde el grupo de partículas con elementos pesados de mayor abundancia corresponde a partículas finas de óxido de hierro (Fe-O), las cuales presentan una morfología esferoidal, con algunas impurezas en su composición química de Si, Al, Mg y Ca. El origen de este tipo de partículas puede estar asociado a la industria acerera o de fundición.



**Figura 42. Micrografía del punto 7.5 asociaciones de óxidos de hierro**

Asimismo, en la figura 43 se observa abundancia de partículas ricas en Ca, correspondientes a partículas muy finas de calcita, las cuales llegan a formar aglomerados mayores a 15  $\mu\text{m}$ . Por el tipo de tamaño fino, se considera que este tipo de partículas provienen de un proceso de trituración de piedra caliza.



**Figura 43. Micrografía del punto 7.5 asociaciones de óxidos de hierro**

En la tabla 19 se observa del punto 8.1 una mayor predominancia de partículas ricas en óxidos de plomo y calcio para el punto 8, con porcentajes de abundancia de 66.7% y 33.3% y cuyo tamaño de partículas son menores a 6  $\mu\text{m}$ .

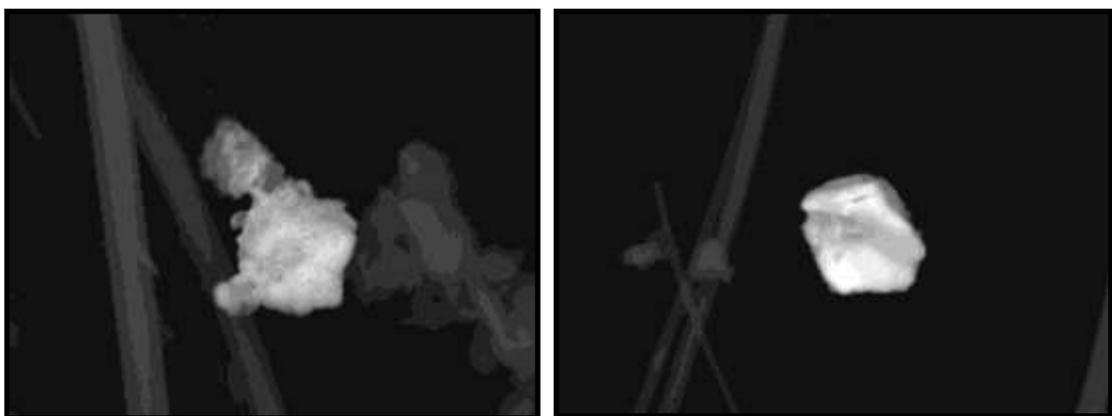
**TABLA 19**

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL PUNTO 8.1 POR SEM-EDS**

| <b>Partículas de origen antropogénico y ricas en Metales</b>  |                         |
|---|-------------------------|
| Ricas en Pb-O   | Ricas en Ca-O (Calcita) |
| <b>Porcentaje de abundancia y relación de tamaño de las principales partículas analizadas por SEM-EDS</b> |                         |
| 66.7 %  | 33.3 %                  |
| ≤6 μm   | ≤4 μm                   |

Nota- Se excluyen todas aquellas partículas naturales provenientes de la corteza terrestre (mayormente silicatos).

En la figura 44 muestra la micrografía del punto 8, donde las partículas de mayor abundancia ricas en elementos pesados, corresponden a óxido de plomo de morfología irregular y facetada, las cuales presentan tamaños en su mayoría menores a 10 μm. Este tipo de partículas son originadas posiblemente del reciclado de baterías automotrices, como también fabricación de pigmentos.



**Figura 44. Micrografía del punto 8.1 asociaciones de óxidos de plomo**

Recapitulando se tiene que en los puntos 1.1, 2.1 y 8.1 se observó que la mayor abundancia corresponden a partículas ricas en Si, Al, Mg, O, de lo contrario en el punto 7.5, en la cual se observó una gran abundancia de partículas de calcita. Sin embargo, en las 4 muestras se determinaron grupos de partículas ricas en elementos pesados o de mayor abundancia para cada muestra proveniente de origen antropogénico. En la tabla 20 se muestra un resumen de los resultados que se obtuvieron del SEM-EDS para cada punto de muestreo.

**TABLA 20**  
**RESUMEN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS POR SEM-EDS**

| <b>Punto</b> | <b>Fecha</b> | <b>Observación</b>   |
|--------------|--------------|--|
| <b>1.1</b>   | 21/07/2006   | Se encontraron partículas ricas en Fe de origen antropogénico, de morfología irregular, asociadas químicamente a cloro, y con tamaño promedio de partícula a 5 $\mu\text{m}$ .   |
| <b>2.1</b>   | 08/09/2006   | Se observaron aglomerados de partículas ricas en Fe-Zn, de tamaño ultrafino menor a 1 $\mu\text{m}$ , de morfología esferoideal.   |
| <b>7.5</b>   | 13/11/2006   | Se localizaron partículas de calcita de tamaño individual menor a 3 $\mu\text{m}$ , provenientes de algún proceso antropogénico por su tamaño fino y abundancia relativa. Asimismo se observaron partículas de óxido de hierro (ferritas) de morfología esferoideal y de tamaño promedio menor a 5 $\mu\text{m}$ . |
| <b>8.1</b>   | 08/09/2006   | Se hallaron partículas de óxido de plomo de morfología regular e irregular de tamaño individual promedio de 6 $\mu\text{m}$ .  |

### **3.6 Evaluación Quimiométrica de Resultados Analíticos**

Los métodos estadísticos de variables múltiples más usados en la investigación del ambiente son el análisis de factores y el análisis por agrupamiento y se fundamentan en el análisis simultáneo de las variables (parámetros químicos y físicos) y objetos (puntos de muestreo) que conforman la matriz de datos. Para la evaluación estadística de la matriz de datos se utilizó el análisis de factores y análisis por agrupamiento.

#### **3.6.1 Análisis de Factores**

Como ya se menciona antes, el objetivo del análisis de factores es determinar la correlación entre las variables, los pasos que se siguieron fueron primeramente estandarizar la matriz de datos (cada variable tiene una media 0 y la desviación estándar es de  $\pm 1$ ). Se obtuvo la matriz de correlación, se determinó el número de factores, se extrajo la matriz de las cargas de los factores, y por último se obtuvo los valores de los factores.

En las figuras 45 a 47 se presentan primeramente los resultados del análisis de factores del primer periodo de muestreo y en las figuras 48 a 50 se muestran los resultados del segundo período de muestreo.

### 3.6.1.1 Primer Muestreo

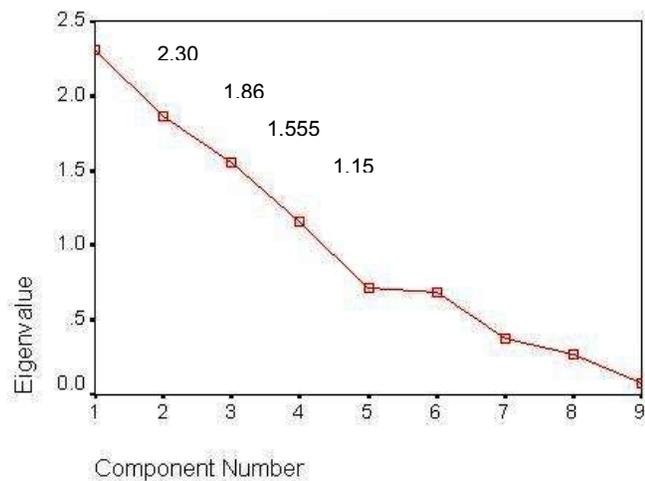
En la figura 45 se presenta la matriz de correlación del análisis de factores para el primer muestreo comprendido de julio a septiembre.

**Correlation Matrix**

|                 | PB   | MG   | ZN   | CD   | CU   | MN   | FE   | K    | CR   |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sig. (1-tailed) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| PB              |      | .240 | .162 | .177 | .269 | .377 | .369 | .282 | .352 |
| MG              | .240 |      | .222 | .377 | .163 | .180 | .022 | .003 | .280 |
| ZN              | .162 | .222 |      | .422 | .228 | .053 | .257 | .076 | .311 |
| CD              | .177 | .377 | .422 |      | .011 | .007 | .420 | .488 | .000 |
| CU              | .269 | .163 | .228 | .011 |      | .023 | .121 | .242 | .180 |
| MN              | .377 | .180 | .053 | .007 | .023 |      | .050 | .425 | .003 |
| FE              | .369 | .022 | .257 | .420 | .121 | .050 |      | .228 | .298 |
| K               | .282 | .003 | .076 | .488 | .242 | .425 | .228 |      | .084 |
| CR              | .352 | .280 | .311 | .000 | .180 | .003 | .298 | .084 |      |

**Figura 45. Matriz de correlación de los metales**

En la figura 46 se muestra la grafica de los valores propios para cada uno de los factores. Esta grafica sirve para elegir el número de factores a extraer, el criterio utilizado elegir solo aquellos que poseen un valor propio igual o mayor a 1. Como se muestra en esta figura, para la base de datos del muestreo comprendido julio a septiembre del 2006 se extraen cuatro factores que representan un total de 76% varianza explicada.



**Figura 46. Determinación del número de factores a extraer**

En la figura 47 se presentan los resultados de los valores de los factores arrojados partir de la matriz de datos de las concentraciones de metales, se observan 4 grupos principales, donde el F1 esta compuesto por cadmio y cromo, el F2 de cobre, manganeso y hierro, el F3 magnesio, hierro y potasio y por ultimo el F4 integrado por plomo y zinc.

En el **F1 (Cr, Cd)** predomina en los puntos (9.1, 10.1, 10.3) a este factor se le pueden asociar actividades de la industria minera como son la extracción de metales, debido a que en el punto de muestreo fue utilizado como un sitio de almacenamiento del material extraído.

En el **F2 (Fe, Cu, Mn)** predomina en los puntos (1.1, 1.3, 7.3, 10.3), estos metales son típicos de descargas de industrias Metal- Mecánica como son industrias del acero y procesado de materiales ferrosos.

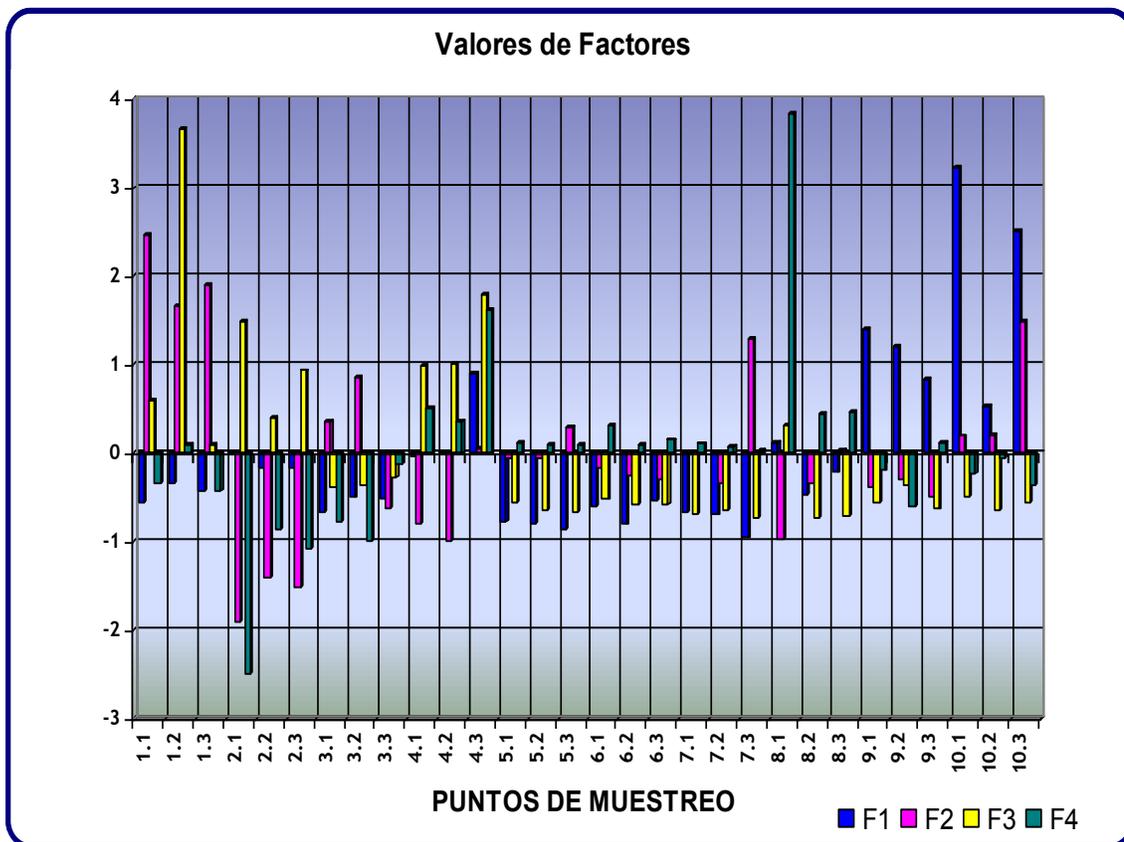


Figura 47. Valores de factores del muestreo comprendido julio a septiembre

En el **F3 (Mg, Fe, K)** se encuentra en los puntos (1.2, 2.1, 4.3), donde los metales observados podrían ser de origen natural, por contaminación difusa debida a la erosión eólica, y por obras públicas de construcción que se realizaron en los puntos de muestreo, los cuales pueden estar relacionados a actividades de extracción de minerales.

Y en el **F4 (Pb, -Zn)** predomina en los puntos (2.1, 4.3, 8.1). Los metales pertenecientes a este factor se pueden asociar a diferentes actividades industriales. Como son la producción de óxido de zinc y sulfato de zinc, como

también puede ser propiciada por industrias del tipo de fabricación de pigmentos, colorantes y óxidos de plomo.

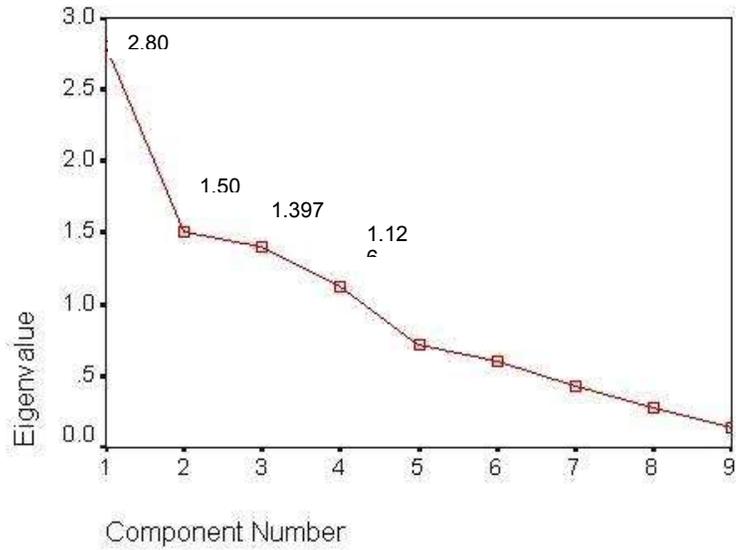
### 3.6.1.2 Segundo Muestreo

En la figura 48 se presenta la matriz de correlación del análisis de factores para el segundo muestreo comprendido de octubre a diciembre.

|                 | PB   | MG   | FE   | ZN   | K    | CR   | CD   | CU   | MN   |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sig. (1-tailed) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| PB              |      | .447 | .241 | .340 | .103 | .127 | .143 | .336 | .406 |
| MG              | .447 |      | .028 | .027 | .246 | .331 | .404 | .051 | .015 |
| FE              | .241 | .028 |      | .000 | .002 | .362 | .012 | .400 | .177 |
| ZN              | .340 | .027 | .000 |      | .005 | .126 | .000 | .488 | .360 |
| K               | .103 | .246 | .002 | .005 |      | .381 | .001 | .354 | .184 |
| CR              | .127 | .331 | .362 | .126 | .381 |      | .350 | .300 | .083 |
| CD              | .143 | .404 | .012 | .000 | .001 | .350 |      | .139 | .403 |
| CU              | .336 | .051 | .400 | .488 | .354 | .300 | .139 |      | .383 |
| MN              | .406 | .015 | .177 | .360 | .184 | .083 | .403 | .383 |      |

**Figura 48. Matriz de Correlación de los metales**

En la figura 49 se muestran los valores propios de los cuatro componentes que se obtuvieron a partir de la elección de los valores de los factores la cual explica un total de 75% de varianza.



**Figura 49. Determinación del número de factores a extraer**

En la figura 50 se presentan los resultados de los valores de los factores arrojados partir de la matriz de datos de las concentraciones de metales, donde se pueden observar 4 grupos principales, donde el F1 esta compuesto por zinc, potasio, hierro y cadmio, el F2 de plomo y cromo el F3 magnesio, cromo y manganeso; y por ultimo el F4 integrado por cobre y magnesio.

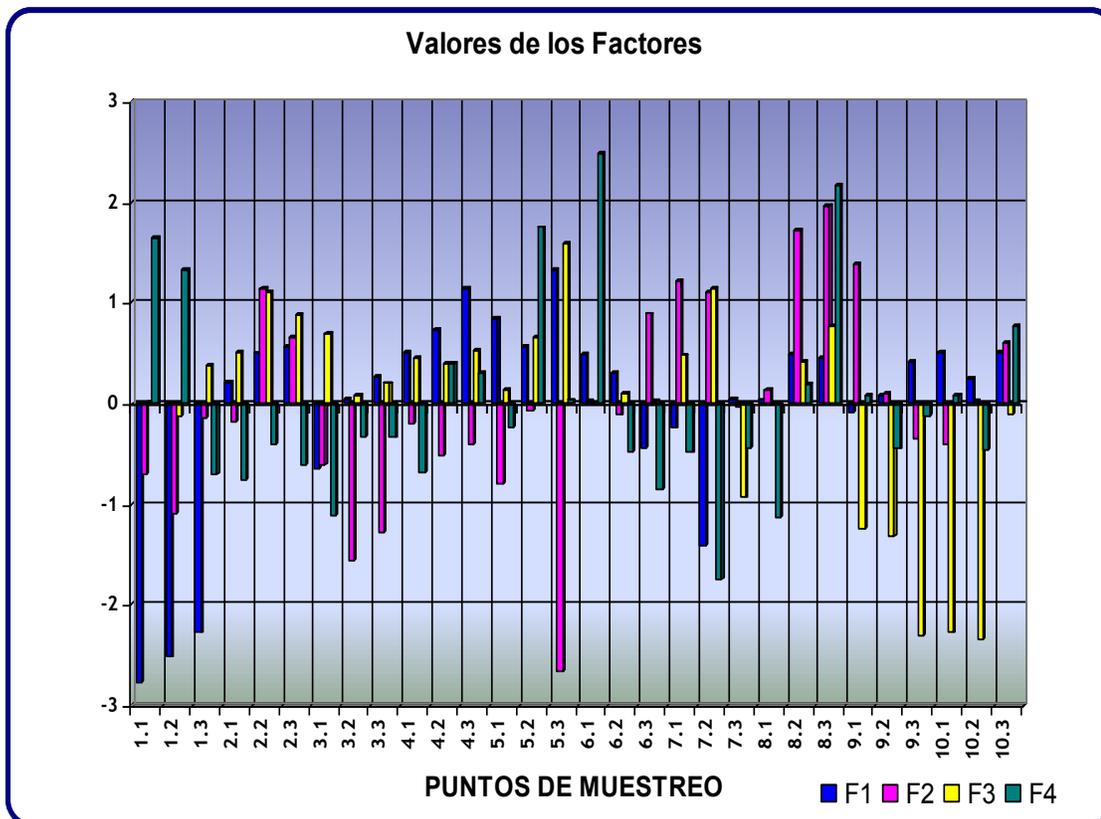


Figura 50. Valores de factores del muestreo comprendido octubre a diciembre

En el **F1 (Zn, K, -Fe, -Cd)** predomina en los puntos (1.1, 1.2, 1.3, 7.2) en este factor se encuentran presentes los metales hierro y cadmio, los cuales son típicos de descargas de industrias Metal-Mecánica como son industrias del acero y procesamiento de materiales ferrosos. Por otro lado, en los puntos (4.3, 5.3) presentaron una mayor abundancia de zinc y potasio.

En el **F2 (Pb, -Cr)** el plomo predomina en los puntos (2.2, 8.2, 8.3, 9.2) donde se pueden asociar a industrias del tipo de fabricación de pigmentos, colorantes y óxidos de plomo, y el cromo en el punto (5.3) por contaminación

difusa debida a la erosión eólica debido a que ese punto esta ubicado en zona habitacional.

En el **F3 (-Mn)** se encuentra principalmente en los puntos (9.1, 9.2, 9.3, 10.1,10.2), por contaminación difusa debida a la erosión eólica, y por obras publicas de construcción que se realizaron en los puntos de muestreo, los cuales pueden estar relacionados a actividades de extracción de minerales.

Y en el **F4 (Cu, -Mg)** el magnesio predomina en los puntos (1.2, 1.3, 5.2, 6.1, 9.1) y cobre en el punto (7.3) en estos puntos se realizan trabajos de procesado de materiales ferrosos. La presencia de magnesio también indica contaminación de origen natural por dispersión del aire.

Cabe señalar que el signo negativo de la contribución del metal tiene como significado que existe un aumento ese factor. Mientras que el otro disminuye por causa de este mismo efecto.

### 3.6.2 Análisis por Agrupamiento

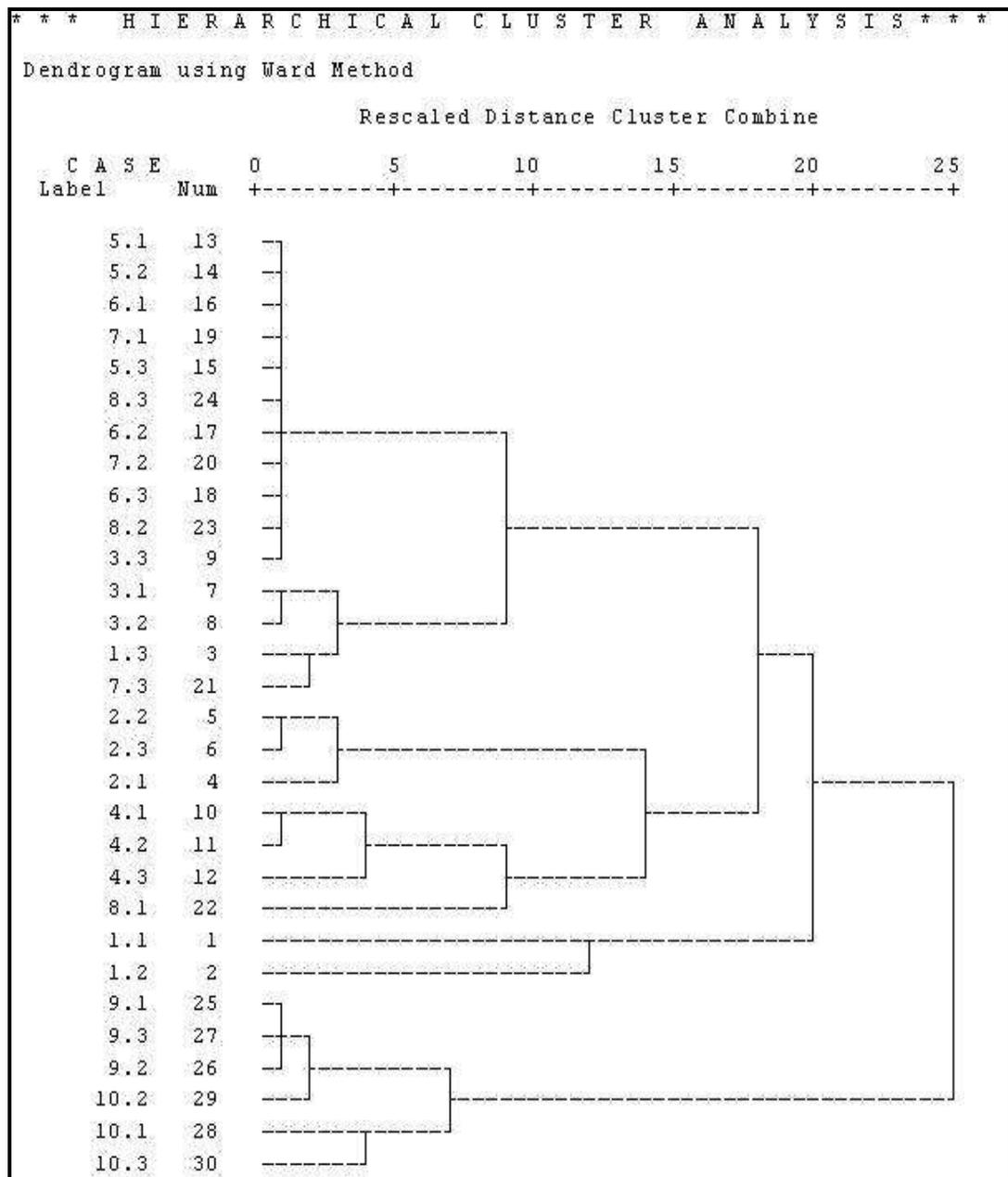
El objetivo del análisis por agrupamiento es agrupar objetos que se encuentren próximos en el espacio de las variables, los pasos que se siguieron fue el cálculo de la distancia entre dos puntos en el espacio (Distancia Euclideana), el cálculo de la distancia entre conglomerados (Método de Ward) y por último la obtención del Dendrograma.

### 3.6.2.1 Primer Muestreo

En la figura 51 se presenta el dendrograma del primer muestreo. El cual muestra 3 grupos importantes que se describen a continuación.

El grupo 1 está constituido por dos subgrupos integrados por los puntos de muestreo (3.3- 5.3), los cuales muestran un menor valor de los Factores, dando como resultado que están por debajo de la media con respecto a todos los puntos analizados. El otro subgrupo lo integra 3.1, 3.2, 1.3 y 7.3 donde prevalece el factor 2 como predominante.

El grupo 2 se subdivide en 3 subgrupos: el *primer* subgrupo está integrado por los puntos (2 y 4), donde se encuentran valores del Factor 3 y 4 donde predomina el Pb, Zn, Mg, Fe, K, el *segundo* subgrupo se encuentra en el punto 8.1, los cuales muestran a la vez los mayores valores del Factor 4 donde predomina el Pb y el *tercer subgrupo* está formado por los puntos 1.1 y 1.2, donde se observa la fusión de 2 factores integrados por el Factor 2 y 3 (Fe, Cu, Mn, Mg, K).



**Figura 51. Dendrograma del análisis por agrupamiento del muestreo comprendido julio a septiembre**

Y por ultimo, el grupo 3 se forman dos subgrupos: el *primero* es integrado por el punto 9 se encuentra predominantemente el Factor 1, mientras que en *segundo* está conformado por el punto 10 donde existe la mezcla del Factor 1 y 2 (Cr, Cd, Cu, Fe, Mn)

### 3.6.2.2 Segundo Muestra

En la figura 52 se muestra el dendrograma de la distribución del segundo periodo de muestreo.

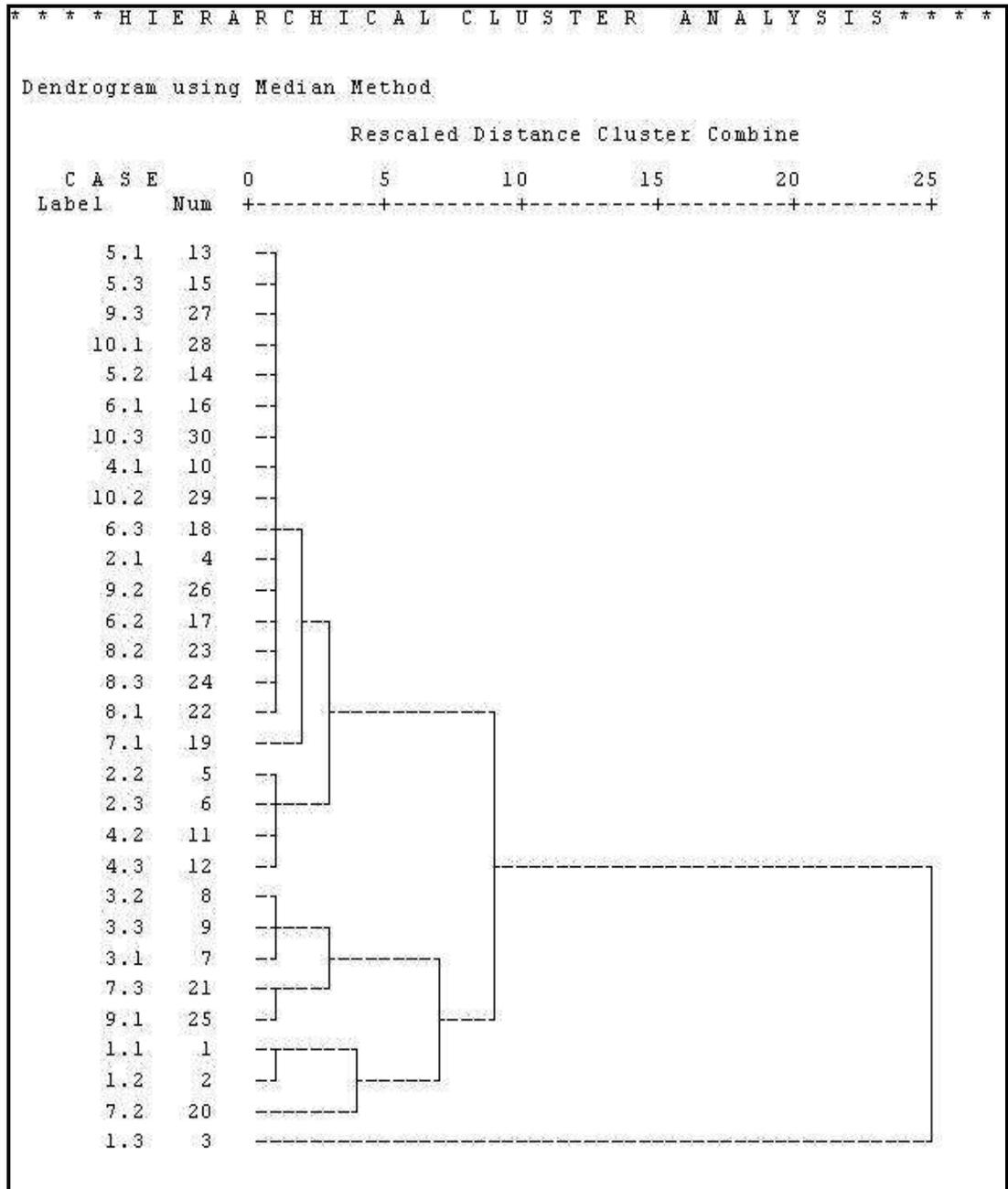
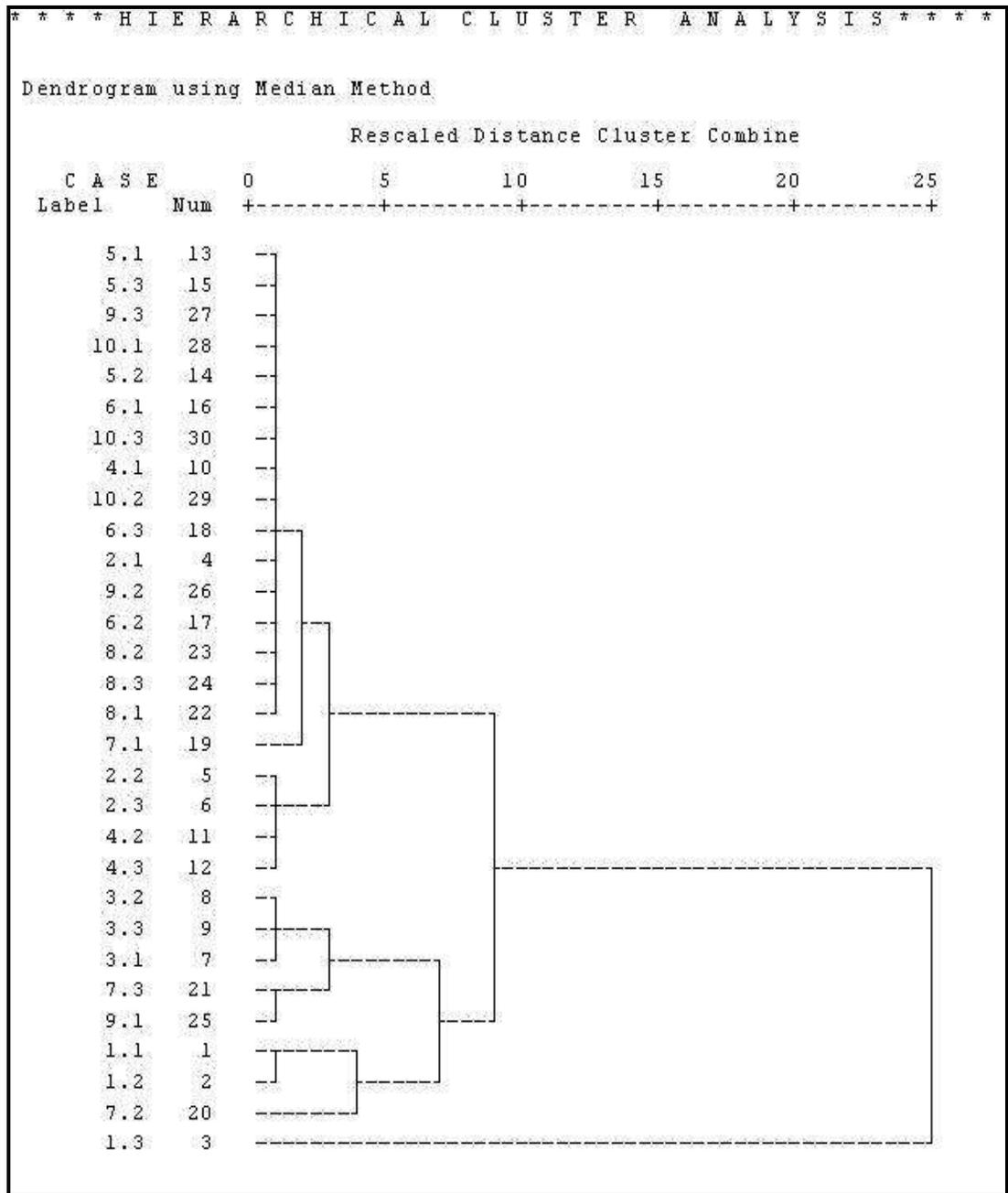


Figura 52 En la figura 52 se muestra el dendrograma de la distribución del segundo periodo de muestreo.



**Figura 53IC [52]. Dendrograma del análisis por agrupamiento del muestreo comprendido octubre a diciembre**

El grupo 1 está constituido por los puntos de muestreo (5.1 al 7.1), los cuales muestra un menor valor de los Factores, dando como resultado que están por debajo de la media con respecto a todos los puntos analizados.

Mientras que los puntos 5.2, muestra predominancia de los factores 1, 2, y 3 mientras que (7.1, 8.1- 8.3) esta presente el factor 2 y 4.

El segundo grupo prevalece los bajos valores de los factores con respecto a la media en los puntos 2.2 al 4.3.

El tercer grupo esta integrado por 2 subgrupos, el *primer* subgrupo compuesto de los puntos (3.2 al 9.1) mostrando una mezcla de los factores 2 y 3. El *segundo* subgrupo integrado por los puntos del (1.1 al 1.3) en los cuales se presentan la combinación de los 4 factores.

Cabe destacar que los factores denominados del 1 al 4 corresponde los que se obtuvieron del análisis de factores los cuales quedaron de la siguiente manera, F1 (Zn, K, -Fe, -Cd), F2 (Pb, -Cr), F3 (-Mn), y F4 (Cu, -Mg).

Mediante el análisis por agrupamiento se logró corroborar la composición de los cuatro factores, obtenidos por el anterior análisis, dando como resultado tres grupos para el periodo comprendido de julio a diciembre, los cuales expresan la semejanza que existe entre puntos de muestreo y entre grupos de acuerdo a las proximidades entre ellos.

## CONCLUSIONES

En este estudio se llevó acabo la caracterización química y morfológica de 60 muestras de material particulado atmosférico del Área Metropolitana de Monterrey, las cuales se tomaron de julio de diciembre de 2006. Durante este período se presentaron nueve superaciones al valor máximo permisible por la norma NOM-025-SSA1-1993, los cuales se presentaron principalmente en otoño, coincidiendo con los meses en el que existe una mayor estabilidad atmosférica en la ciudad.

Los resultados de esta investigación revelaron zonas impactadas significativamente con respecto a la media existente en el área metropolitana, donde se puede observar que los valores de concentración máxima de Plomo se encontraron en el punto 8.1, están por debajo de las normas oficiales tanto Mexicanas como de la EPA donde el límite máximo permisible es de  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , obteniendo como valor máximo  $1.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Por otro lado, se encuentran valores mayores de concentraciones de hierro en el punto 1.1, con  $22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en comparación con valores medios encontrados de ciudades industriales como es el caso de Hamilton, Ontario Canadá, donde reporta un valor de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Con respecto a la concentración de cromo el punto 5.6 presenta el valor alto con  $235.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ , el cual se encuentra por arriba del valor de la OMS que es  $5\text{-}200 \text{ ng}/\text{m}^3$ .

Respecto a las condiciones meteorológicas que han tenido lugar durante el periodo de estudio, las mayores acumulaciones de lluvia predominaron en el mes de septiembre en los puntos 8 y 9. Mientras que las temperaturas promedio oscilaban alrededor de los 24°C. Las velocidades de viento tenían un promedio de 7 km/h provenientes del Este. Sin embargo, se logró observar que las mayores concentraciones alcanzadas en los puntos de muestreo posiblemente se debieron a la baja humedad relativa existente, junto con las altas velocidades de viento y direcciones provenientes del oeste que propiciaban una acumulación de contaminantes atmosféricos a escala local.

Para los dos muestreos el azufre mostró valores bajos, sin embargo, éste se presenta en mayor proporción en el muestreo 2, en los puntos 7.1, 7.3, 9.2 y 9.3. Para el carbono las máximas concentraciones se presentan en el muestreo 2 y la máxima concentración obtenida de carbón elemental se registró en el punto 7.3 durante el período comprendido de octubre a diciembre con 13.63  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Mediante la aplicación de las herramientas quimiométricas de los 9 metales analizados se detectó la contribución de cuatro factores o fuentes principales a los niveles de PST para los dos períodos de muestreo. Los factores hallados mediante este procedimiento para el período de julio a septiembre son, F1 (Cr, Cd), F2 (Fe, Cu, Mn), F3 (Mg, Fe, K), F4 (Pb, -Zn) y el muestreo comprendido de octubre a diciembre los factores se componían de F1 (Zn, K, -

Fe, -Cd), F2 (Pb, -Cr), F3 (-Mn), F4 (Cu, -Mg). Los metales asociados a los factores 1, 2 y 4 del primer muestreo, así como los asociados a todos los factores del segundo muestreo indican que las fuentes de contaminación del AMM son principalmente de origen antropogénico y se deben a actividades como, procesos de metalúrgicos, procesado de materiales ferrosos, pinturas y pigmentos, procesado de minerales, origen difuso por actividades de construcción y tránsito vehicular. El factor 3 del primer muestreo indica una importante contribución de origen natural, debido a la baja cobertura vegetal del AMM se propicia por la erosión eólica.

Mediante el análisis por agrupamiento se logró corroborar la composición de los factores obtenidos por el análisis de factores dando como resultado tres grupos principales para los dos muestreos realizado, los cuales están agrupados debido a la similitud de las concentraciones existentes entre cada punto muestreado, dando como resultado el mismo origen de contaminación propuesto para el anterior análisis quimiométrico.

El estudio de cuatro muestras por SEM-EDS mostró la presencia de partículas de origen antropogénico, ricas en hierro de origen antropogénico, de morfología irregular, asociadas químicamente a cloro, y con tamaño promedio de 5  $\mu\text{m}$ , el posible origen es de procesos de industria de la transformación metal-mecánica.

Aglomerados de partículas ricas en Fe-Zn, de tamaño ultrafino  $<1 \mu\text{m}$ , de morfología esferoidal, pueden ser originadas de procesos de industrias acereras.

También se observaron partículas óxidos Zinc con textura lisa y morfología redondeada, cuyo tamaño era  $<10 \mu\text{m}$ , su origen posiblemente está asociado a fundiciones de aluminio-bronce. Además se encontraron partículas de calcita de tamaño individual  $<3 \mu\text{m}$ , provenientes de algún proceso antropogénico por su tamaño fino y abundancia relativa.

Asimismo, se observaron partículas de óxido de hierro (ferritas) de morfología esferoidal y de tamaño promedio  $<5 \mu\text{m}$ , el origen de este tipo de partículas puede estar asociado a la industria de fundición. También se descubrieron partículas de óxido de plomo de morfología regular e irregular de tamaño individual promedio de  $6 \mu\text{m}$ , este tipo de partículas son originadas posiblemente del reciclado de baterías automotrices, como también fabricación de pigmentos.

Cabe mencionar que el análisis por SEM-EDS sirvió como una herramienta adicional para analizar el contenido de los metales en los filtros muestreados de PST y el resultado de ello corrobora el estudio realizado por el análisis quimiométrico, obteniéndose el mismo posible origen de contaminación para las muestras analizadas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alfaro Barbosa, J.M., Limón Rodríguez, B., Martínez Turanzas, G.A., Ramos Granados, Ma. M., Reyes Amescua, J.M., Tijerina Medina, G. (2001): Ciencias del Ambiente, Editorial CECSA, México.
2. Lacazaña-Navarro, M., Aguilar-Garduño, C., Romieu, I, (1999): Evolución de la contaminación del aire e impacto ambiental de los programas de control en tres mega ciudades de América Latina. Salud Pública / Vol. 41, No. 3.
3. Eco Sitio. Contaminación Atmosférica. Disponible en World Wide Web: <http://www.eco-sitio.com.ar/pagina2.htm> Consulta: 30-01-07
4. Programa para mejorar la calidad del aire en el valle de México 1995-2000. PACADAMM
5. Instituto Nacional de Ecología. Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos. Disponible en World Wide Web: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/396/tipos.html> Consulta:13-02-07
6. Diario Oficial de la Federación (1994): NOM-020-SSA1-1993, Consulta: 01-07-06
7. Diario Oficial de la Federación (1994): NOM-021-SSA1-1993, Consulta: 01-07-06
8. Diario Oficial de la Federación (1994): NOM-022-SSA1-1993, Consulta: 01-07-06
9. Diario Oficial de la Federación (1994): NOM-023-SSA1-1993, Consulta: 01-07-06
10. Diario Oficial de la Federación (1994): NOM-025-SSA1-1993, Consulta: 01-07-06

11. Diario Oficial de la Federación (1994): NOM-026-SSA1-1993, Consulta: 01-07-06
12. Lomelí R. Maria Guadalupe, Tamayo O Ramón. Contaminación Atmosférica. Disponible en World Wide Web: <http://www.sagan-gea.org/hojared/CAtm.html> Consulta: 25-08-06
13. SIMA: Banco de datos. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), de la Agencia de protección al medio ambiente, del estado de Nuevo León.
14. Martínez Turanzas G.A. (1999): Ecología Urbana, Isla Urbana de Calor, Tesis Doctoral, Universidad de Colorado.
15. Carter, W.P.L., Lou, D. and Malkina, I.L. (2000): Investigation of the Atmospheric Ozone Formation, Potential of Selected Compounds, Report to the Eastman Chemical Corporation, University of California, Riverside, California.
16. Carter, W.P.L., Lou, D. and Malkina, I.L. (2000): Investigation of the atmospheric ozone formation potential of selected carbonates, Report to ExxonMobil Chemical Company, University of California, Riverside, California.
17. Kumar, P. and Mohan, D. (2002): Photochemical smog: mechanism, ill-effects, and control: TIDEE (TERI Information Digest on Energy and Environment). Volume 1, Number 3.
18. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA). Disponible en World Wide Web: [http://www.nl.gob.mx/?P=med\\_amb\\_mej\\_amb\\_sima](http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima) Consulta: 22-08-06
19. Donalson, K., Brown, D.M., Mitchell, C., Dineva, M., Beswick, P.H. Gilmour and MacNee W. (1997): Free Radical Activity of PM10: Iron Generation of Hydroxyl Radicals, Environ. Health Perspect, 105, 1285-1290.

20. Schwartz J, Dockery DW (1992). Particulate air pollution and daily mortality in Steubenville, Ohio. *Am J Epidemiol* 1992; 135:12-19.
21. Montoya, J.M., Blanco, E., Fuentes, A., Torres, L., Aldape, F., Flores J., Díaz, R.V.: (1999). Caracterización de partículas sólidas PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub> en la atmósfera de la ZMM. *CIENCIA UANL / VOL. 11, NO. 3, ABRIL-JUNIO 99*.
22. Juana Maria Montoya Zamora. Análisis de factores aplicados a datos de composición elemental de materia particulada suspendida en la zona Noroeste de la Ciudad de Monterrey (1999). Tesis de Maestría en Ciencia con especialidad en Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
23. Ki-Hyun Kima, Jin-Hong Leeb, Mi-Suk Jangb. 2002. Metals in airborne particulate matter from the first and second industrial complex area of Taejon city, Korea. Department of Geoinformation Sciences, Sejong University, South Korea and Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Gung Dong, Taejon, South Korea. *Environmental Pollution* 118 (2002) 41–51. Elsevier.
24. Zabalza, J.; 1Santamaría, J.M.; Alastuey, A.; Querol, X. 2004, "Diagnóstico de contribución de fuentes en PM<sub>10</sub> en la zona urbana de Altsasu/Alsasua: niveles y composición de PM<sub>10</sub>" *1Universidad de Navarra. Dpto. Química y Edafología, 2Instituto de Ciencias de la Tierra Jaime Almera (CSIC)*.
25. Ki-Hyun Kima,\* , Bae-Jin Choib, Seong-Taek Yunc, Sun-Jin Hwangd.2004. Studies of spatial and temporal distribution characteristics of TSP-bound trace metals in Seoul, Korea Department of Earth and Environmental Sciences, Sejong University, Department of Chemistry, Dongguk University, Seoul 100-715, Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, South Korea, College of Environment and Applied Chemistry, Kyunghee University, South Korea, Environmental Pollution, 127(2004) 323-333. Elsevier.
26. David A. Olson, \* Garya. Norris, Matthews. Landis and Alan F. Vette. 2004 Chemical characterization of ambient particulate matter near the World Trade Center: elemental carbon, organic carbon, and mass reconstruction. National exposure research laboratory, United States environmental protection agency, Research triangle park, North Carolina

27711. Vol. 38, no. 17, 2004 / Environmental Science & Technology  
American Chemical Society.

27. Augustinbaulig, Jean - Jacques Poirault, Patrickaus Set, Roelschins, Tingmingshi, del Phinebaralle , Pascaldorlhene , Martine Meyer , Roger Lefevre , Armella Baeza- Squiban, and Francelynemarano.2004. Physicochemical Characteristics and Biological Activities of Seasonal Atmospheric Particulate Matter Sampling in Two Locations of Paris. *Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques*, Vol. 38, No. 22, 2004 / Environmental Science & Technology. American Chemical Society.
28. Aurelie Charron and Roy M. Harrison (2005): Fine (PM<sub>2.5</sub>) and coarse (PM<sub>2.5-10</sub>) Particulate Matter on A Heavily Trafficked London Highway: Sources and Processes. Division of Environmental Health and Risk Management, School of Geography, Earth and Environmental Sciences. The University of Birmingham, United Kingdom. Environmental Science & Technology Vol. 39, No. 20, 2005. American Chemical Society.
29. Jeong-Hee Lima, Lisa D. Sabinb, Kenneth C. Schiffb, Keith D. Stolzenbacha. 2006. Concentration, size distribution, and dry deposition rate of particle-associated metals in the Los Angeles region. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, CA. Atmospheric Environment 40 (2006) 7810–7823. Elsevier.
30. D. Djordjevic, d. Radmanovic, m. Ilic, a. Mihajlidi-zelic, z. Vukmirovic. A chemical speciation of trace elements in the tsp Long-term monitoring at Montenegro coast ichtm-chemistry center, belgrade, serbia and Montenegro, university of belgrade, belgrade, serbia and Montenegro, alternative academic educational network, belgrade, serbia and Montenegro.
31. WHO (1999): Monitoring ambient air quality for health impact assessment, WHO Regional Publications, European Series, No. 85.
32. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental. Estaciones de Monitoreo. Disponible en World Wide Web: [http://www.nl.gob.mx/?P=med\\_amb\\_mej\\_amb\\_sima\\_estacion](http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima_estacion) Consulta: 5-03-07

33. Diario Oficial de la Federación (1994): NOM-035-SEMARNAT, Consulta: 01-07-06
34. Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Disponible en World Wide Web: <http://www.cepis.ops-oms.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml> Consulta: 12 julio 2006
35. Normas Oficiales Mexicanas sobre la calidad del aire. Disponible en World Wide Web: [http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/198/ccam002.html?id\\_pub=198](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/198/ccam002.html?id_pub=198) Consulta: 13-12-05
36. Kingston H.M., Jassie L.B (1995). "Introduction to Microwave Sample Preparation. ACS Professional Reference Book. Third printing. U.S.A.
37. Ximénez Herraiz, L. "*Espectroscopia de absorción Atómica*" Ed. Publicaciones Analíticas, Madrid (1980).
38. Skoog-Holler-Niemman (2001): Análisis Instrumental. Mc Graw Hill. Quinta Edición, Capítulo 9 y 21.
39. Calderón Sáenz Felipe, Pavlova Margarita (2005): Metodologías para Análisis de Suelos y Aire. Disponible en World Wide Web: <http://www.uma.es/servicios/scai/cnhs/> Consulta: 13-12-05
40. Aertia Software XLSTAT-Pro 2007. Disponible en World Wide Web: <http://www.aertia.com/productos.asp?pid=171> Consulta: 13-03-07
41. De la Garza, J. (1995): "Análisis de la información mercadológica a través de la estadística multivariada" México: Alhambra.
42. Miller J.C., Miller J.N. (1998): Estadística para Química Analítica. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana. Capítulos 3 y 5.
43. Funk W., Dammann V., Donnevert G., (1995): Quality assurance in Analytical Chemistry. Ed. VCH. Capítulo 1.

44. OMS (1999): Guías para la calidad del aire. Disponible en World Wide Web: <http://www.who.int/es/index.html> Consulta: 14-10-06
45. US-EPA (1999): National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Disponible en World Wide Web: <http://www.epa.gov/air/criteria.html> Consulta: 14-10-06
46. US-EPA (1997): National Primary and Secondary Standards for Lead, 43CFR46245. Disponible en World Wide Web: <http://www.epa.gov/oar/oaqps/greenbk/lindex.html> Consulta: 14-10-06
47. Ministry of the Environment Ontario, Canada (2001): Air Quality in Ontario. Disponible en World Wide Web: <http://www.ene.gov.on.ca/index.htm> Consulta: 14-10-06
48. Woodhouse, L. F. (2003): Regional Modeling, Update and Issues California Environmental Protection Agency. Disponible en World Wide Web: <http://www.calepa.ca.gov/>. Consulta: 14-10-06

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Daisy Irania Barajas Herrera

Candidato para el Grado de

Maestro en Ciencias con Orientación en Química Analítica Ambiental

Tesis:

CARACTERIZACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL MATERIAL  
PARTICULADO SUSPENDIDO EN LA ATMÓSFERA  
DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY

Campo de Estudio: Química Analítica Ambiental

Biografía:

Datos Personales: Nacido en Monclova Coahuila, el 14 de septiembre de 1981, hija de José Luís Barajas Suárez y Dora Elva Herrera Herrera.

Educación: Egresada de la Universidad Autónoma de Nuevo León, grado obtenido. Licenciado en Química Industrial año 2004.

Experiencia Profesional:

Coordinador Técnico de Investigación en el Laboratorio de Química Analítica Ambiental. División de Estudios Superiores de la FCQ de UANL. Enero 05-Agosto 2006. Auxiliar en el Departamento de Analítica de en la FCQ de UANL. Enero 03–Enero 05. Investigación de nuevos materiales en el Laboratorio de Cerámica, División de Estudios Superiores de la FCQ de UANL. Agosto 03–Enero 04. Trabajo en Investigación en los Laboratorios superiores de CELAES, en la FCQ de UANL Agosto 02-Enero 03.