

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE MEDICINA



**Caracterización del contenido de Metales en
Partículas PM_{2.5} en dos zonas del Área
Metropolitana de Monterrey.**

Por:

Q.F.B. CHRISTIAN TADEO BADILLO CASTAÑEDA

**Como requisito parcial para obtener el grado de DOCTOR EN
CIENCIAS con orientación terminal en Farmacología y
Toxicología.**

Enero 2012

Dedicatoria

A la memoria de mi primer asesor

Dr. *med.* Oscar Torres Alanís (QEPD)

Agradecimientos

A mi familia por todo el apoyo brindado durante la realización de este trabajo.

A mi director de tesis Dr. *med.* Lourdes Garza Ocañas.

Al M.C. Humberto J. Garza Ulloa

A los miembros de la comisión de tesis: Dr. C. María Teresa Zanatta, Calderón Dr. C Rubén Luján Rangel, Dr. *med.* Juan Antonio Cuéllar López, Dr. I. Benjamín Limón Rodríguez.

Al Dr. C. Adolfo Caballero

A todo el equipo de equipo de Absorción Atómica, René García, Arturo Longoria y Mónica González

Mis compañeros de posgrado durante mi estancia: Omar González, Mónica Ramírez, Argentina Cárdenas, Jesús Triana, Sandra Montoya, Diana Castillo, Pedro Sáenz.

Mis amigos.

Sistema Integral de Monitoreo Ambiental NL. (SIMA)

CONACyT.

A todos mi admiración y mi respeto.

**CARACTERIZACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES EN PARTÍCULAS
PM_{2.5} EN DOS ZONAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY.**

Aprobación de la Tesis:



Dr. med. LOURDES GARZA OCAÑAS
Director de Tesis



Dr. med. JUAN ANTONIO CUÉLLAR LÓPEZ
Comisión de Tesis



Dr. C. MARÍA TERESA ZANATTA CALDERÓN
Comisión de Tesis



Dr. C. RUBÉN LUJÁN RANGEL
Comisión de Tesis



Dr. I. BENJAMÍN LIMÓN RODRÍGUEZ
Comisión de Tesis



Dr. med. GERARDO ENRIQUE MUÑOZ MALDONADO
Subdirector de Estudios de Posgrado

**CARACTERIZACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES EN PARTÍCULAS
PM_{2.5} EN DOS ZONAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY**

Presentado por

Q.F.B. Christian Tadeo Badillo Castañeda

Este trabajo fue realizado en el Departamento de Farmacología y Toxicología de la Facultad de medicina de la UANL bajo la dirección de la Dr.*med.* Lourdes Garza Ocañas



Dr. *med.* LOURDES GARZA OCAÑAS
Director de Tesis

Christian Tadeo Badillo Castañeda

Fecha de Graduación: Enero 2012

Christian Tadeo Badillo Castañeda

Fecha de Graduación: Enero 2012

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Medicina.

Título del estudio: **CARACTERIZACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES EN PARTÍCULAS PM_{2.5} EN DOS ZONAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY.**

Número de páginas: 114

La contaminación ambiental representa una amenaza importante para la salud en todo el mundo. Desde el inicio del monitoreo de los niveles de partículas ambientales contaminantes menores a 2.5 micras (PM_{2.5}) en Monterrey y su área metropolitana (AMM) por el SIMA, éstos han rebasado el límite establecido en la NOM-025-SSA1-1993 de 15 µg/m³ como promedio anual. Los componentes tóxicos de las PM_{2.5} son muchos y muy diversos y entre ellos se encuentran los metales los cuales han sido relacionados con el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, pulmonares y con incremento en el riesgo de muerte. Considerando los niveles elevados de las PM_{2.5}, la población expuesta a las mismas y la escasa información en cuanto al contenido de metales de las PM_{2.5} presentes en AMM se planteó el siguiente trabajo.

Objetivo. Determinar el contenido de metales en PM_{2.5} y cuantificar sus niveles en dos zonas del AMM.

Material y Métodos. Las zonas muestreadas fueron: Zona 1, cercana al cruce de las avenidas Madero y José Eleuterio González y Zona 2, ubicada en el centro de Santa Catarina. Para el muestreo de las PM_{2.5} se utilizaron filtros de fibra de vidrio y equipos Hi-Vol. El muestreo fue cada 6 días durante el periodo de Feb-2008 a Feb-2009. El análisis de los metales en las PM_{2.5} se realizó mediante Espectroscopia de Absorción Atómica. Los métodos de análisis fueron previamente validados en nuestro laboratorio.

Resultados. Se obtuvieron 100 muestras (50 en cada zona). Los niveles promedio anual de PM_{2.5} fueron de 26.11µg/m³ y 30.02µg/m³ en las zonas 1 y 2 respectivamente. No se encontró diferencia significativa en los niveles de ambas zonas. Se cuantificaron 5 metales en las PM_{2.5} siendo estos, hierro, plomo, manganeso, arsénico y níquel. De estos metales el hierro, fue el que estuvo presente en mayor concentración, seguido del plomo, manganeso, arsénico y níquel.

Conclusiones. Las dos zonas presentaron niveles de PM_{2.5} superiores al límite establecido en la NOM-025-SSA1-1993. El hierro, plomo y manganeso fueron los mayores en concentración en ambas zonas. Este es el primer estudio donde se muestrea el contenido de metales en PM_{2.5} en el AMM en un período de un año y los resultados indican que se debe considerar el establecimiento de medidas encaminadas al control de calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey.


Dr. med. LOURDES GARZA OCAÑAS
Director de Tesis

INDICE

Capitulo	Página
I. Introducción	1
1.1 Contaminación ambiental	1
1.2 Material particulado	5
1.3 Metales en el material particulado	9
1.4 Área Metropolitana de Monterrey	12
Justificación	17
Objetivo general	18
Objetivos específicos	18
II. Material y métodos.	19
2.1 Material	19
2.1.1 Equipos e instrumentos.	19
2.1.2 Material de Laboratorio.	20
2.1.3 Reactivos.	20
2.2 Métodos	21
2.2.1 Obtención de PM _{2.5}	21
2.2.2 Determinación del contenido de PM _{2.5} .	25
2.2.3 Rastreo selectivo del contenido de metales en las PM _{2.5}	25
2.2.4 Selección de metales a cuantificar y validación del procedimiento analítico para la cuantificación en las PM _{2.5}	27
2.2.4.1 Selección de los metales.	27

2.2.4.2	Selección y validación del procedimiento analítico.	28
2.2.4.2.1	Técnica Analítica	28
2.2.4.2.2	Optimización de condiciones instrumentales	29
2.2.4.2.3	Validación del procedimiento analítico	30
2.2.5	Cuantificación de los metales en las PM _{2.5}	31
2.2.6	Comparación del contenido de metales presentes en las PM _{2.5} de las zonas de estudio.	31
III.	Resultados.	33
3.1	Obtención de las muestras	33
3.2	Determinación del contenido de PM _{2.5}	33
3.3	Rastreo selectivo del contenido de Plomo, Arsénico, Cadmio, Níquel, Manganeso, Fierro, Cromo, Vanadio y Cobre	39
3.4	Selección de Metales a cuantificar y Validación del procedimiento analítico	45
3.4.1	Selección de Metales	45
3.4.2	Pre-validación del procedimiento analítico para la cuantificación de los metales en las PM _{2.5} .	46
3.4.2.1	Pre-validación del procedimiento analítico para Fierro	46
3.4.2.2	Pre-validación del procedimiento analítico para Plomo	47
3.4.2.3	Pre-validación del procedimiento	48

	analítico para Manganeso	
3.4.2.4	Pre-validación del procedimiento analítico para Arsénico	49
3.4.2.5	Pre-validación del procedimiento analítico para Níquel	49
3.4.3	Validación del procedimiento analítico	50
3.4.3.1	Validación del procedimiento analítico para la cuantificación de Fierro	51
3.4.3.2	Validación del procedimiento analítico para la cuantificación de Plomo	55
3.4.3.3	Validación del procedimiento analítico para la cuantificación de Manganeso	59
3.4.3.4	Validación del procedimiento analítico para la cuantificación de Arsénico	63
3.4.3.5	Validación del procedimiento analítico para la cuantificación de Níquel	67
3.5	Cuantificación de los metales en las partículas ambientales PM _{2.5}	71
3.6	Comparación el contenido de los metales en las dos zonas de estudio.	81
IV.	Discusión.	83
V.	Conclusiones.	93
	Perspectivas	95
	Bibliografía	96
	Anexo 1	104

Anexo 2	109
Anexo 3	112
Glosario	113

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pagina
1. Tamaño comparativo de las partículas ambientes PM ₁₀ y PM _{2.5}	6
2. Niveles de penetración pulmonar del material particulado.	9
3. Ubicación del Área Metropolitana de Monterrey	13
4. Dirección de los vientos predominantes en el AMM.	14
5. Localización de las estaciones de monitoreo del SIMA en el AMM.	15
6. Promedio anual de concentraciones de partículas menores a 2.5 micras en el Área Metropolitana de Monterrey, período 2003-2010.	16
7. Aspecto del muestreador de alto volumen colocado en la Zona 2.	22
8. Zonas de monitoreo de partículas PM _{2.5} .	23
9. Posición del filtro en el equipo Hi-Vol.	24
10. Concentración de partículas PM _{2.5} por fecha de muestreo.	37
11. Promedio mensual de la concentración de partículas PM _{2.5} .	38
12. Promedio mensual estimado de la concentración de fierro en PM _{2.5} .	41
13. Promedio mensual estimado de la concentración de plomo en PM _{2.5} .	41
14. Promedio mensual estimado de la concentración de manganeso en PM _{2.5} .	42
15. Promedio mensual estimado de la concentración de cobre en PM _{2.5} .	42
16. Promedio mensual estimado de la concentración de cromo en PM _{2.5} .	43
17. Promedio mensual estimado de la concentración de arsénico en PM _{2.5} .	43
18. Promedio mensual estimado de la concentración de níquel en PM _{2.5} .	44

19.	Promedio mensual estimado de la concentración de vanadio en $PM_{2.5}$.	44
20.	Promedio mensual estimado de la concentración de cadmio en $PM_{2.5}$.	45
21.	Comportamiento espacial y temporal de fierro en $PM_{2.5}$.	78
22.	Comportamiento espacial y temporal de plomo en $PM_{2.5}$.	78
23.	Comportamiento espacial y temporal de manganeso en $PM_{2.5}$.	79
24.	Comportamiento espacial y temporal de arsénico en $PM_{2.5}$.	79
25.	Comportamiento espacial y temporal de níquel en $PM_{2.5}$.	80

LÍSTA DE TABLAS

Tabla	Pagina
1. Control de Calidad utilizado en el análisis de las muestras.	32
2. Estadística descriptiva de la concentración de $PM_{2.5}$	34
3. Promedio mensual de las concentraciones $PM_{2.5}$	34
4. Niveles de $PM_{2.5}$ por zona y fecha de muestreo	35
5. Comparación de medias por diferencia mínima significativa	36
6. Gráfica de calibración e intervalo de trabajo utilizado en el rastreo selectivo de metales	39
7. Promedio mensual estimado de Metales en $PM_{2.5}$ en la zona 1.	40
8. Promedio mensual estimado de Metales en $PM_{2.5}$ en la zona 2.	40
9. Técnicas Instrumentales utilizadas en la cuantificación de cada metal.	46
10. Programa de tiempos y temperaturas para la determinación de plomo por Espectroscopia de Absorción Atómica por Horno de Grafito	47
11. Programa de tiempos y temperaturas para la determinación de manganeso por Espectroscopia de Absorción Atómica por Horno de Grafito.	48
12. Programa de tiempos y temperaturas para la determinación de níquel por Espectroscopia de Absorción Atómica por Horno de Grafito.	50
13. Intervalos de Procedimientos Validados.	51
14. Resultados de la validación para la cuantificación de fierro.	52
15. Fierro: Datos crudos de la evaluación de la Linealidad y del Intervalo de Trabajo	52

16.	Fierro: Evaluación de la Linealidad (Coeficiente de Correlación)	52
17.	Fierro: Evaluación del Intervalo de Trabajo (% de Error).	53
18.	Fierro: Datos crudos de precisión a condición de repetibilidad.	53
19.	Fierro: Evaluación de Precisión a condición de repetibilidad	53
20.	Fierro: Datos crudos de Precisión Intermedia.	52
21.	Fierro: Evaluación de precisión intermedia.	54
22.	Fierro: Datos crudos del límite de cuantificación.	54
23.	Fierro: Evaluación del Límite de Cuantificación.	55
24.	Fierro: Datos crudos de Veracidad.	55
25.	Fierro: Evaluación de Veracidad.	55
26.	Resultados de la validación para la cuantificación de plomo.	56
27.	Plomo: Datos crudos de la evaluación de la Linealidad y del Intervalo de Trabajo	56
28.	Plomo: Evaluación de la Linealidad (Coeficiente de Correlación)	56
29.	Plomo: Evaluación del Intervalo de Trabajo (% de Error).	57
30.	Plomo: Datos crudos precisión a condición de repetibilidad.	57
31.	Plomo: Evaluación de Precisión a condición de repetibilidad	57
32.	Plomo: Datos crudos de Precisión Intermedia.	58
33.	Plomo: Evaluación de precisión intermedia.	58
34.	Plomo: Datos crudos del límite de cuantificación	58
35.	Plomo: Evaluación del Límite de Cuantificación.	59
36.	Plomo: Datos crudos de Veracidad.	59
37.	Plomo: Evaluación de Veracidad.	59
38.	Resultados de la validación para la cuantificación de manganeso.	60
39.	Manganeso: Datos crudos de la evaluación de la Linealidad y del	60

	Intervalo de Trabajo-	
40.	Manganeso: Evaluación de la Linealidad (Coeficiente de Correlación)	60
41.	Manganeso: Evaluación del Intervalo de Trabajo (% de Error).	61
42.	Manganeso: Datos crudos precisión a condición de repetibilidad.	61
43.	Manganeso: Evaluación de Precisión a condición de repetibilidad	61
44.	Manganeso: Datos crudos de Precisión Intermedia.	62
45.	Manganeso: Evaluación de precisión intermedia.	62
46.	Manganeso: Datos crudos del límite de cuantificación.	62
47.	Manganeso: Evaluación del Límite de Cuantificación.	63
48.	Manganeso: Datos crudos de Veracidad.	63
49.	Manganeso: Evaluación de Veracidad.	63
50.	Resultados de la validación para la cuantificación de arsénico.	64
51.	Arsénico: Datos crudos de la evaluación de la Linealidad y del Intervalo de Trabajo	64
	Intervalo de Trabajo	
52.	Arsénico: Evaluación de la Linealidad (Coeficiente de Correlación)	64
53.	Arsénico: Evaluación del Intervalo de Trabajo (% de Error).	65
54.	Arsénico: Datos crudos precisión a condición de repetibilidad.	65
55.	Arsénico: Evaluación de Precisión a condición de repetibilidad	65
56.	Arsénico: Datos crudos de Precisión Intermedia.	66
57.	Arsénico: Evaluación de precisión intermedia.	66
58.	Arsénico: Datos crudos del límite de cuantificación.	66
59.	Arsénico: Evaluación del Límite de Cuantificación.	67
60.	Arsénico: Datos crudos de Veracidad.	67
61.	Arsénico: Evaluación de Veracidad.	67

62.	Resultados de la validación para la cuantificación de níquel.	68
63.	Níquel: Datos crudos de la evaluación de la Linealidad y del Intervalo de Trabajo	68
64.	Níquel: Evaluación de la Linealidad (Coeficiente de Correlación)	68
65.	Níquel: Evaluación del Intervalo de Trabajo (% de Error).	69
66.	Níquel: Datos crudos precisión a condición de repetibilidad.	69
67.	Níquel: Evaluación de Precisión a condición de repetibilidad	69
68.	Níquel: Datos crudos de Precisión Intermedia.	70
69.	Níquel: Evaluación de precisión intermedia.	70
70.	Níquel: Datos crudos del límite de cuantificación.	70
71.	Níquel: Evaluación del Límite de Cuantificación.	71
72.	Níquel: Datos crudos de Veracidad.	71
73.	Níquel: Evaluación de Veracidad.	71
74.	Resultados de Control de Calidad aplicado durante el análisis de las muestras de hierro.	72
75.	Resultados de Control de Calidad aplicado durante el análisis de las muestras de plomo.	72
76.	Resultados de Control de Calidad aplicado durante el análisis de las muestras de manganeso.	73
77.	Resultados de Control de Calidad aplicado durante el análisis de las muestras de arsénico.	73
78.	Resultados de Control de Calidad aplicado durante el análisis de las muestras de níquel.	74
79.	Concentración de metales en cada una las muestras de PM _{2.5} de la Zona 1.	75

80.	Concentración de metales en cada una las muestras de $PM_{2.5}$ de la Zona 2.	71
81.	Concentración mensual cada metal en las $PM_{2.5}$ de la Zona 1.	77
82.	Concentración mensual cada metal en las $PM_{2.5}$ de la Zona 2.	77
83.	Correlación de Pearson. ZONAS 1 Y 2.	81
84.	Comparación de medias por diferencia mínima significativa.	82
85.	Metales en $PM_{2.5}$ reportadas en otras partes del mundo.	89

ABREVIATURAS

PM _{2.5}	Partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras
PM ₁₀	Partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras
PST	Partículas suspendidas totales
AMM	Área Metropolitana de Monterrey
EPA	Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos
Conc.	Concentración.
As	Arsénico
Cd	Cadmio
Cr	Cromo
Fe	Fierro
Mn	Manganeso
Ni	Níquel
Pb	Plomo
Pd	Paladio
V	Vanadio
mL	Mililitros
CE	Centro
NO _x	Dióxidos de Nitrógeno
SO _x	Dióxidos de Azufre
SO	Suroeste

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	microgramos por metro cúbico
ng/m^3	nanogramos por metro cubico
Hi-Vol	Alto volumen
r	Coefficiente de correlación
SD	Desviación estandar
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
% CV.	Porcentaje de coeficiente de variación.

CAPÍTULO I

1.- Introducción.

El medio ambiente comprende aquellos factores físicos y naturales que rodean e influyen de alguna manera en los seres vivos ⁽¹⁾. Para su estudio, el ambiente se puede separar en cuatro compartimientos: el manto sólido externo de la tierra (litósfera), el agua de la tierra incluyendo los hielos y el vapor de agua (hidrósfera), el conjunto de gases que se encuentra alrededor del planeta (atmósfera) y el conjunto de los seres vivos que habitan la tierra (biósfera). Los seres vivos nunca se encuentran aislados, forman parte de una comunidad integrada por organismos de muy diversas especies, entre los cuales existen complejas tramas de relaciones. El hombre es un extraordinario agente de cambio en el planeta y no escapa a los efectos de la destrucción que él mismo provoca en el ambiente. Los cambios en éste, son producto entre otras causas, de la eliminación selectiva de especies, la alteración de los hábitats y/o la introducción en el ambiente de sustancias químicas sintéticas ⁽²⁾.

1.1 Contaminación ambiental.

La contaminación ambiental siempre ha existido, pues, es parte inherente a las actividades del ser humano.

Existen muchas definiciones de contaminación ambiental pero, para fines prácticos, se puede considerar que es la introducción o presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes o sustratos a los que no pertenecen o en cantidades superiores a las propias de dichos sustratos, por un tiempo suficiente, y bajo condiciones tales, que estas sustancias interfieren con la salud y la comodidad de las personas, dañen los recursos naturales o alteren el equilibrio ecológico de la zona (2).

Hoy en día, son ampliamente reconocidos los problemas de contaminación ambiental, que dan lugar a la acumulación de riesgos para la salud y el bienestar de la población. Gran parte de esos problemas son consecuencia del rápido y desordenado crecimiento urbano y de la industrialización (3). En el 2007, por primera vez en la historia de la humanidad, la concentración de población mundial asentada en centros urbanos superó la cifra del 50%; el incremento de este porcentaje muestra una acelerada dinámica de urbanización; si se compara con los datos de 1970 y 1990, cuando la población rural a nivel mundial era de un 57.4% y un 62.9%, respectivamente. Esta movilidad poblacional de lo rural hacia lo urbano se ha dado en un periodo de tiempo relativamente corto y su gran velocidad plantea nuevos desafíos en diferentes materias; una de ellas, los procesos de contaminación producida por la actividad humana y los sistemas productivos en los centros urbanos, situación que tiene especial afectación en la calidad de vida de los ciudadanos y del medio ambiente en general (4).

A nivel urbano, algunos estudios muestran cómo, en promedio, sin tomar en cuenta los procesos industriales, una ciudad de un millón de habitantes consume diariamente 625,000 m³ de agua, 2,000 toneladas de alimentos y 9,500 toneladas de

combustible; lo que a su vez genera 500,000 m³ de aguas residuales, 2,000 toneladas de desechos sólidos y 950 toneladas de contaminantes emitidos a la atmósfera, causando así contaminación del aire⁽⁴⁾.

Contaminación del aire.

El aire es uno de los factores determinantes de la vida en la Tierra, y se considera al aire limpio como un requisito básico para la salud y el bienestar⁽⁵⁾.

La contaminación del aire puede ser definida como la presencia de sustancias en la atmósfera a concentración, duración y frecuencia suficiente que afecte adversamente la salud humana, el bienestar o el medio ambiente⁽⁶⁾. La contaminación del aire no es un fenómeno reciente, de hecho, una de las razones por las cuales las tribus de la era primitiva eran nómadas, fue el moverse con regularidad lejos del hedor de los desechos que ellos generaban⁽⁷⁾.

Los contaminantes del aire incluyen a una mezcla heterogénea de gases y material particulado. Los componentes mayoritarios de esa mezcla de gases son NO₂, CO, SO₂ y Ozono.

Existen factores naturales que ayudan a reducir la contaminación del aire: las partículas más pesadas que el aire se estabilizan como resultado de la atracción gravitacional hacia el planeta, la lluvia y la nieve ayudan a limpiar el aire de contaminantes, los vientos alejan los contaminantes, los diluyen al mezclarlos con aire más limpio y traen aire fresco. Los problemas de contaminación del aire se presentan cuando los procesos naturales de limpieza se ven superados por el mayor número de fuentes emisoras, aunado a esto, en las zonas urbanas los edificios frenan la velocidad

del viento y reducen la dilución y la eliminación de los contaminantes, las colinas y montañas reducen el flujo de aire en los valles vecinos y permiten que se acumulen los contaminantes al nivel del suelo, las temperaturas más altas promueven las reacciones químicas que producen la formación contaminantes.

Efectos de la contaminación atmosférica.

Cuando el hombre empezó a utilizar el fuego, lo hizo de una manera en la cual llenaba el interior de su vivienda con productos de combustión incompleta. Después de su invención, la chimenea eliminó del hogar los productos de combustión, sin embargo, éstos eran emanados hacia el aire exterior ⁽⁷⁾. Fue hasta después de la revolución industrial, que los impactos locales de la contaminación del aire sobre la salud humana y el medio ambiente se empezaron a documentar sistemáticamente.

En Londres, durante el año de 1952, las condiciones climatológicas favorecieron un gran aumento en la concentración de contaminantes, durante el periodo invernal de ese año hubo un aumento del triple en la tasa de mortalidad esperada, dando por resultado más de 4,000 muertes en cuatro días ⁽⁸⁾. Un reciente re análisis de los datos, indica que el número de muertes adicionales debido al episodio fue cerca de 12,000 ⁽⁹⁾.

Los efectos de la contaminación atmosférica en la salud han sido objeto de muchos estudios. La exposición a contaminantes del aire trae consigo un aumento en la mortalidad y en admisiones hospitalarias relacionadas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Estudios epidemiológicos realizados a principios de 1990 reportaron asociaciones entre las tasas de mortalidad y el material particulado ^(10,11), posterior a esto, un gran número de estudios epidemiológicos encontraron al

material particulado como el contaminante del aire con mayor asociación a efectos adversos en la salud ⁽⁸⁾.

1.2 Material Particulado.

Material particulado (PM) o partículas ambientales, es un término genérico utilizado en contaminación del aire, que incluye una mezcla de sólidos y líquidos suspendidos en la atmosfera que varían de composición, origen y tamaño ⁽¹²⁾. Su composición por lo general es una combinación de tierra, polvo, hollín, cenizas, polen y aerosoles formados en la atmosfera. Se originan a partir de emisiones vehiculares, incendios forestales, y procesos industriales. Por su origen, las partículas pueden definirse como primarias y secundarias. Las primarias son aquellas producidas directamente por alguna fuente contaminante, en cambio, las secundarias son las que se forman en la atmósfera, como resultado de la transformación y/o mezcla de gases y partículas primarias.

En función de su tamaño, las partículas ambientales se clasifican de acuerdo a su diámetro aerodinámico. De esta forma, las partículas suspendidas totales tienen un diámetro que va de 0.001 a alrededor de 100 micrómetros. Las partículas menores a 10 micrómetros, también llamadas torácicas **inhalables** (PM₁₀). Dentro de la fracción inhalable se encuentra la fracción gruesa, cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 10 micrómetros y 2.5 micrómetros, llamada también partícula torácica gruesa (PM₁₀-PM_{2.5}). Las partículas menores a 2.5 micrómetros conocidas como partículas finas o fracción **respirable** (PM_{2.5}) y partículas menores a 0.1 micrómetros o ultrafinas ^(8,13,14). Una ejemplificación del tamaño de las PM₁₀ y PM_{2.5} se muestra en Figura 1.

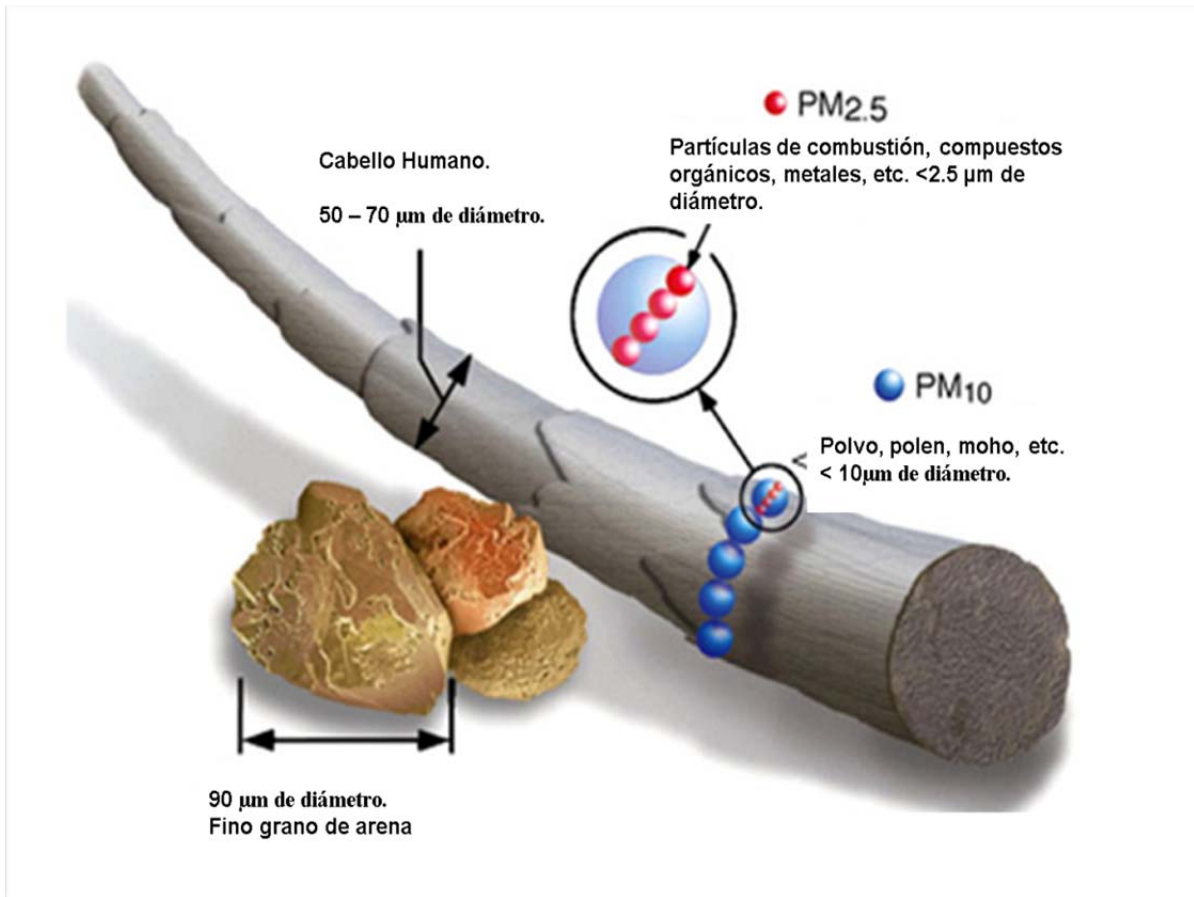


Figura 1 Tamaño comparativo de las partículas ambientales PM₁₀ y PM_{2.5}

Efectos de las partículas en la salud.

La contaminación atmosférica por partículas ambientales provoca varias consecuencias directas que pueden percibirse de forma inmediata; por ejemplo, reducción de la visibilidad e irritación de ojos y garganta. Sin embargo, las repercusiones en la salud humana a largo plazo son mucho más importantes, y difíciles de detectar, ya que en general los efectos que provocan no se manifiestan de manera inmediata. Estas repercusiones se asocian principalmente a las denominadas partículas finas o PM_{2.5} ⁽¹²⁾.

Estudios epidemiológicos han reportado una relación entre la contaminación por partículas ambientales y efectos adversos respiratorios y cardiovasculares ⁽¹⁵⁾. En estudios realizados en la Ciudad de México sobre daños a la salud ocasionados por partículas suspendidas, se reporta un incremento en los índices de mortalidad, semejante a estudios realizados en ciudades de Europa y Estados Unidos de América ⁽¹⁷⁾.

Los mecanismos causantes de los efectos adversos de las partículas no se conocen con certeza, sin embargo, los factores que influyen de manera importante al igual que con cualquier otro contaminante son: las características de la población, las características físicas y químicas de las partículas, así como la concentración y el tiempo de exposición ^(18,19).

Características de la población.

Los efectos adversos causados por las partículas son variables y dependen de las características de la población estudiada. Los extremos de la vida como la infancia y la vejez, y personas con padecimientos como diabetes, asma e hipertensión son los más afectados por la contaminación ambiental ^(20,21). Diversos estudios epidemiológicos demuestran que la exposición a diferentes contaminantes, incluso a niveles inferiores a lo establecido en la NOM-025-SSA1-1993, se asocian con un incremento en la incidencia y la severidad del asma, el deterioro de la función pulmonar, así como con otras enfermedades respiratorias en niños y adolescentes ^(22,23).

Características de la partícula.

Entre las características físicas y químicas de las partículas, el tamaño, que se mide en términos de diámetro aerodinámico, es un parámetro importante para caracterizar su comportamiento y toxicidad, ya que de él depende la capacidad de penetración y retención en las diversas regiones de las vías aéreas respiratorias; también determina su tiempo de residencia en la atmósfera y por ende la concentración a la que puede estar expuesta la población ⁽¹⁷⁾. En ese sentido, las partículas con un diámetro entre 2.5 μm y 10 μm tienen la capacidad de entrar a nariz, garganta y vías respiratorias superiores por lo que se consideran inhalables. Las partículas menores a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) pueden ingresar hasta los pulmones, alcanzan los bronquiolos respiratorios por lo que se consideran respirables. Aunado a esto, debido a su tamaño tienen una gran superficie de contacto, por lo que pueden interaccionar más fácilmente con blancos biológicos ^(8,24). Esto puede ser la causa de que a las $\text{PM}_{2.5}$ se les asocie con efectos adversos a la salud en mayor proporción que a las PM_{10} y PST. En la Figura 2, se ejemplifica los niveles de penetración en las vías respiratorias por parte de los diferentes tipos de partículas ambientales. Debido a esto, en nuestro país en el 2005 se modificó la NOM-025-SSA1-1993 para incluir a las $\text{PM}_{2.5}$ como un contaminante para evaluar la calidad del aire.

Composición Química.

Las fuentes de las partículas ambientales son muy diversas, ello origina que sus componentes sean muy heterogéneos. En términos generales se dividen en fracción orgánica e inorgánica. La fracción orgánica contiene cientos, quizás miles de compuestos, dentro de los que encontramos carbono elemental, compuestos orgánicos volátiles y material biológico que incluye endotoxinas, bacterias, esporas, alérgenos y

polen. La fracción inorgánica se compone principalmente de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición y metales térreos ⁽²⁵⁾.

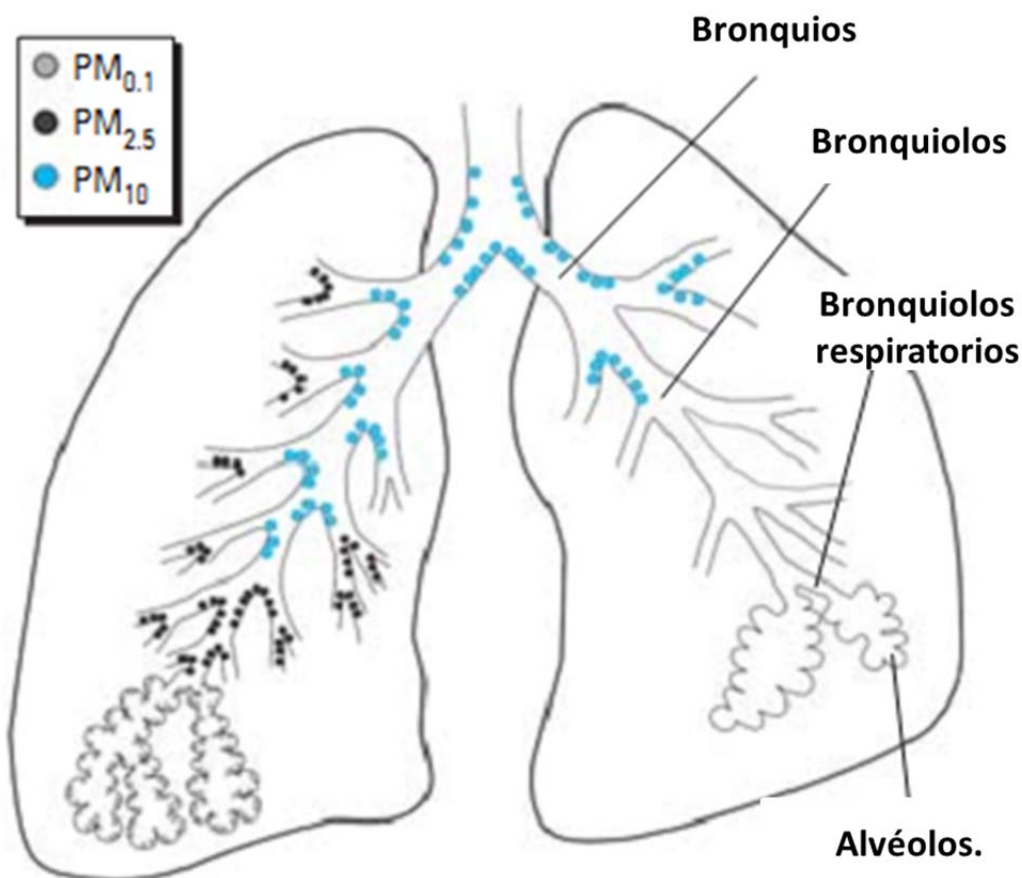


Figura 2 Niveles de penetración pulmonar del material particulado.

1.3 Metales en el material particulado.

La fracción metálica (metales pesados) presente en las partículas ambientales es de interés toxicológico y ha sido materia de diversos estudios ⁽²⁵⁻²⁸⁾. Muchos de los elementos que se enlistan bajo este concepto, tienen una gravedad específica mayor a cinco, que es significativamente superior a la del sodio, calcio, y otros metales ligeros como el litio y el berilio. Desde el punto de vista químico, los metales pesados están

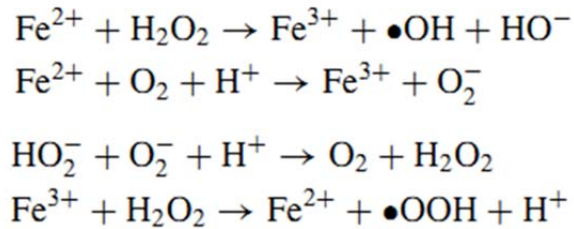
constituidos por elementos de transición como fierro, vanadio, manganeso y níquel, elementos de post-transición como zinc, cadmio y plomo, y algunos metaloides como el arsénico y selenio. Al respecto a esto, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), clasifica a los siguientes elementos: arsénico, antimonio, berilio, cadmio, cromo, cobalto, plomo, manganeso, mercurio, níquel y selenio como contaminantes tóxicos del aire ⁽²⁹⁾.

Fuentes de Metales.

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Éstos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante las actividades humanas, como sería el uso de combustibles fósiles. De los 80 elementos que se consideran metales, 50 de ellos se encuentran en el carbón, 35 en el petróleo crudo, 30 en el combustóleo y 20 en la gasolina. Como resultado de su combustión, estos elementos son movilizados y emitidos a la atmósfera como constituyentes del material particulado ⁽³⁰⁾.

Importancia de los metales en las partículas ambientales.

Diversos estudios han reportado que el material particulado contiene metales de transición como: fierro, níquel, manganeso, cobre y vanadio; estos metales son capaces de catalizar reacciones de reducción de un electrón del oxígeno molecular y generar especies reactivas de oxígeno (ROS), por lo que se les considera componentes importantes para la toxicidad de la partícula. Este proceso puede ser demostrado con la reacción de Fe-catalizada Haber-Weiss o reacción de Fenton ^(26,27):



Se ha visto además, que la exposición a metales del material particulado origina liberación de mediadores inflamatorios como factor de necrosis tumoral alfa, NF- κ β e interleucina-6. Otro de los mecanismos de toxicidad puede ser el interactuar directamente con proteínas celulares ^(27,28).

Efectos de los Metales en la salud.

Diversos de estudios epidemiológicos han encontrado una asociación positiva entre la mortalidad y la cantidad de plomo, níquel, fierro, cobre y zinc presentes en las partículas ambientales ⁽³¹⁻³³⁾. La asociación ha sido mayor para el contenido de metales que para la cantidad de partículas ambientales. En uno de los estudios se observó que los adultos mayores de 65 años presentan un elevado riesgo de mortalidad ⁽³³⁾.

En la zona del Valle de Utah, los cambios en la contaminación del aire durante el cierre transitorio de una fábrica de acero se asociaron con cambios en la mortalidad y la morbilidad. Los niveles de PM y la mortalidad y la morbilidad se redujeron durante el cierre de la fábrica, y volvieron a incrementarse cuando la fábrica fue reabierta. Se concluyó que probablemente la cantidad de metales en las partículas se redujera considerablemente durante el período de clausura ⁽³⁴⁻³⁵⁾.

En lo referente a enfermedades respiratorias, un estudio transversal realizado en Alemania, mostró una alta incidencia de enfermedades respiratorias y

sensibilización alérgica en niños que vivían cerca de zonas industriales en comparación con niños sin exposición. Estudios posteriores revelaron una gran cantidad de material particulado así como de metales, en sitios cercanos al área industrial en comparación con áreas rurales ^(34,36). El fierro, contenido en las partículas ha sido asociado a las exacerbaciones de los síntomas respiratorios en miembros de la comunidad cercana a una industria acerera ⁽³⁷⁾. En otro estudio, el silicio y el fierro fueron asociados con enfermedad respiratoria en niños ⁽³⁸⁾. El manganeso y el plomo se asociaron con la reducción del flujo espiratorio forzado en niños de edad escolar ⁽³⁹⁾.

Concentración y tiempo de exposición.

Los niveles atmosféricos de las partículas ambientales varían ampliamente de un lugar a otro y de un momento a otro, lo que modifica el grado de exposición a las mismas. Las grandes ciudades son las que presentan mayores niveles de partículas ambientales, debido al mayor número de fuentes contaminantes y a determinadas condiciones geográficas y meteorológicas. En México, las ciudades con mayor contaminación por partículas ambientales son: **el Área Metropolitana de Monterrey (AMM)**, la Zona Metropolitana de Juárez (ZM Juárez) y la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) ⁽⁴⁰⁾.

1.4 Área Metropolitana de Monterrey.

El Área Metropolitana de Monterrey, es la segunda zona industrial más grande del país y la tercera en población (41,42). Se encuentra en el estado de Nuevo León, en el Noreste de México (Figura 3). Está integrada por los municipios conurbados de Apodaca, Cadereyta Jiménez, Ciénega de Flores, General Escobedo, García, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Pesquería, Santiago, Santa Catarina, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García y Salinas Victoria, concentran en su superficie a

casi el 88% de la población del estado, la cual en el año 2010 rebasaba los cuatro millones de habitantes. El AMM tiene un territorio de 4,030 km², una flota vehicular de 1.7 millones unidades y 9,740 unidades activas de industria manufacturera ^(40, 43, 44).

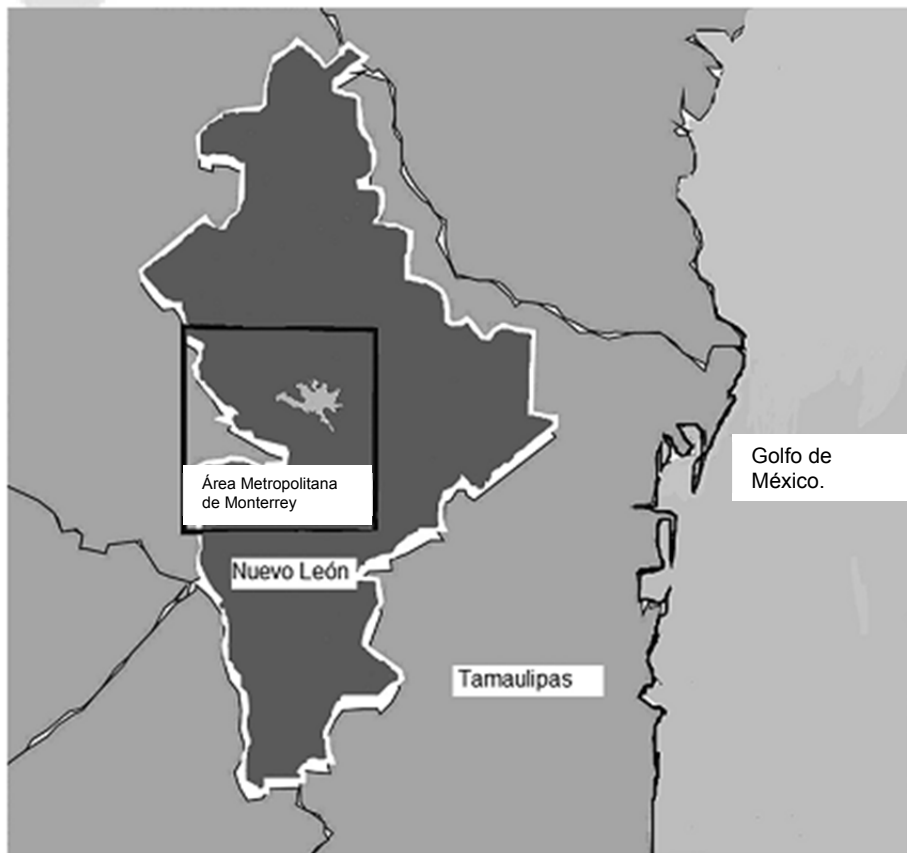


Figura 3 Ubicación del Área Metropolitana de Monterrey.

El AMM, se caracteriza principalmente por la influencia de climas extremos, con oscilaciones térmicas durante el año mayores a 40°C, entre la temperatura más gélida del invierno y la más cálida en verano.

El Área Metropolitana de Monterrey se encuentra a una altura aproximada de 500 metros sobre el nivel del mar. Está rodeada por la Sierra Madre Oriental, el Cerro de la Silla, el Cerro de las Mitras y el Cerro del Topo Chico. Estas elevaciones

montañosas constituyen una barrera física natural para la circulación del viento e impiden el desalojo del aire contaminado hacia el exterior de la zona. De igual modo, se halla sujeta a la influencia de sistemas anticiclónicos procedentes del golfo de México que provocan estabilidad atmosférica e inhiben el mezclado vertical del aire, ver Figura 4 ⁽⁴³⁻⁴⁵⁾.

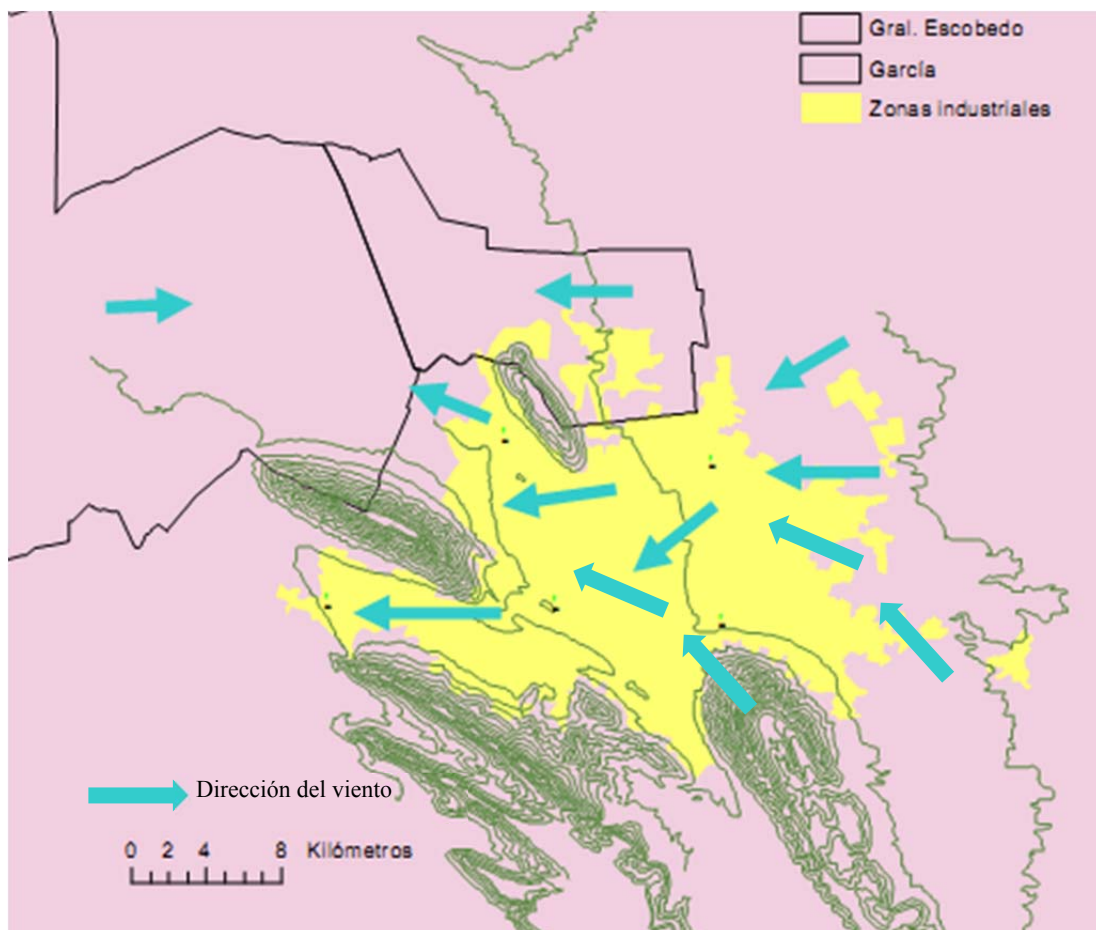


Figura 4 Dirección de los vientos predominantes en el AMM.

Las características anteriores y el hecho de ser un área industrial, con un número de habitantes y de vehículos considerablemente elevado, han llevado a la aparición de episodios de severa contaminación atmosférica. Por esta razón, en 1992 se estableció el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA). Este sistema está

compuesto actualmente por una red de 8 estaciones de monitoreo que miden continuamente los niveles de los siguientes contaminantes: CO, O₃, NO₂, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}; la localización de los sitios de monitoreo del SIMA se muestran en la Figura 5. De acuerdo a los reportes del SIMA, los niveles de PM_{2.5} desde la implantación de su monitoreo han sido superiores a 15 µg/m³, que es el límite establecido en la norma oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 (Figura 6).



Figura 5 Localización de las estaciones de monitoreo del SIMA en el AMM.

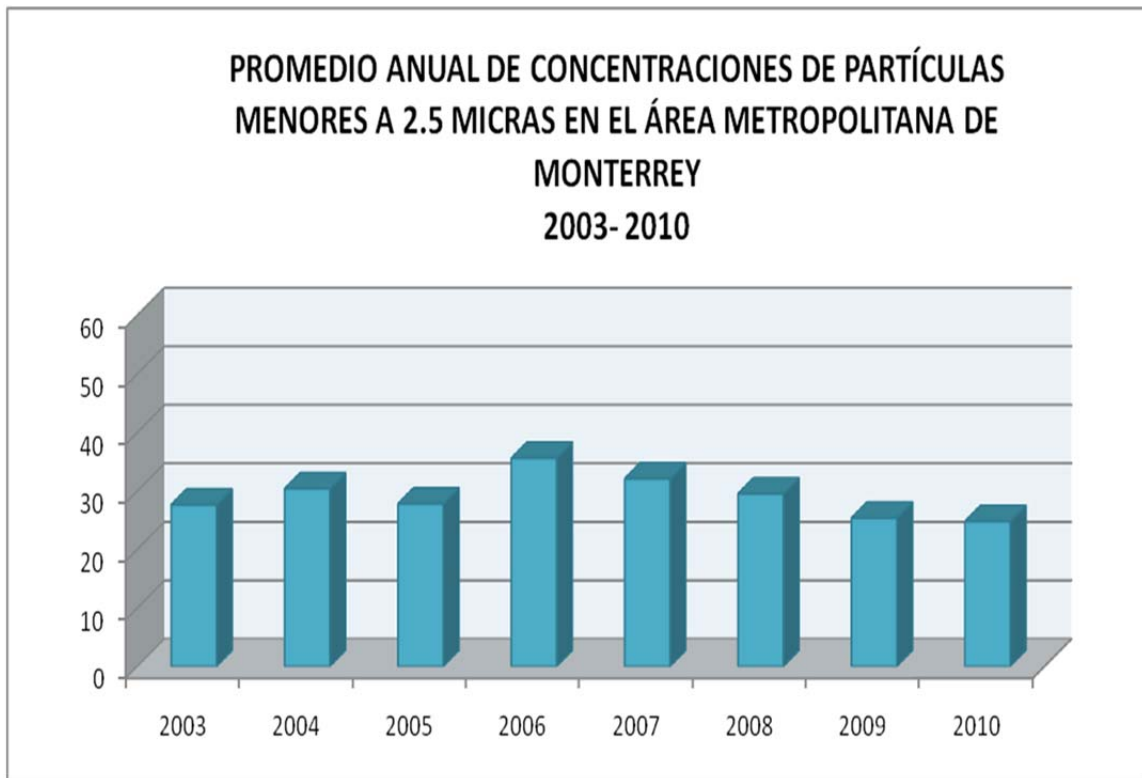


Figura 6 Promedio anual de concentraciones de partículas menores a 2.5 micras en el Área Metropolitana de Monterrey, período 2003-2010.

La exposición a partículas finas se asocia con aumentos en la morbilidad y mortalidad en la población y a la fecha no existen estudios relacionados con la caracterización química de las partículas ambientales en el AMM. El conocimiento de la composición química de las partículas ambientales finas, particularmente del contenido de compuestos con alto impacto a la salud, como lo es el contenido de su fracción metálica, aportará información que servirá para el establecimiento de políticas ambientales encaminadas tanto al control de la contaminación del aire y así como a mejorar la salud de la población expuesta, particularmente de las personas más sensibles, los niños y adultos mayores. Estos datos además proporcionarán información que permitirá establecer si las $PM_{2.5}$ de diferentes lugares tienen el mismo potencial de toxicidad.

Justificación

Considerando que los niveles de $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey rebasan los niveles establecidos por la norma oficial mexicana, el gran número de habitantes del AMM con exposición a estas partículas, la escasa información de la composición de su fracción metálica, la comprobada toxicidad de los metales, así como la correlación reportada entre el contenido de metales en las $PM_{2.5}$ y el incremento en enfermedad cardiovascular, respiratoria y aumento en el índice de mortalidad, se planteó el presente trabajo de investigación.

Objetivo General.

Caracterización del contenido de metales en partículas $PM_{2.5}$ en dos zonas del Área Metropolitana de Monterrey.

Objetivos Específicos.

1. Obtener muestras de partículas ambientales $PM_{2.5}$ en dos zonas del AMM durante un periodo de un año.
2. Analizar el contenido de partículas $PM_{2.5}$ en las muestras obtenidas.
3. Realizar un rastreo selectivo del contenido de Pb, As, Cd, Ni, Mn, Fe, Cr, V, Cu, en las muestras obtenidas.
4. Seleccionar y validar el procedimiento analítico para la cuantificación de los metales en base a los hallazgos del punto anterior.
5. Cuantificar los metales en las partículas ambientales $PM_{2.5}$.
6. Comparar el contenido de los metales en las dos zonas de estudio.

CAPÍTULO II

Material y Métodos.

2.1 Material.

2.1.1 Equipos e instrumentos.

- Muestreador de alto volumen Hi-Vol para partículas PM_{2.5}TICHS® Environmental.
- Espectrofotómetro de Absorción atómica acoplado con Horno de Grafito y Generación de Hidruros Perkin Elmer 5100 PC.
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica con Horno de Grafito Varian 800 W.
- Espectrofotómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado de Forma Inductiva (ICP-OES) Perkin Elmer Optima 4300 DV.
- Lámpara de Cátodo hueco de plomo Photron.
- Lámpara de Cátodo hueco de manganeso Photron.
- Lámpara de Cátodo hueco de hierro Photron.
- Lámpara de Cátodo hueco de níquel Photron.
- Lámpara de Cátodo hueco de arsénico Perkin Elmer.
- Campana de extracción.
- Balanza analítica.
- Plancha de calentamiento.
- Termohigrómetro.

- Kit de calibración del equipo Hi-Vol Variflo.
- Manómetro.

2.1.2 Material de Laboratorio.

- Desecador.
- Rebanador de policarbonato.
- Gradillas para tubos de ensayo.
- Micropipetas de 100, 1000 μL .
- Puntillas de 100, 1000 μL .
- Matraces de aforación de 10,25, 100, 250, 500 mL.
- Pipetas volumétricas de 10 mL.
- Vaso Griffin de 125, 500, 1000 mL.
- Vidrio de reloj.

2.1.3 Reactivos.

- Filtros de Fibra de vidrio GF/A Watman. (No Cat. 1820-866).
- Agua bidestilada.
- Estándar de hierro Accu Standard.
- Estándar de manganeso Accu Standard.
- Estándar de arsénico Accu Standard.
- Estándar de níquel Accu Standard.
- Estándar de cadmio Accu Standard.
- Estándar de plomo Accu Standard.
- Estándar de cromo Accu Standard.
- Estándar de paladio Riccha Chemical Company.

- Ácido clorhídrico Tracemetal. Tedia.
- Ácido nítrico Tracemetal. Tedia.
- Ácido nítrico grado ACS CTR.
- Hidróxido de sodio grado ACS CTR.
- Fosfato de amonio dihidratado. Merck.
- Borohidruro de sodio grado ACS. Fermont.
- Tritón X100 Sigma Ultrapure. Sigma Aldrich.
- Sílica gel.
- Argón grado Absorción Atómica.
- Acetileno grado Absorción Atómica.

2.2 Métodos.

2.2.1 Obtención de PM_{2.5}.

El muestreo de partículas se realizó cada 6 días durante el periodo de febrero 2008 a febrero 2009. Se utilizó en cada sitio un muestreador de alto volumen (TISH® Environmental), con separador para partículas PM_{2.5} (Figura 7). En situaciones de lluvia o humedad relativa mayor al 80 %, se cambió el día de muestreo por el siguiente día y así sucesivamente, hasta 3 días consecutivos. Se registraron las condiciones meteorológicas de temperatura, humedad y velocidad del viento en las estaciones suroeste (SO) y centro (CE) del SIMA.



Figura 7 Aspecto del muestreador de alto volumen colocado en la Zona 2.

Sitio de Muestreo.

La selección del sitio de muestreo se llevó a cabo tomando en cuenta los niveles de contaminación en las diferentes zonas, así como la conveniencia de colocar los equipos en tales sitios. Para la Zona 1, el equipo Hi-Vol se colocó en el edificio de cardiología de la Facultad de Medicina de la U.A.N.L. ubicado en el cruce de las avenidas Francisco I. Madero y Dr. José Eleuterio González, en el municipio de Monterrey, que corresponde a la zona centro (CE) del AMM de acuerdo al SIMA. En la Zona 2, el equipo se colocó en la estación de monitoreo suroeste del SIMA, ubicada en el municipio de Santa Catarina al suroeste (SO) del AMM (Figura 7). La Zona 1 representa una zona con alto tráfico vehicular y la Zona 2 representa una zona con alto tráfico vehicular y con potencial exposición industrial. Según datos del SIMA, esta

última zona presenta los niveles más altos de contaminación con respecto a las otras estaciones de monitoreo.

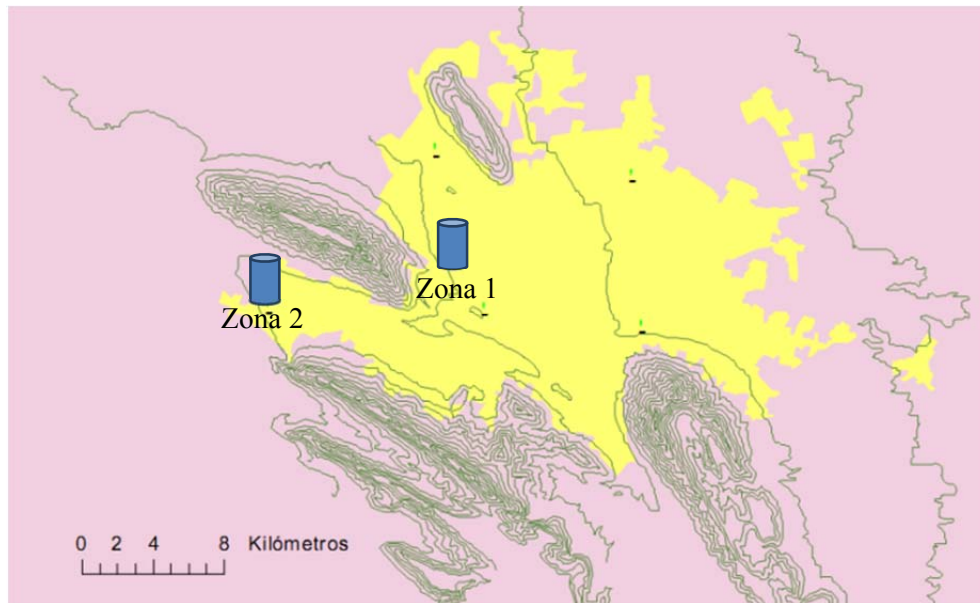


Figura 8 Zonas de Monitoreo de partículas $PM_{2.5}$.

Calibración del equipo Hi-Vol.

La calibración del muestreador de partículas $PM_{2.5}$ se realizó el día en que se colocó en el sitio de monitoreo y cuando se le dio mantenimiento al motor (cada 700 horas de muestreo). En el Anexo 1 se detallan los pasos para la calibración del equipo.

Obtención de la muestra.

Previo a su utilización, se realizó una inspección visual del filtro con el fin de detectar perforaciones, posterior a ello, éste fue acondicionado por 24 horas a una temperatura $20 \pm 5^{\circ}C$ y una humedad relativa $<50\%$. Para mantener el filtro en estas condiciones, éste se colocó en un desecador con sílica gel. Cada filtro se marcó en 2 esquinas con un código interno de 6 dígitos. Los primeros 2 dígitos del código correspondieron al año, el tercero al tipo de estudio (2 para metales) y los últimos 3 a la secuencia numérica en que fueron utilizados para el muestreo. Por ejemplo: 082001

correspondió a la primera muestra de partículas $PM_{2.5}$ para el análisis de metales del año 2008. Posteriormente, se pesó en una balanza analítica de 4 dígitos decimales. Lo anterior en conformidad al compendio de métodos para la determinación de componentes inorgánicos en aire ambiental ⁽⁴⁶⁾. Una vez pesado, se transportó el filtro al sitio de muestreo y se colocó en el muestreador de partículas $PM_{2.5}$ Hi-Vol (Figura 9), el equipo se dejó encendido por 2 minutos, se registró la caída de presión del Venturi y posteriormente, se dejó funcionando por 24 ± 1 horas.



Figura 9 Posición del filtro en el equipo Hi-Vol. A la izquierda antes del muestreo, y a la derecha posterior al muestreo.

Transcurrido el tiempo de muestreo, se registró nuevamente la caída de presión del Venturi, se apagó el equipo y se retiró el filtro, se dobló a lo largo para que las partículas no quedaran expuestas y se envolvió con papel y se transportó dentro de un sobre. La muestra fue rechazada si hubo bajas considerables del voltaje en el equipo o si el tiempo de muestreo fue menor a 23 horas.

El filtro con muestra se acondicionó por 24 horas a las mismas condiciones de temperatura y humedad previas al muestreo. Posteriormente, se pesó y se almacenó a temperatura ambiente hasta su análisis.

El volumen de aire total muestreado (m^3) se calculó considerando los datos de temperatura ambiental, presión atmosférica y las caídas de presión inicial y final del Venturi (Anexo 2).

2.2.2 Determinación del contenido de $PM_{2.5}$.

Los niveles de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) se calcularon con el volumen de aire muestreado y la diferencia de los pesos inicial y final de los filtros (Anexo 2). Para evaluar cumplimiento de las zonas de estudio con respecto a la concentración de partículas menores a 2.5 micrómetros, se empleó la NOM-025-SSA1-1993 "Criterios para evaluar la calidad del aire ambiental", se determinó el promedio anual de los valores diarios, y el percentil 98 de los valores diarios. El percentil 98 se define como el valor de la concentración de partículas, por debajo del cual están el 98% de todos los valores diarios distintos obtenidos en un año de monitoreo. El procedimiento para el cálculo del percentil 98 se muestra en el Anexo 3.

Para comparar el contenido de las partículas menores a 2.5 micrómetros, se realizó un análisis de varianza bajo un diseño de bloques al azar y la comparación de medias se hizo por el método de diferencia mínima significativa. Esta prueba determina el valor mínimo necesario para considerar diferentes dos tratamientos. Si la diferencia entre dos medias es mayor que un producto estadístico dado, se declara el resultado significativo, si la diferencia es igual o menor que el producto, se declara el resultado no significativo ⁽⁴⁸⁾.

2.2.3 Rastreo selectivo del contenido de metales en las $PM_{2.5}$.

En base a la literatura reciente, donde se ha encontrado una asociación entre la presencia de metales en las partículas ambientales con un aumento en la incidencia de

enfermedades cardiovasculares y respiratorias y el aumento en la mortalidad, así como al hecho de estar catalogados por la EPA como contaminantes tóxicos del aire, se realizó una estimación selectiva del contenido de plomo, arsénico, níquel, manganeso, fierro, cromo, vanadio y cobre en las $PM_{2.5}$, para ello se utilizó la técnica de Espectrofotometría de Emisión Atómica por Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES).

Se obtuvieron digeridos de cada uno de los filtros para su análisis por ICP-OES. Para ello, se cortó una tira de 1 x 8 pulgadas de cada filtro con ayuda de una plantilla cuadrículada. Como herramienta de corte se utilizó un cortador de policarbonato para disminuir cualquier transferencia de metal a los filtros. Cada tira de filtro se transfirió a un vaso Griffin. Se añadieron 10 mL de una solución de HCl/HNO₃(16.75/5.55%) con el uso de una pipeta volumétrica, y se verificó que esta solución cubriera al filtro. Se colocó el vaso Griffin tapado con un vidrio de reloj, en una plancha de calentamiento dentro de una campana de extracción. Se dejó en reflujo suave por 30 minutos. Una vez transcurrido el tiempo, los vasos se retiraron de la plancha de calentamiento y se dejaron enfriar. Se enjuagaron las paredes del vaso con aproximadamente 10 mL de agua tipo 1 y se permitió reposar la solución por al menos 30 minutos. Se transfirió el digerido y se aforó en matraz de 25 mL ⁽⁴⁶⁾.

Para el análisis por ICP-OES se prepararon gráficas de calibración para cada uno de los metales. El intervalo de cada una de las gráficas de calibración se preparó en base a la literatura reportada en ng/m³ y se extrapoló a µg/L considerando el nivel de aforo en nuestro laboratorio.

El cálculo del contenido del metal de interés en cada filtro se obtuvo mediante la sustracción del metal presente en el blanco al metal presente en la muestra problema como se describe en la siguiente ecuación.

$$C = 1000 * [(\mu\text{g/L}) \times (\text{Volumen final de extracción}) \times (9)] - F_b / V_{\text{aire}}$$

Dónde:

C = Concentración del metal en ng/m^3

$\mu\text{g/L}$ = Concentración del metal obtenida en la muestra problema

Volumen final de extracción: Volumen en litros al cuál se aforo cada muestra

9 = Factor que resulta de dividir el área total del filtro entre el área del filtro analizada

F_b = Concentración promedio de metal presente en los filtros blanco en $\mu\text{g/L}$

V_{aire} = Volumen de aire muestreado en cada filtro en m^3

1000 = Factor para convertir $\mu\text{g/m}^3$ a ng/m^3 .

2.2.4 Selección de metales a cuantificar y validación del procedimiento analítico para la cuantificación en las $\text{PM}_{2.5}$.

2.2.4.1 Selección de los metales.

La selección de los metales a cuantificar se realizó en base a los siguientes criterios: la presencia del metal en el rastreo selectivo, su asociación con efectos tóxicos a la salud y su regulación oficial como contaminante del aire (México, Estados Unidos, Unión Europea).

2.2.4.2 Selección y validación del procedimiento analítico.

La técnica instrumental a utilizar para la validación de cada metal, se seleccionó en base a la concentración encontrada en el rastreo, y se eligió entre las siguientes: Espectroscopia de Absorción Atómica con Flama, Espectroscopia de Absorción Atómica con Horno de Grafito, Espectroscopia de Absorción Atómica con Generación de Hidruros.

2.2.4.2.1 Técnica Analítica.

La Espectrofotometría de Absorción Atómica es una técnica de medición de magnitudes químicas de elementos (análisis cuantitativo), cuyo principio es la medición de la radiación absorbida, característica del elemento químico a medir. La medición se realiza al hacer incidir, sobre el elemento químico, una radiación proveniente de una fuente independiente de luz monocromática específica para el elemento a medir, la radiación absorbida se determina por diferencia, entre la radiación incidente y la transmitida ⁽⁴⁷⁾.

La Espectroscopia de Absorción Atómica con Generación de Hidruros es una técnica útil para la determinación de elementos como arsénico y mercurio, cuyas líneas analíticas se encuentran en la región ultravioleta, cerca de los 200 nm. Estos elementos pueden experimentar severas interferencias por dispersión de fondo, debidas a la presencia de partículas sólidas en la matriz. Los hidruros de estos elementos, por ser volátiles escapan de la matriz disminuyendo así las interferencias.

La Espectroscopia de Absorción Atómica con Horno de Grafito permite la determinación de elementos a nivel de $\mu\text{g/L}$, emplea volúmenes muy pequeños y

permite analizar muestras muy complejas, esto es debido a que el elemento es completamente atomizado y llevado a fase de vapor ^(51,52).

2.2.4.2.2 Optimización de condiciones instrumentales.

En el caso de Espectroscopia de Absorción Atómica con Flama o Espectroscopia de Absorción Atómica con Generación de Hidruros, se optimizó el tipo de flama.

Para los metales en los cuales se trabajó con Espectroscopia de Absorción Atómica con Horno de Grafito se optimizaron las temperaturas y tiempo para las etapas de secado, calcinado y atomizado ⁽⁵²⁾.

Secado: En esta etapa ocurre la evaporación de la solución y el escape de los vapores a través del orificio del tubo de grafito. Esta etapa puede durar de 10 segundos a varios minutos, por lo general se realiza a 105°C en el caso de soluciones acuosas con el fin de evitar salpicaduras de la muestra.

Calcinado o destrucción de Matriz: Durante esta etapa la matriz se descompone y remueve por volatilización. La temperatura debe seleccionarse de manera tal que sea la matriz y no el analito el evaporado. Por lo general, se realiza a temperaturas entre 100 y 1,000°C.

Evaporado o Atomizado: La temperatura se escoge de manera que el analito sea evaporado, varía desde 800°C a 2,700°C. Este paso, normalmente puede durar 10 segundos pero no más.

Limpieza: La temperatura se lleva al máximo, por lo general 3,000°C con el fin de remover cualquier residuo de evaporación y minimizar efectos de memoria.

2.2.4.2.3 Validación del procedimiento analítico.

Una vez seleccionados los procedimientos aplicables a cada metal, se procedió a su validación en matriz limpia, se mantuvieron las condiciones de acidez resultantes del tratamiento de los filtros descrito en el numeral 2.2.3.

Los parámetros evaluados fueron: linealidad e intervalo de trabajo, límite de cuantificación, precisión a condición de repetibilidad, precisión intermedia a condición de reproducibilidad y veracidad ^(47, 53,54).

Linealidad: Se prepararon por cuadruplicado, soluciones estándar a cinco niveles de concentración. Como indicadores se emplearon el coeficiente de correlación (linealidad) y el porcentaje de error (intervalo de trabajo).

Límite de cuantificación: Se prepararon por cuadruplicado, soluciones estándar de calibración del punto inferior de la gráfica de calibración. Se determinó el coeficiente de variación y el porcentaje de error.

Precisión a condiciones de repetibilidad: Se prepararon por quintuplicado, soluciones estándar a concentraciones baja, media y alta distintas a la gráfica de calibración. Se determinó el coeficiente de variación.

Precisión intermedia a condiciones de reproducibilidad: Se prepararon por duplicado soluciones estándar a concentraciones baja, media y alta distintas a la gráfica de calibración.

Veracidad: Se analizaron diez réplicas de las soluciones control al punto medio de la gráfica de calibración. Se determinó el porcentaje de recuperación.

2.2.5 Cuantificación de los metales en PM_{2.5}.

La cuantificación de los metales se realizó con las mismas muestras digeridas empleadas para el rastreo selectivo (numeral 2.2.3).

Con el propósito de obtener datos que cumplieran con criterios de calidad durante la ejecución de las pruebas y análisis, se implementó un sistema de calidad pre-analítico (validación) y analítico descrito en “Determinación de metales en material particulado ambiental usando Espectroscopia de Absorción Atómica”. Los criterios de calidad del sistema se muestran en la Tabla 1 ⁽⁴⁶⁾.

2.2.6 Comparación del contenido de metales presentes en las PM_{2.5} de las zonas de estudio.

Para comparar el contenido metales en las partículas menores a 2.5 micrómetros, se realizó un análisis de varianza bajo un diseño de bloques al azar y la comparación de medias se hizo por el método de diferencia mínima significativa.

Tabla 1 Control de calidad utilizado en el análisis de las muestras

PROCEDIMIENTO DE CALIDAD	FRECUENCIA	INDICADOR	CRITERIO DE ACEPTACIÓN
Calibración inicial	Al inicio del análisis	Coeficiente de correlación	> 0.995
Verificación inicial de la calibración	Después de la calibración	Concentración	90 a 110%
Blanco de calibración	Después de la Verificación de la calibración	Concentración	< Límite de cuantificación
Verificación continúa la calibración	Cada 10 muestras	Concentración	80 a 120%
Muestra duplicada	1 cada 20 muestras	Diferencia porcentual relativa	< 20%
Muestras fortificadas	1 cada 20 muestras	Recobro	85 a 115%

CAPÍTULO III

Resultados.

3.1 Obtención de las muestras.

Se obtuvieron un total de 100 muestras, 50 muestras en la Zona 1 y 50 en la Zona 2, durante el periodo comprendido de febrero 2008 a febrero 2009. Los datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento) se obtuvieron de las estaciones centro (CE) y suroeste (SO) a través del Sistema Integral del Monitoreo Ambiental (SIMA).

3.2 Determinación del contenido de PM_{2.5}.

En la Zona 1, los valores mínimos y máximos de partículas PM_{2.5} fueron de 9.12 y 87.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, con un promedio anual de 26.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la Zona 2, los valores mínimos y máximos fueron 10.51 y 93.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, con un promedio anual de 26.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 30.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Para el cumplimiento de la NOM-025-SSA1-1993 con respecto a promedio de 24 horas de PM_{2.5} es necesario que el valor del percentil 98 sea menor o igual a 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En nuestro caso, los percentiles 98 de ambas zonas se encuentran por encima del valor establecido, 86.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 93.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para la Zona 1 y 2 respectivamente. La diferencia en el promedio anual de las dos zonas fue de 3.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabla 2). Los

promedios mensuales de PM_{2.5} se presentan en la Tabla 3 y los resultados diarios se muestran en la Tabla 4

Tabla 2 Estadística descriptiva de la concentración de PM_{2.5} (µg/m³).

Sitio de muestreo	N	Mínimo	Máximo	Media	Percentil 98	Desviación estándar.
Zona 1	50	9.12	87.04	26.11	86.38	12.22
Zona 2	50	10.51	93.33	30.02	93.02	14.58

Tabla 3 Promedio mensual de las concentraciones PM_{2.5} (µg/m³).

Mes	Zona 1	Zona 2
Marzo 2008	25.78	40.43
Abril 2008	30.23	30.49
Mayo 2008	38.32	39.04
Junio 2008	19.87	20.96
Julio 2008	22.96	26.59
Agosto 2008	21.94	24.16
Septiembre 2008	25.17	24.54
Octubre 2008	22.54	26.57
Noviembre 2008	23.58	26.12
Diciembre 2008	44.01	46.55
Enero 2009	18.97	24.26
Febrero 2009	25.20	34.20

Tabla 4 Niveles de PM_{2.5} por zona y fecha de muestreo.

Fecha de Muestreo	Concentración PM _{2.5} (µg/m ³)	
	Zona 1	Zona 2
jueves, 28 de febrero de 2008	27.50	36.80
miércoles, 05 de marzo de 2008	36.58	37.03
miércoles, 12 de marzo de 2008	17.49	18.66
lunes, 17 de marzo de 2008	32.78	93.33
lunes, 24 de marzo de 2008	22.64	27.40
viernes, 04 de abril de 2008	29.88	27.13
jueves, 10 de abril de 2008	33.48	32.00
miércoles, 16 de abril de 2008	27.93	31.42
martes, 22 de abril de 2008	35.63	35.05
martes, 29 de abril de 2008	24.24	26.86
domingo, 04 de mayo de 2008	25.09	28.39
sábado, 10 de mayo de 2008	54.15	54.50
jueves, 22 de mayo de 2008	35.71	34.22
martes, 03 de junio de 2008	18.20	19.39
lunes, 09 de junio de 2008	11.62	14.30
domingo, 15 de junio de 2008	19.30	28.53
sábado, 21 de junio de 2008	29.55	18.83
viernes, 27 de junio de 2008	20.69	23.74
jueves, 03 de julio de 2008	20.20	28.99
viernes, 11 de julio de 2008	17.99	19.73
martes, 15 de julio de 2008	28.31	32.01
lunes, 21 de julio de 2008	24.34	26.41
domingo, 27 de julio de 2008	23.96	25.80
sábado, 02 de agosto de 2008	19.35	23.61
viernes, 08 de agosto de 2008	20.37	20.57
viernes, 15 de agosto de 2008	26.11	28.30
martes, 02 de septiembre de 2008	27.09	29.70
domingo, 07 de septiembre de 2008	13.10	12.98
viernes, 19 de septiembre de 2008	28.46	19.20
sábado, 27 de septiembre de 2008	32.04	36.27
miércoles, 01 de octubre de 2008	25.66	30.14
martes, 07 de octubre de 2008	21.58	21.03
domingo, 19 de octubre de 2008	9.12	10.51
sábado, 25 de octubre de 2008	38.20	47.83
viernes, 31 de octubre de 2008	18.12	23.35
jueves, 06 de noviembre de 2008	21.73	30.01
miércoles, 12 de noviembre de 2008	28.53	21.91
martes, 18 de noviembre de 2008	20.49	26.44
sábado, 06 de diciembre de 2008	39.63	47.77
viernes, 12 de diciembre de 2008	14.34	19.90
jueves, 18 de diciembre de 2008	87.04	78.06
martes, 30 de diciembre de 2008	35.02	40.47
lunes, 05 de enero de 2009	21.61	31.24
domingo, 11 de enero de 2009	10.15	13.69
lunes, 19 de enero de 2009	15.39	19.42
viernes, 23 de enero de 2009	29.60	34.52
jueves, 29 de enero de 2009	18.08	22.41
martes, 10 de febrero de 2009	29.38	37.42
lunes, 23 de febrero de 2009	18.71	28.38
viernes, 06 de marzo de 2009	19.40	25.72

En las Figuras 10 y 11 se muestra la concentración de partículas $PM_{2.5}$ durante todo el período de muestreo así como los valores del promedio mensual.

El análisis de varianza se llevó a cabo bajo un diseño bloques al azar y la comparación de medias se hizo por el método de diferencia mínima significativa. En relación a las concentraciones de partículas ambientales menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), observadas tanto en la Zona 1 como en la Zona 2, la comparación de medias no mostró diferencia significativa (n. s.) entre los promedios, los cuales fueron de 26.11 y 30.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5 Comparación de medias por diferencia mínima significativa.

Comparación de medias por diferencia mínima significativa							
Variable dependiente	Zona 1	Zona 2	Diferencia de Medias (Zona 1 – Zona 2)	Error estándar	Significancia	Intervalo de confianza del 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Partículas ambientales ($PM < 2.5$ micrómetros)	1	2	-3.916	2.430	0.111 n. s.	-8.747	.915

Concentración de partículas PM_{2.5} por fecha de muestreo.

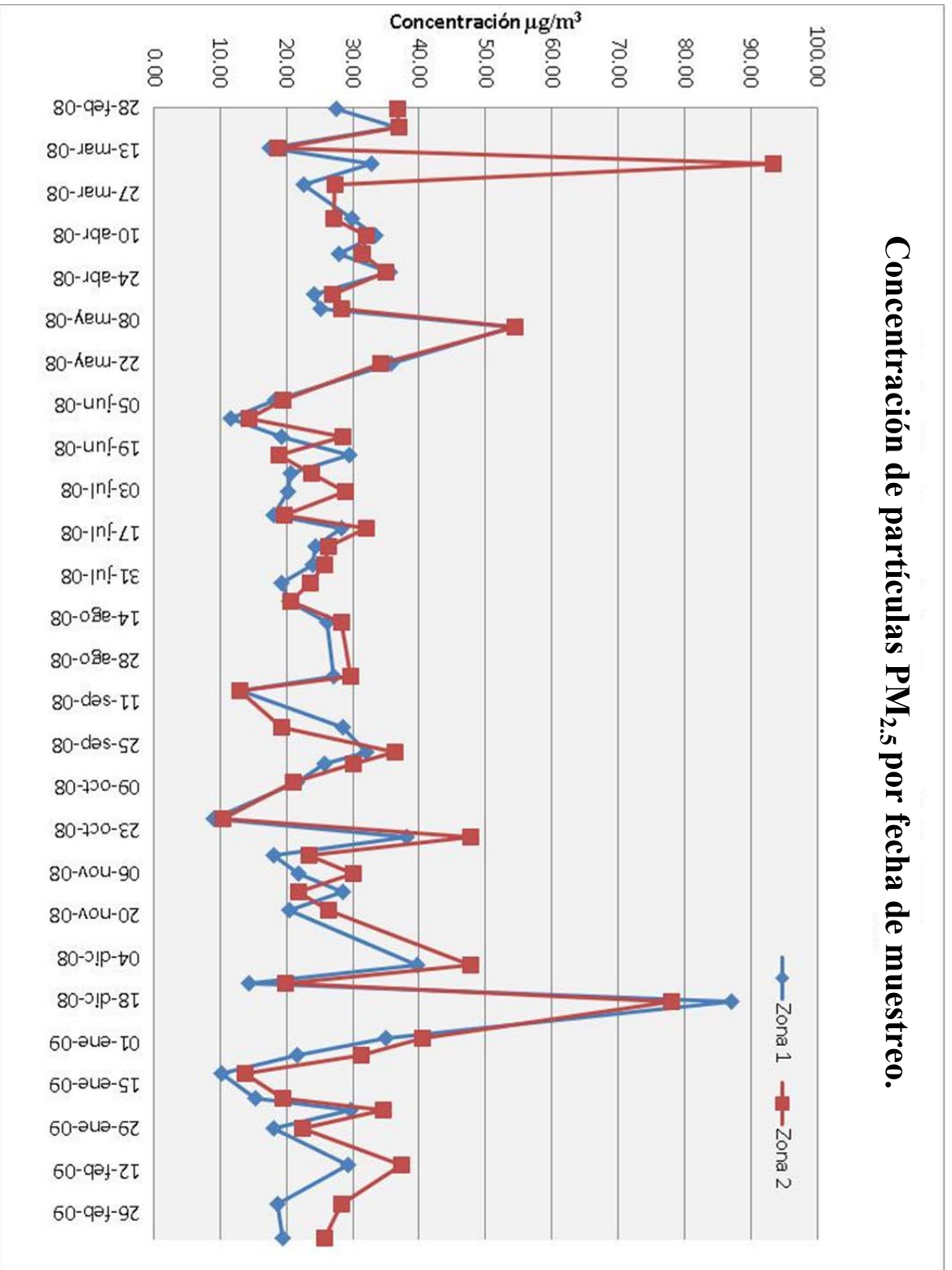


Figura 10 Concentración de partículas PM_{2.5} por fecha de muestreo.

Promedio mensual de la concentración de partículas

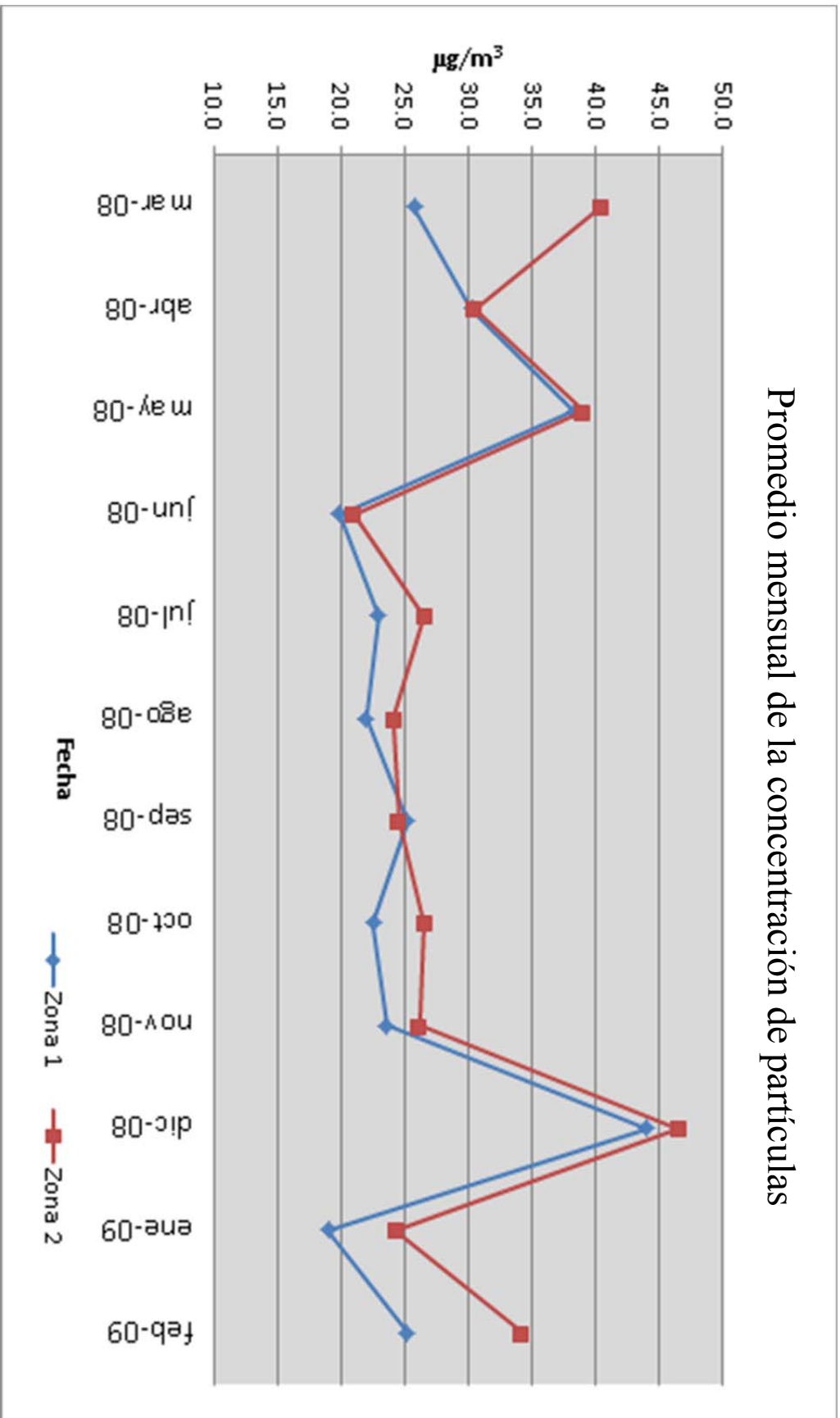


Figura 11 Promedio mensual de la concentración de partículas PM_{2.5}.

3.3 Rastreo selectivo del contenido de plomo, arsénico, cadmio, níquel, manganeso, fierro, cromo, vanadio y cobre.

Se construyeron gráficas de calibración, teniendo al menos cinco niveles de calibración cada una, los coeficientes de correlación para cada metal y el intervalo de trabajo utilizado se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Gráfica de calibración e intervalo de trabajo utilizado en el rastreo selectivo de metales.

Metal	Intervalo de lectura µg/L	(Equivalente en ng/m³)*	Coefficiente de correlación.
Fe	50 – 2,000	0 – 72.10	0.9998
Pb	50 – 2,000	3.03 - 267	0.9999
Mn	50 - 200	2.22 – 22.55	0.9997
Cu	50 – 1,000	5.52 – 134.28	0.9998
Cr	50 - 200	0 - 20	0.9998
As	50 – 200	0 – 9.52	0.9959
V	50 - 200	0 – 27.10	0.9996
Ni	50 – 200	0 – 23.42	0.9995
Cd	50 – 200	0 – 28.12	0.9966

*Considerando la sustracción del valor blanco.

Los promedios mensuales de la concentración estimada se muestran en las Figuras 12 a 20. El fierro, el plomo y el manganeso fueron los tres metales más abundantes (Tabla 7 y 8).

Tabla 7 Promedio mensual de la concentración estimada de metales en PM_{2.5} en la Zona 1.

Fecha	Metal (ng/m ³)								
	Fe	Pb	Mn	Cu	Cr	As	Ni	V	Cd
Marzo-2008	298.8	41.3	15	9.7	3.4	9.3	3	7.6	1.5
Abril-2008	339.1	16.5	9.1	6.6	2.6	6.3	2.3	7.7	0.3
Mayo-2008	180	35.8	10.2	6.4	3.4	5.6	2.7	6.1	0.4
Junio-2008	227.3	5.2	5.5	7.4	3.8	7	1.8	4.8	0.1
Julio-2008	295.6	22.3	9.4	8.7	3.8	5.8	2.2	5.2	0.3
Agosto-2008	235.6	20.4	9.8	8.8	4.8	7.8	1.8	4.7	0.7
Septiembre-2008	161.6	19.6	7.1	11	2.6	2	1.1	4.9	0.4
Octubre-2008	130.3	31.1	7	9.4	2.3	0	0.8	3.3	7.5
Noviembre-2008	147.3	40.5	9.5	10.1	1.7	1.9	1	3.6	0.5
Diciembre-2008	206.3	35.7	8.8	16.8	2.8	6.8	1.8	5.3	1.1
Enero-2009	235.7	31.1	18	12.2	1.6	2.3	1.5	5.5	0.5
Febrero-2009	133	28.9	13.2	10.6	0.9	1.5	0.8	1.5	0.3

Tabla 8 Promedio mensual de la concentración estimada de metales en PM_{2.5} en la Zona 2.

Fecha	Metal (ng/m ³)								
	Fe	Pb	Mn	Cu	Cr	As	Ni	V	Cd
Marzo-2008	270.3	32.4	21.7	7.9	1.8	6.7	2.2	5.5	0.2
Abril-2008	290.7	48.5	15	7.7	2.8	4.6	1.8	5.3	0.7
Mayo-2008	258.4	82	19.9	10	4.7	3.2	2.1	4.9	3
Junio-2008	185.6	12.8	12.1	8.8	3.1	5.1	1.4	4	0.6
Julio-2008	298.9	21.9	15.5	10	3.6	4.6	1.4	3.9	0.6
Agosto-2008	234.5	38.4	13.6	12.3	2.7	4.6	1.9	3.7	0.6
Septiembre-2008	165.1	33.5	12.6	10.1	2.2	0.8	0.9	3.9	0.4
Octubre-2008	379.3	66.1	26.8	12.1	1.7	1.6	1.1	2.6	3.7
Noviembre-2008	131.9	40.5	19.5	9.1	2.3	0.2	1	2.7	0.7
Diciembre-2008	265.1	59.9	26.3	11.8	2.4	4.2	1.3	3.5	0.6
Enero-2009	124.9	24.4	10.4	15.2	2.6	1.3	1.1	3.5	0.3
Febrero-2009	133	28.9	13.2	10.6	0.9	1.5	0.8	1.5	0.3

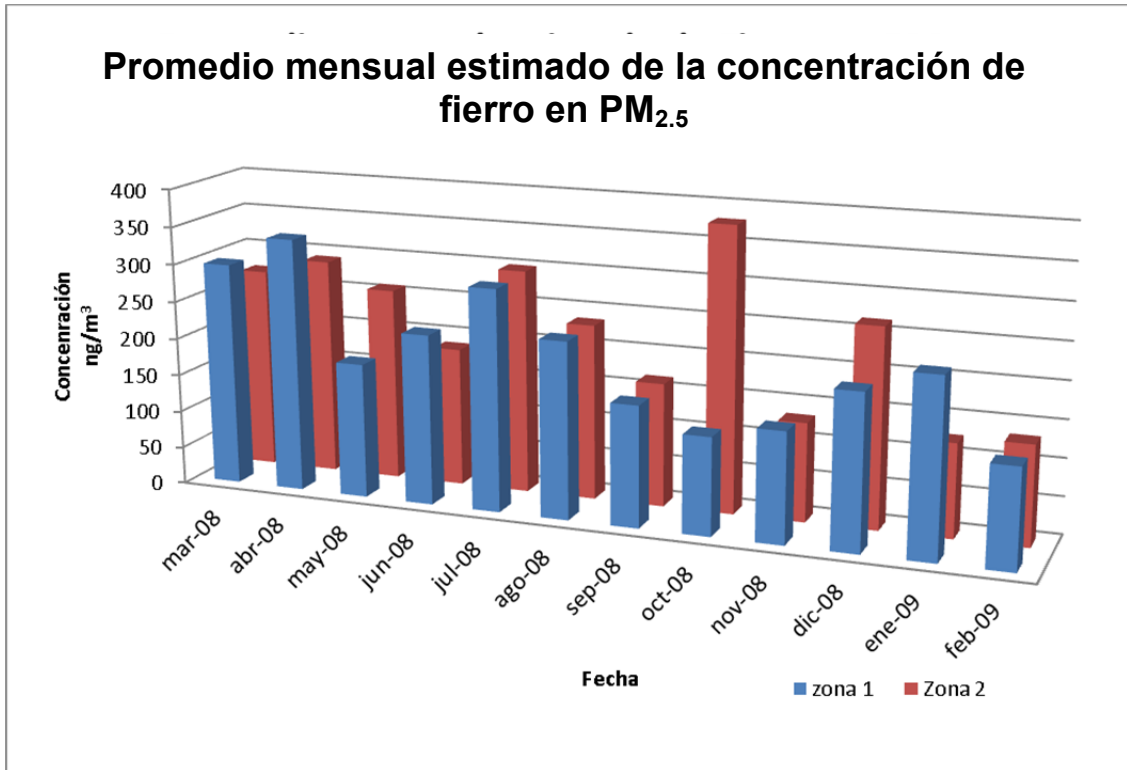


Figura 12 Promedio mensual estimado de la concentración de hierro en PM_{2.5}

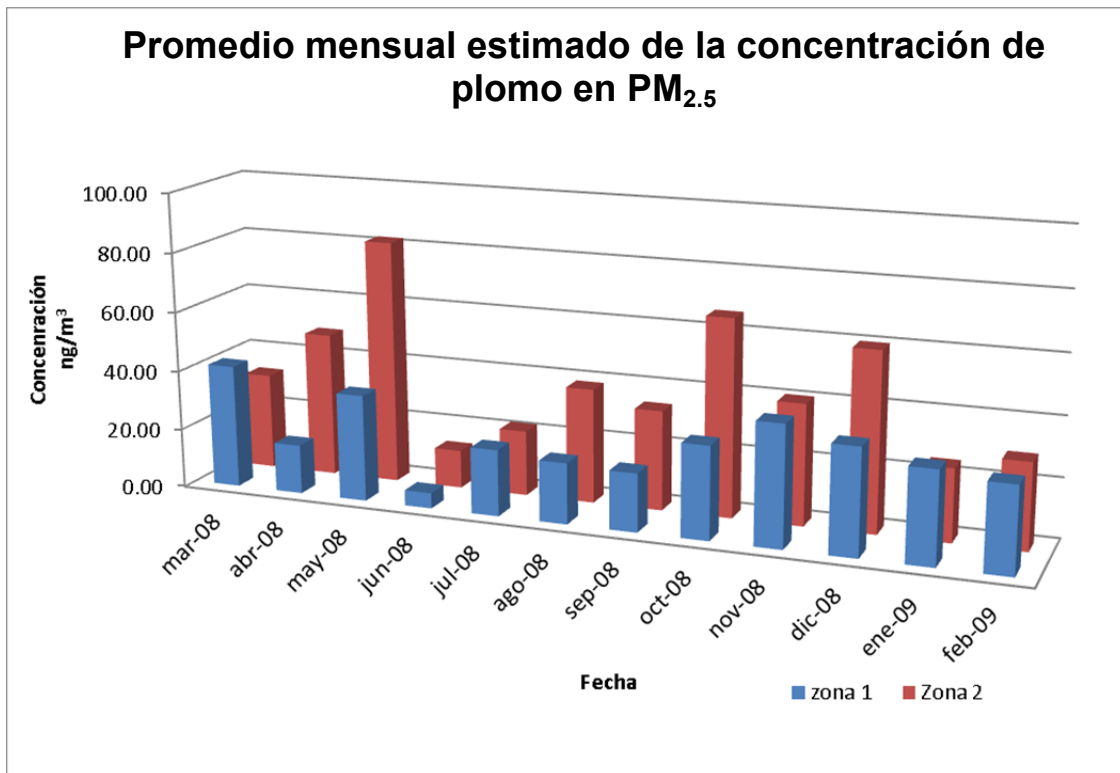


Figura 13 Promedio mensual estimado de la concentración plomo en PM_{2.5}

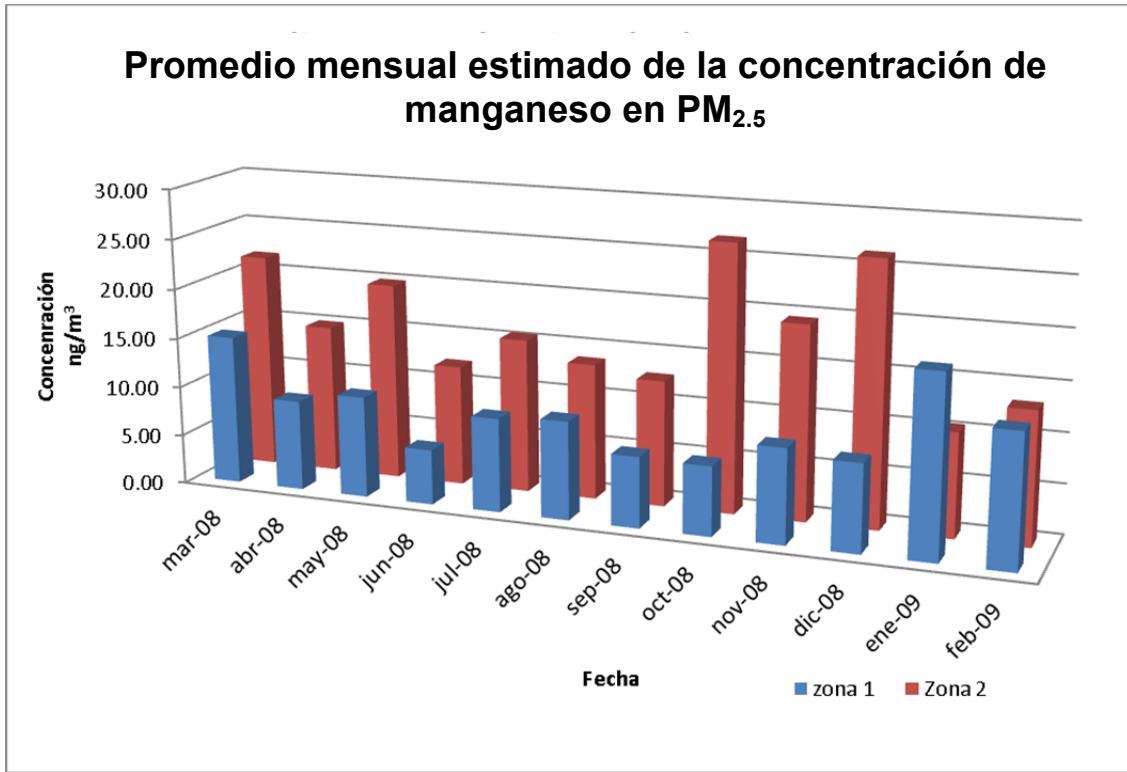


Figura 14 Promedio mensual estimado de manganeso en PM_{2.5}

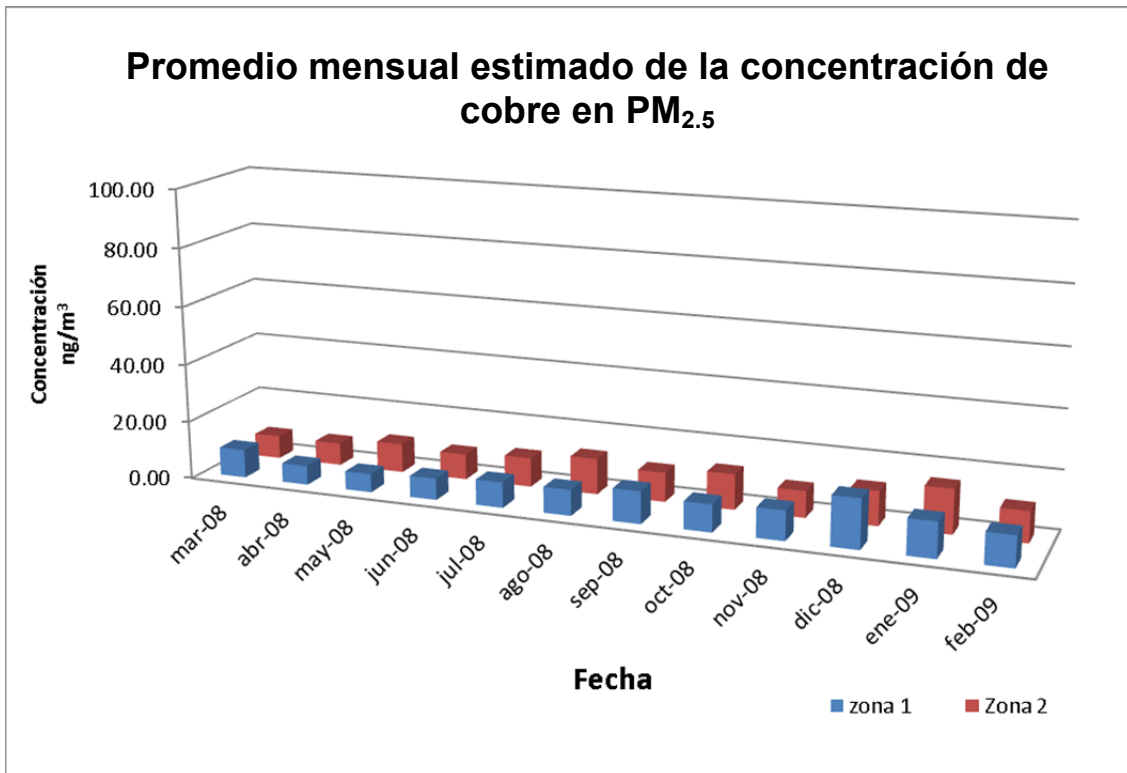


Figura 15 Promedio mensual estimado de cobre en PM_{2.5}

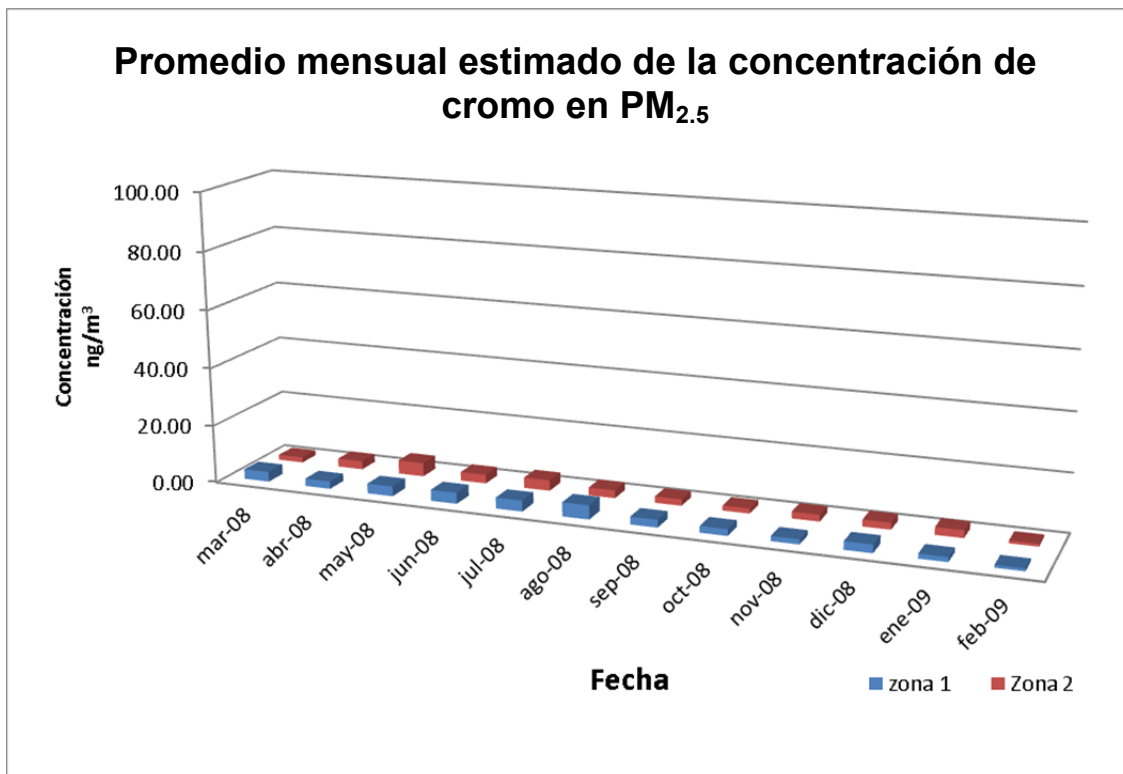


Figura 16 Promedio mensual estimado de cromo en PM_{2.5}

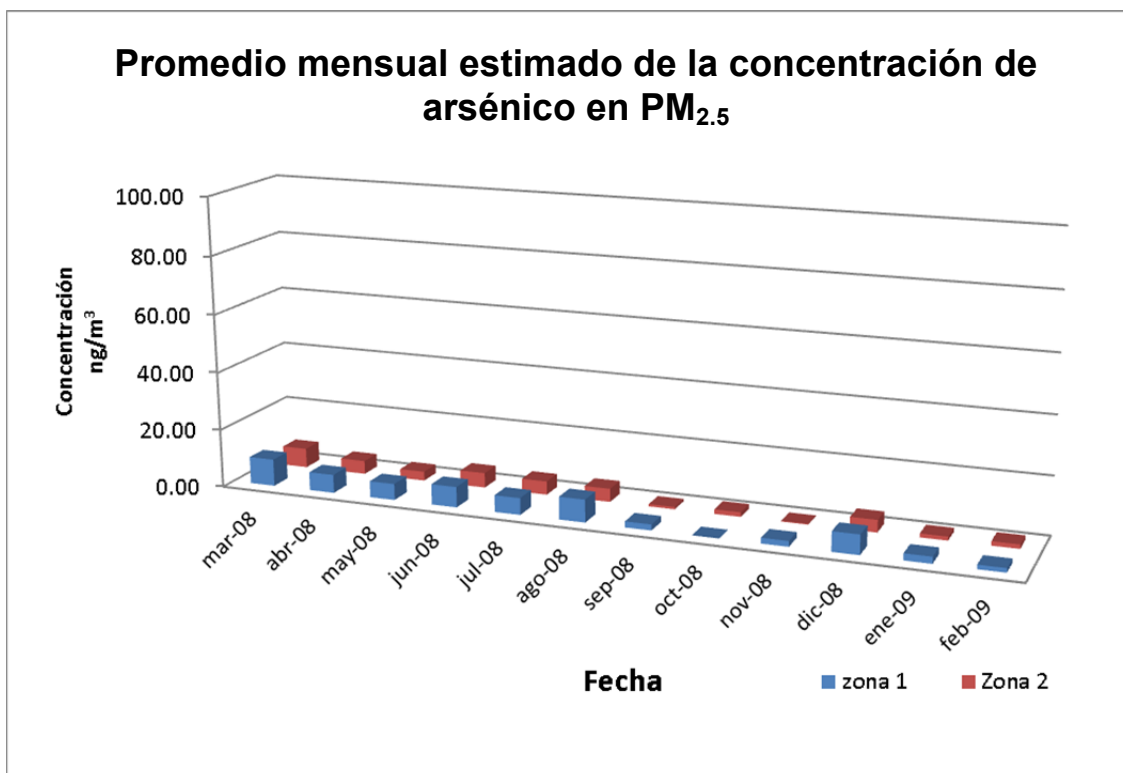


Figura 17 Promedio mensual estimado de arsénico en PM_{2.5}

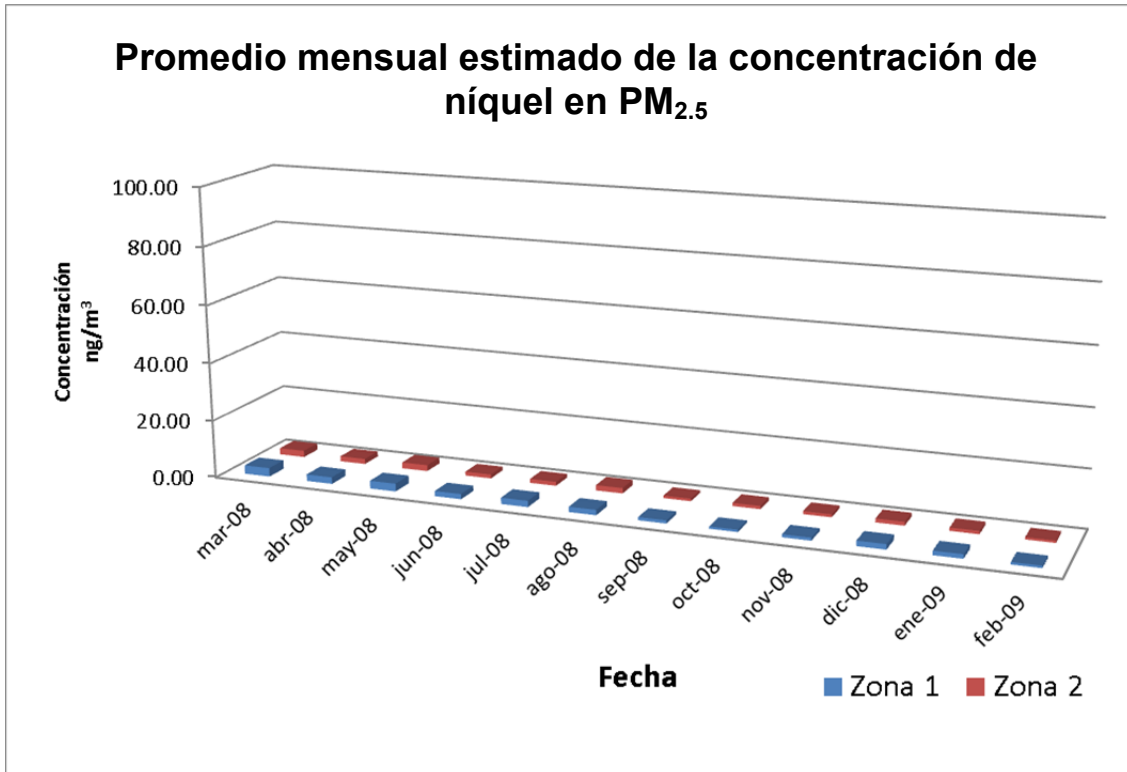


Figura 18 Promedio mensual estimado de níquel en PM_{2.5}

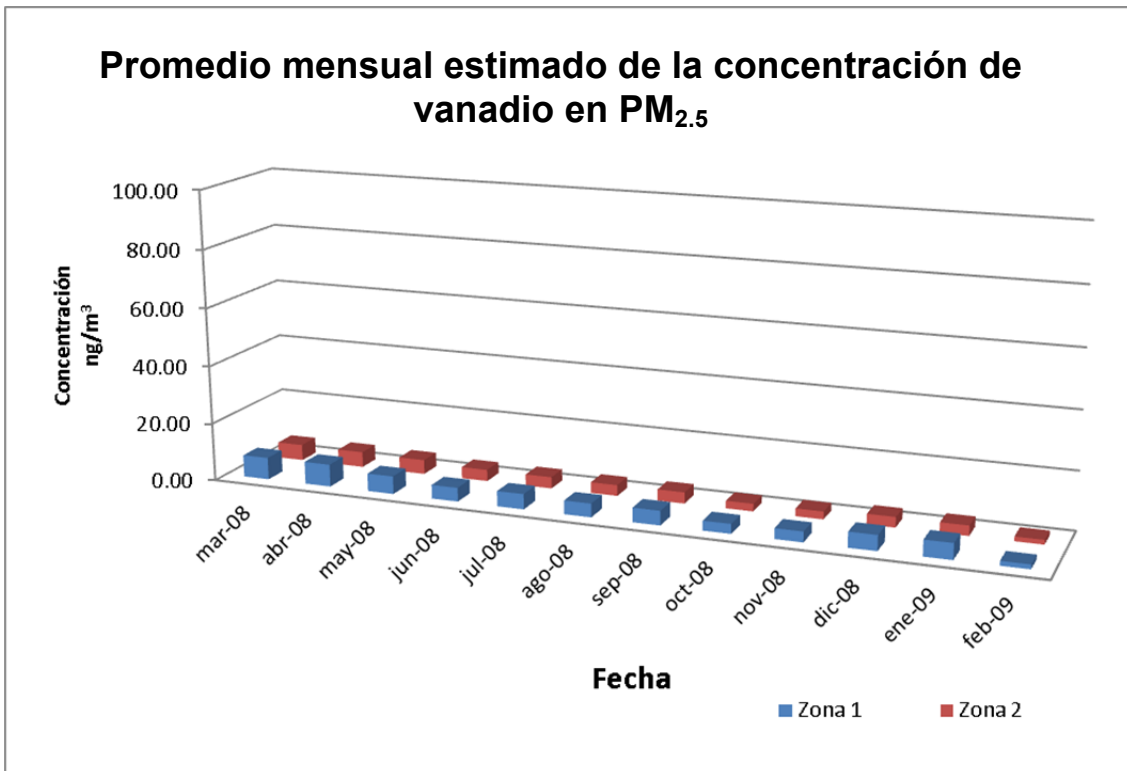


Figura 19 Promedio mensual estimado de vanadio en PM_{2.5}

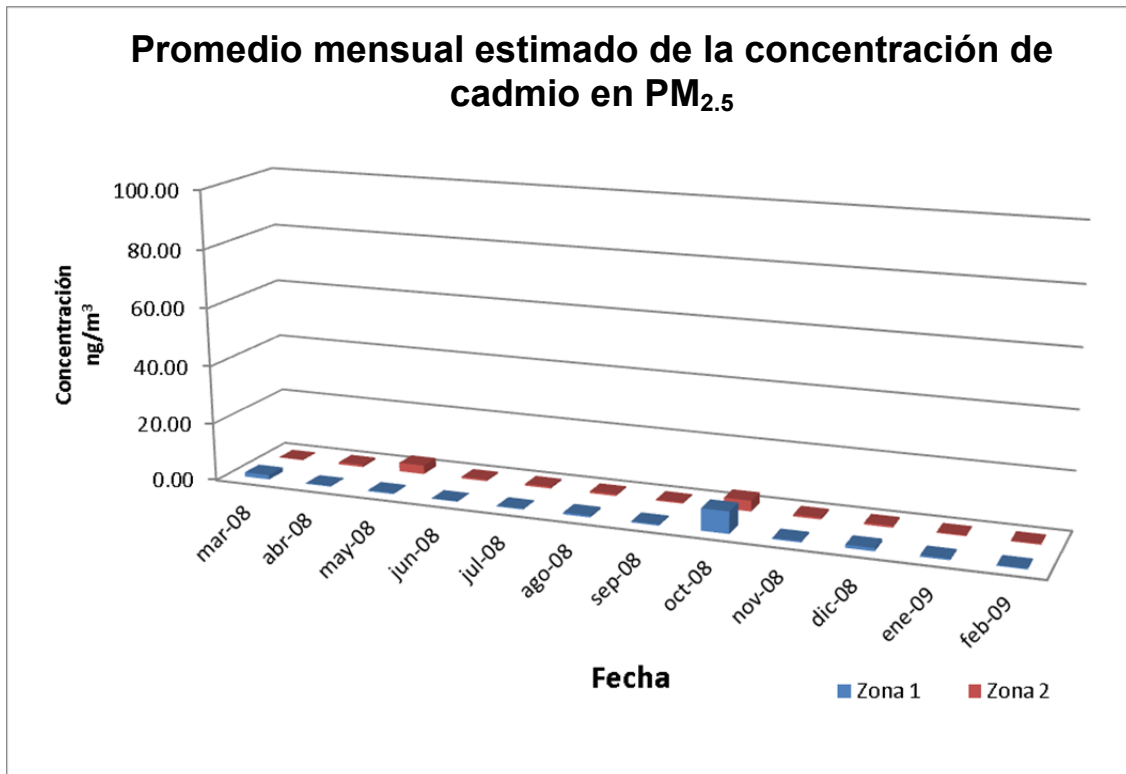


Figura 20 Promedio mensual estimado de cadmio en PM_{2.5}

3.4 Selección de metales a cuantificar y Validación del procedimiento analítico.

3.4.1 Selección de metales

Se seleccionaron bajo los criterios establecidos (su presencia en el rastreo, su asociación con efectos tóxicos como contaminante del aire y su regulación oficial como contaminante del aire) los siguientes metales: fierro, plomo, manganeso, arsénico y níquel. Las técnicas instrumentales empleadas para cada metal se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Técnicas Instrumentales utilizadas en la cuantificación de cada metal.

Metal	Técnica
Fe	EAA - Flama
Pb	EAA - Horno de Grafito
Mn	EAA - Horno de Grafito
As	EAA - Generación de Hidruros.
Ni	EAA - Horno de Grafito

3.4.2 Pre-validación del procedimiento analítico para la cuantificación de los metales en las PM_{2.5}.

Previo a la validación se establecieron las condiciones instrumentales de trabajo para cada uno de los procedimientos, para los métodos por Espectroscopia de Absorción Atómica en Horno de Grafito, se ensayaron diversos programas variando las condiciones de temperatura y tiempo en cada una de las etapas.

3.4.2.1 Pre-validación del procedimiento analítico para fierro.

Técnica: EAA-Flama

Flama: Aire-Acetileno

Longitud de onda: 248.3 nm

Corriente de la lámpara: 12 mA

Slit: 0.20 nm

3.4.2.2 Pre-validación del procedimiento analítico para plomo.

Técnica: EAA - Horno de Grafito

Tipo de Corrector: Zeeman

Longitud de onda: 283.3 nm

Corriente de la lámpara: 4 mA

Slit: 0.5m

Modo de medición: Área de Pico

Volumen de inyección: 10 μ L

Solución modificadora: 0.2 g de fosfato dibásico de amonio/100 mL

Tipo de inyección: En caliente a 50°C

La programación óptima del Horno de Grafito se muestra en la tabla 10

Tabla 10 Programa de tiempos y temperaturas para la determinación de plomo por Espectroscopia de Absorción Atómica por Horno de Grafito.

Etapa	Paso	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Flujo (L/min)	Lectura	Almacenamiento
Secado	1	150	20.0	1.5	No	No
Cenizado	2	250	20.0	1.5	No	No
	3	600	10.0	1.5	No	No
	4	600	5.0	1.5	No	No
	5	850	10.0	1.5	No	No
	6	850	1.0	0	No	Sí
Atomizado	7	2,300	1.5	0	Sí	Sí
	8	2,300	2.0	0	Sí	Sí
Limpieza	9	2,500	6.0	1.5	No	Sí

3.4.2.3 Pre-validación del procedimiento analítico para manganeso.

Técnica: EAA - Horno de Grafito

Tipo de Corrector: Zeeman

Longitud de onda: 279.5 nm

Corriente de la lámpara: 5mA

Slit: 0.2m

Modo de medición: Área de Pico

Volumen de inyección: 10 μ L

Tipo de inyección: En caliente a 50°C

Solución modificadora: Solución de Paladio, 80 mg/L

La programación óptima del Horno de Grafito se muestra en la tabla 11

Tabla 11 Programa de tiempos y temperaturas para la determinación de manganeso por Espectroscopia de Absorción Atómica por Horno de Grafito.

Etapa	Paso	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Flujo (L/min)	Lectura	Almacenamiento
Secado	1	150	20.0	3.0	No	No
Cenizado	2	250	20.0	3.0	No	No
	3	800	10.0	3.0	No	No
	4	800	5.0	3.0	No	No
	5	1,200	10.0	3.0	No	No
	6	1,200	1.8	0	No	Sí
Atomizado	7	2,400	1.5	0	Sí	Sí
	8	2,400	2.0	0	Sí	Sí
Limpieza	9	2,500	6.0	3.0	No	Sí

3.4.2.4 Pre-validación del procedimiento analítico para arsénico

Técnica: EAA-Generación de Hidruros **Flama:** Aire-Acetileno

Longitud de onda: 193.7 nm

Corriente de la lámpara: 16mA

Gas acarreador: Argón

Flujo del Gas acarreador: 400 mL/min

Concentración del Borohidruro de Sodio: 2%

Concentración del ácido clorhídrico: 3%

Slit: 0.7 nm

3.4.2.5 Pre-validación del procedimiento analítico para níquel.

Tipo de Corrector: Zeeman

Longitud de onda: 232.0nm

Corriente de la lámpara: 5mA

Slit: 0.2m

Modo de medición: Área de Pico

Volumen de inyección: 20 μ L

Tipo de inyección: En caliente a 50°C

Solución modificadora: Solución de paladio, 20mg/L

La programación óptima del Horno de Grafito se muestra en la tabla 12

Tabla 12 Programa de tiempos y temperaturas para la determinación de níquel por Espectroscopia de Absorción Atómica por Horno de Grafito.

Etapa	Paso	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Flujo (L/min)	Lectura	Almacenamiento
Secado	1	85	5	1.5	No	No
	2	95	40	1.5	No	No
Calcinado	3	120	10.0	1.5	No	No
	4	800	5.0	1.5	No	No
	5	800	1	1.5	No	No
	6	800	2	0	No	Sí
Atomizado	7	2,550	0.8	0	Sí	Sí
	8	2,550	2.0	0	Sí	Sí
Limpieza	9	2,550	2.0	1.5	No	Sí

3.4.3 Validación del procedimiento analítico.

Una vez optimizadas las condiciones instrumentales se realizó la validación del procedimiento analítico para cada metal. Para el intervalo de trabajo se tomaron en cuenta las concentraciones de lectura obtenidas en el rastreo selectivo de metales. En la Tabla 13 se muestra el intervalo validado para procedimiento.

Tabla 13 Intervalos de procedimientos validados.

Metal	Intervalo de Lectura (µg/L)	*(Equivalente a ng/m³)
Fe	1,000 – 8,000	0 – 787
Pb	50 - 750	0 – 92
Mn	20 – 320	0 – 33
As	20 – 320	0 – 39
Ni	20 – 100	0.1 – 12.36

*Calculo considerando la sustracción del blanco y un muestreo de 1600 m³

Cada procedimiento incluyó la evaluación de: linealidad, precisión (repetibilidad), precisión intermedia (reproducibilidad), límite de cuantificación y veracidad. ^(47, 52, 56) A continuación se muestran los resultados de cada uno de los procedimientos validados.

3.4.3.1 Validación del procedimiento analítico para la cuantificación de hierro.

En la Tabla 14 se presentan los resultados de la validación del procedimiento para la cuantificación de hierro. Los datos crudos del análisis y evaluación de la linealidad y el intervalo de trabajo, se muestran en las Tablas 15, 16 y 17. Los datos crudos del análisis y evaluación de precisión a condición de repetibilidad se muestran en las Tabla 18 y 19. Los datos crudos del análisis y evaluación de la precisión intermedia a condición de reproducibilidad se presentan las Tablas 20 y 21. Los datos crudos del análisis y evaluación del límite de cuantificación se muestran en las Tablas 22 y 23. Los datos crudos del análisis y evaluación de la veracidad se muestran en las Tablas 24 y 25.

Tabla 14 Resultados de la validación para la cuantificación de hierro.

Parámetro	Indicador	Criterio de aceptación	Resultado	Evaluación
Linealidad e intervalo de Trabajo	Coefficiente de Correlación	> 0.995	0.9999	Pasa
	% de Error	<10%	3.80%	Pasa
Límite de Cuantificación	Coefficiente de Variación	<15%	13.11%	Pasa
	% de Error	< 10%	3.80%	Pasa
Repetibilidad	CV	<10%	1.03%	Pasa
Reproducibilidad	CV	<10%	2.19%	Pasa
Veracidad	Recobro	80 a 120%	100.04%	Pasa

Tabla 15 Hierro: Datos crudos de la evaluación de la linealidad y del intervalo de trabajo.

Conc. (µg/L)	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3	Absorbancia 4	Absorbancia Promedio
1,000.00	0.021	0.021	0.020	0.020	0.02050
2,000.00	0.043	0.042	0.041	0.043	0.04225
4,000.00	0.085	0.083	0.082	0.082	0.08300
6,000.00	0.124	0.126	0.126	0.122	0.12450
8,000.00	0.166	0.164	0.161	0.165	0.16400

Tabla 16 Hierro: Evaluación de la linealidad (coeficiente de correlación).

Pendiente	0.000020	Criterio de Aceptación	Evaluación Pasa
Ordenada al Origen	0.000782		
Coefficiente de Correlación	0.9999	≥ 0.995	Pasa

Tabla 17 Hierro: Evaluación del intervalo de trabajo(% de error).

Número de Dilución	Media de los Valores de Concentración (a)	Valor Teórico (b)	Sesgo (c)	% Error	Criterio de Aceptación	Evaluación
1	962	1,000.	37.79	3.8	≤ 10%	Pasa
2	2,023	2,000	23.58	1.2	≤ 10%	Pasa
3	4,012	4,000	12.13	0.3	≤ 10%	Pasa
4	6,037	6,000	37.27	0.6	≤ 10%	Pasa
5	7,964	8,000	35.19	0.4	≤ 10%	Pasa

(a) Concentración calculada promedio.

(b) Concentración esperada.

(c) Diferencia entre Concentraciones.

Tabla 18 Hierro: Datos crudos precisión a condición de repetibilidad

Conc. Teórica (µg/L)	Conc. 1	Conc. 2	Conc. 3	Conc. 4	Conc. 5
3,000	3017	3051	3054	3043	3046
5,000.	5049	5019	5026	4985	4917
7,000.	6909	6877	6946	6841	6903

Tabla 19 Hierro: Evaluación de precisión a condición de repetibilidad.

Conc. Obtenida Promedio	Desviación Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
3042	14.721	0.48	≤ 10%	Pasa
4999	51.354	1.03	≤ 10%	Pasa
6895	39.054	0.57	≤ 10%	Pasa

Tabla 20 Hierro: Datos crudos de precisión intermedia.

Primer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
3,043	3,046	3,044
4,985	4,917	4,951
6,841	6,903	6,872

Segundo día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
2,910	2,930	2,920
4,830	4,860	4,845
6,975	6,840	6,907

Tercer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
2,870	3,030	2,950
4,760	5,100	4,930
6,740	6,970	6,855

Tabla 21 Hierro: Evaluación de precisión intermedia.

Conc. teórica (µg/L)	Conc. Obtenida Promedio	Desviación. Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
3,000	2,971	64.97	2.19	≤ 10%	Pasa
5,000	4,909	56.13	1.14	≤ 10%	Pasa
7,000	6,878	26.79	0.39	≤ 10%	Pasa

Tabla 22 Hierro: Datos crudos del límite de cuantificación.

Conc. (µg/L)	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3	Absorbancia 4	Absorbancia Promedio
1,000.00	0.0210	0.0210	0.0200	0.0200	0.02050

Tabla 23 Fierro: Evaluación del límite de cuantificación.

Indicador	Criterio de Aceptación	Resultado	Evaluación
Coeficiente de Variación	< 15%	2.82	Pasa
% de Error (sesgo)	< 10%	3.80%	Pasa

Tabla 24 Fierro: Datos crudos de veracidad.

Concentración 1	Concentración 2	Concentración 3	Concentración 4	Concentración 5
5,049	5,019	5,026	4,985	4,917
Concentración 6	Concentración 7	Concentración 8	Concentración 9	Concentración 10
5,009	5,033	5,010	4,978	4,996

Tabla 25 Fierro: Evaluación de veracidad.

Concentración de Referencia	Concentración Obtenida Promedio	% Recuperación.	Criterio de Aceptación	Evaluación
5,000	5,002.20	100.04	de 80 a 120 %	Pasa

3.4.3.2 Validación del procedimiento para la cuantificación de plomo.

En la Tabla 26 se presentan los resultados de la validación del procedimiento para la cuantificación de plomo. Los datos crudos del análisis y evaluación de la linealidad y el intervalo de trabajo, se muestran en las Tablas 27, 28 y 29. Los datos crudos del análisis y evaluación de precisión a condición de repetibilidad se muestran en las Tabla 30 y 31. Los datos crudos del análisis y evaluación de la precisión intermedia a condición de reproducibilidad se presentan las Tablas 32 y 33. Los datos crudos del análisis y evaluación del límite de cuantificación se muestran en las Tablas 34 y 35. Los datos crudos del análisis y evaluación de la veracidad se muestran en las Tablas 36 y 37.

Tabla 26 Resultados de la validación para la cuantificación de plomo.

Parámetro	Indicador	Criterio de aceptación	Resultado	Evaluación
Linealidad e intervalo de Trabajo	Coefficiente de Correlación	> 0.995	0.9998	Pasa
	% de Error	<10%	6.50%	Pasa
Límite de Cuantificación	Coefficiente de Variación	<15%	9.87%	Pasa
	% de Error	< 10%	6.50%	Pasa
Repetibilidad	CV	<10%	2.20%	Pasa
Reproducibilidad	CV	<10%	2.74%	Pasa
Veracidad	Recobro	80 a 120%	100.10%	Pasa

Tabla 27 Plomo: Datos crudos de la evaluación de la linealidad y del intervalo de trabajo.

Concentración (µg/L)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área Promedio
50	0.0116	0.0137	0.0142	0.0146	0.01353
100	0.0259	0.0273	0.0274	0.0276	0.02705
250	0.0710	0.0709	0.0707	0.0698	0.07060
500	0.1406	0.1394	0.1364	0.1356	0.13800
750	0.2073	0.2048	0.2032	0.1981	0.20335

Tabla28 Plomo: Evaluación de la linealidad (coeficiente de correlación).

Pendiente	0.000272	Criterio de Aceptación	Evaluación
Ordenada al Origen	0.000827		
Coefficiente de Correlación	0.9998	≥ 0.995	Pasa

Tabla 29 Plomo: Evaluación del intervalo de trabajo (% de error).

Número de Dilución	Media de los Valores de Concentración (a)	Valor Teórico (b)	Sesgo (c)	% Error	Criterio de Aceptación	Evaluación
1	46.7	50	3.27	6.5	$\leq 10\%$	Pasa
2	96.5	100	3.50	3.5	$\leq 10\%$	Pasa
3	256.8	250	6.75	2.7	$\leq 10\%$	Pasa
4	504.8	500	4.77	1.0	$\leq 10\%$	Pasa
5	745.3	750	4.75	0.6	$\leq 10\%$	Pasa

(a) Concentración calculada promedio.

(b) Concentración esperada.

(c) Diferencia entre Concentraciones.

Tabla 30 Plomo: Datos crudos precisión a condición de repetibilidad.

Conc Teórica ($\mu\text{g/L}$)	Conc. 1	Conc. 2	Conc. 3	Conc. 4	Conc. 5
150	148	150	148	154	153
300	298	299	310	308	313
600	599	592	597	598	606

Tabla 31 Plomo: Evaluación de precisión a condición de repetibilidad.

Conc. Obtenida Promedio	Desviación Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
150	150.6	1.85	$\leq 10\%$	Pasa
300	305.6	2.20	$\leq 10\%$	Pasa
600	598.4	0.84	$\leq 10\%$	Pasa

Tabla 32 Plomo: Datos crudos de precisión intermedia.

Primer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
154	153	153.5
308	313	310.5
598	606	602.0

Segundo día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
153	151	152.0
318	308	313.0
608	617	612.5

Tercer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
161	159	160.0
316	316	316.0
608	616	612.0

Tabla 33 Plomo: Evaluación de precisión intermedia.

Conc. (µg/L)	Conc. Obtenida Promedio	Desviación Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
150	155.2	4.25	2.74	≤ 10%	Pasa
300	313.2	2.75	0.88	≤ 10%	Pasa
600	608.8	5.92	0.97	≤ 10%	Pasa

Tabla 34 Plomo: Datos crudos del límite de cuantificación.

Concentración (µg/L)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Absorbancia Promedio
50	0.0116	0.0137	0.0142	0.0146	0.01353

Tabla 35 Plomo: Evaluación del límite de cuantificación.

Indicador	Criterio de Aceptación	Resultado	Evaluación
Coeficiente de Variación	< 15%	9.87%	Pasa
% de Error (sesgo)	< 10%	6.5%	Pasa

Tabla 36 Plomo: Datos crudos de veracidad.

Concentración 1	Concentración 2	Concentración 3	Concentración 4	Concentración 5
298.0	299.0	310.0	308.0	313.0
Concentración 6	Concentración 7	Concentración 8	Concentración 9	Concentración 10
288	291.0	296.0	297.0	303.0

Tabla 37 Plomo: Evaluación de veracidad.

Concentración de Referencia	Concentración Obtenida Promedio	% Recuperación.	Criterio de Aceptación	Evaluación
300	300.3	100.10	de 80 a 120 %	Pasa

3.4.3.3 Validación del procedimiento para la cuantificación de manganeso.

En la Tabla 38 se presentan los resultados de la validación del procedimiento para la cuantificación de manganeso. Los datos crudos del análisis y evaluación de la linealidad y el intervalo de trabajo, se muestran en las Tablas 39, 40 y 41. Los datos crudos del análisis y evaluación de precisión a condición de repetibilidad se muestran en las Tabla 42 y 43. Los datos crudos del análisis y evaluación de la precisión intermedia a condición de reproducibilidad se presentan las Tablas 44 y 45. Los datos crudos del análisis y evaluación del límite de cuantificación se muestran en las Tablas 46 y 47. Los datos crudos del análisis y evaluación de la veracidad se muestran en las Tablas 48 y 49.

Tabla 38 Resultados de la validación para la cuantificación de manganeso.

Parámetro	Indicador	Criterio de aceptación	Resultado	Evaluación
Linealidad e intervalo de Trabajo	Coefficiente de Correlación	> 0.995	0.9999	Pasa
	% de Error	<10%	5.90%	Pasa
Límite de Cuantificación	Coefficiente de Variación	<15%	10.46%	Pasa
	% de Error	< 10%	5.90%	Pasa
Repetibilidad	CV	<10%	3.68%	Pasa
Reproducibilidad	CV	<10%	4.53%	Pasa
Veracidad	Recobro	80 a 120%	100.10%	Pasa

Tabla 39 Manganeso: Datos crudos de la evaluación de la linealidad y del intervalo de trabajo.

Concentración (µg/L)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área Promedio
20	0.0464	0.0381	0.0472	0.0485	0.04505
40	0.0871	0.0653	0.0813	0.0901	0.08095
80	0.1626	0.1467	0.1587	0.1633	0.15783
160	0.3136	0.2894	0.3118	0.3126	0.30685
320	0.5824	0.5860	0.5900	0.5959	0.58858

Tabla 40 Manganeso: Evaluación de la linealidad (coeficiente de correlación).

Pendiente	0.001814	Criterio de Aceptación	Evaluación
Ordenada al Origen	0.010896		
Coefficiente de Correlación	0.9999	≥ 0.995	Pasa

Tabla 41 Manganeso: Evaluación del intervalo de trabajo (% de error).

Número de Dilución	Media de los Valores de Concentración (a)	Valor Teórico (b)	Sesgo (c)	% Error	Criterio de Aceptación	Evaluación
1	18.8	20	1.17	5.9	≤ 10%	Pasa
2	38.6	40	1.38	3.5	≤ 10%	Pasa
3	81.0	80	0.99	1.2	≤ 10%	Pasa
4	163.1	160	3.14	2.0	≤ 10%	Pasa
5	318.4	320	1.57	0.5	≤ 10%	Pasa

(a) Concentración calculada promedio.

(b) Concentración esperada.

(c) Diferencia entre Concentraciones.

Tabla 42 Manganeso: Datos crudos de repetibilidad.

Conc Teórica (µg/L)	Conc. 1	Conc. 2	Conc. 3	Conc. 4	Conc. 5
50	52.60	56.50	55.00	56.80	57.90
150	164.60	168.20	161.30	175.20	168.20
250	256.80	265.10	264.80	257.90	267.10

Tabla 43 Manganeso: Evaluación de precisión a condición de repetibilidad.

Conc. Obtenida Promedio	Desviación. Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
55.8	2.05	3.67	≤ 10%	Pasa
167.5	5.17	3.09	≤ 10%	Pasa
262.3	4.66	1.77	≤ 10%	Pasa

Tabla 44 Manganeso: Datos crudos de precisión intermedia.

Primer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
56.8	57.9	57.4
175.2	168.2	171.7
257.9	267.1	262.5

Segundo día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
56.4	53.6	55.0
164.4	162.6	163.5
262.0	259.0	260.5

Tercer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
54.9	52.3	53.6
155.4	158.3	156.9
248.5	244.1	246.3

Tabla 45 Manganeso: Evaluación de precisión intermedia.

Conc teórica (µg/L)	Conc. Obtenida Promedio	Desv. Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
50	55.3	1.89	3.43	≤ 10%	Pasa
150	164.0	7.44	4.54	≤ 10%	Pasa
250	256.4	8.83	3.44	≤ 10%	Pasa

Tabla 46 Manganeso: Datos crudos del límite de cuantificación.

Concentración (µg/L)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Absorbancia Promedio
20	0.0464	0.0381	0.0472	0.0485	0.04505

Tabla 47 Manganeso: Evaluación del límite de cuantificación.

Indicador	Criterio de Aceptación	Resultado	Evaluación
Coeficiente de Variación	< 15%	10.4%	Pasa
% de Error (sesgo)	< 10%	5.9%	Pasa

Tabla 48 Manganeso: Datos crudos de veracidad.

Concentración 1	Concentración 2	Concentración 3	Concentración 4	Concentración 5
164.60	168.20	161.30	175.20	168.20
Concentración 6	Concentración 7	Concentración 8	Concentración 9	Concentración 10
168.50	163.60	166.20	166.60	164.40

Tabla 49 Manganeso: Evaluación de veracidad.

Concentración de Referencia	Concentración Obtenida Promedio	% Recuperación.	Criterio de Aceptación	Evaluación
150	166.7	111.12	de 80 a 120 %	Pasa

3.4.3.4 Validación del procedimiento analítico para la cuantificación de arsénico

En la Tabla 50 se presentan los resultados de la validación del procedimiento para la cuantificación de arsénico. Los datos crudos del análisis y evaluación de la linealidad y el intervalo de trabajo, se muestran en las Tablas 51, 52 y 53. Los datos crudos del análisis y evaluación de precisión a condición de repetibilidad se muestran en las Tabla 54 y 55. Los datos crudos del análisis y evaluación de la precisión intermedia a condición de reproducibilidad se presentan las Tablas 56 y 57. Los datos crudos del análisis y evaluación del límite de cuantificación se muestran en las Tablas 58 y 59. Los datos crudos del análisis y evaluación de la veracidad se muestran en las Tablas 60 y 61.

Tabla 50 Resultados de la validación para la cuantificación de arsénico.

Parámetro	Indicador	Criterio de aceptación	Resultado	Evaluación
Linealidad e intervalo de Trabajo	Coefficiente de Correlación	> 0.995	0.9999	Pasa
	% de Error	<10%	5.00%	Pasa
Límite de Cuantificación	Coefficiente de Variación	<15%	5.00%	Pasa
	% de Error	< 10%	3.80%	Pasa
Repetibilidad	CV	<10%	8.53%	Pasa
Reproducibilidad	CV	<10%	4.37%	Pasa
Veracidad	Recobro	80 a 120%	103.49%	Pasa

Tabla 51 Arsénico: Datos crudos de la evaluación de la linealidad y del intervalo de trabajo.

Conc. (µg/L)	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3	Absorbancia 4	Absorbancia Promedio
20	0.1090	0.0830	0.0840	0.0960	0.09300
40	0.2120	0.1830	0.1440	0.1780	0.17925
80	0.3550	0.3250	0.3060	0.3320	0.32950
160	0.6940	0.6500	0.6320	0.6540	0.65750
320	1.3450	1.2700	1.2360	1.2620	1.27825

Tabla 52 Arsénico: Evaluación de la linealidad (coeficiente de correlación).

Pendiente	0.003948	Criterio de Aceptación	Evaluación
Ordenada al Origen	0.017958		
Coefficiente de Correlación	0.9999	≥ 0.995	Pasa

Tabla 53 Arsénico: Evaluación del Intervalo de trabajo (% de error)

Número de Dilución	Media de los Valores de Concentración (a)	Valor Teórico (b)	Sesgo (c)	% Error	Criterio de Aceptación	Evaluación
1	19.0	20	0.99	5.0	≤ 10%	Pasa
2	40.9	40	0.85	2.1	≤ 10%	Pasa
3	78.9	80	1.09	1.4	≤ 10%	Pasa
4	162.0	160	1.99	1.2	≤ 10%	Pasa
5	319.2	320	0.77	0.2	≤ 10%	Pasa

(a) Concentración calculada promedio.

(b) Concentración esperada.

(c) Diferencia entre Concentraciones.

Tabla 54 Arsénico: Datos crudos de precisión a condición de repetibilidad.

Conc Teórica (µg/L)	Conc. 1	Conc. 2	Conc. 3	Conc. 4	Conc. 5
60	68.0	62.4	65.0	54.0	65.0
120	120.7	121.1	128.8	123.4	130.6
240	237.8	232.2	243.1	244.1	241.4

Tabla 55 Arsénico: Evaluación de Precisión a condición de repetibilidad.

Conc. Obtenida Promedio	Desviación. Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
62.9	5.36	8.53	≤ 10%	Pasa
124.9	4.53	3.63	≤ 10%	Pasa
239.7	4.84	2.02	≤ 10%	Pasa

Tabla 56 Arsénico: Datos crudos de precisión intermedia.

Primer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
54.0	65.0	59
123.4	130.6	127
244.1	241.4	243

Segundo día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
62.7	65.0	64
135.8	120.1	128
243.9	239.2	242

Tercer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
58.9	59.3	59
121.0	123.8	122
243.7	243.0	243

Tabla 57 Arsénico: Evaluación de precisión intermedia.

Con. (µg/L)	Conc. Obtenida Promedio	Desv. Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
60	61	2.65	4.37	≤ 10%	Pasa
120	126	2.97	2.36	≤ 10%	Pasa
240	243	0.92	0.38	≤ 10%	Pasa

Tabla 58 Arsénico: Datos crudos del límite de cuantificación.

Concentración (µg/L)	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3	Absorbancia 4	Absorbancia Promedio
20	0.1090	0.0830	0.0840	0.0960	0.09300

Tabla 59 Arsénico: Evaluación del límite de cuantificación.

Indicador	Criterio de Aceptación	Resultado	Evaluación
Coeficiente de Variación	< 15%	5.89%	Pasa
% de Error (sesgo)	< 10%	2.8%	Pasa

Tabla 60 Arsénico: Datos crudos de veracidad.

Concentración 1	Concentración 2	Concentración 3	Concentración 4	Concentración 5
120.7	121.1	128.8	123.4	130.6
Concentración 6	Concentración 7	Concentración 8	Concentración 9	Concentración 10
122.9	129.1	118.4	124.2	122.7

Tabla 61 Arsénico: Evaluación de veracidad.

Concentración de Referencia	Concentración Obtenida Promedio	% Recuperación.	Criterio de Aceptación	Evaluación
120	124	103.49	de 80 a 120 %	Pasa

3.4.3.5 Validación del procedimiento para la cuantificación de níquel.

En la Tabla 62 se presentan los resultados de la validación del procedimiento para la cuantificación de níquel. Los datos crudos del análisis y evaluación de la linealidad y el intervalo de trabajo, se muestran en las Tablas 63, 64 y 65. Los datos crudos del análisis y evaluación de precisión a condición de repetibilidad se muestran en las Tabla 66 y 67. Los datos crudos del análisis y evaluación de la precisión intermedia a condición de reproducibilidad se presentan las Tablas 68 y 69. Los datos crudos del análisis y evaluación del límite de cuantificación se muestran en las Tablas 70 y 71. Los datos crudos del análisis y evaluación de la veracidad se muestran en las Tablas 72 y 73.

Tabla 62 Resultados de la validación para la cuantificación de níquel.

Parámetro	Indicador	Criterio de aceptación	Resultado	Evaluación
Linealidad e intervalo de Trabajo	Coefficiente de Correlación	> 0.995	0.9999	Pasa
	% de Error	<10%	2.80%	Pasa
Límite de Cuantificación	Coefficiente de Variación	<15%	5.89%	Pasa
	% de Error	< 10%	0.03%	Pasa
Repetibilidad	CV	<10%	4.88%	Pasa
Reproducibilidad	CV	<10%	7.89%	Pasa
Veracidad	Recobro	80 a 120%	105.68%	Pasa

Tabla 63 Níquel: Datos crudos de la evaluación de la linealidad y del intervalo de trabajo.

Concentración (µg/L)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área Promedio
20	0.0354	0.0380	0.0349	0.0395	0.03695
40	0.0718	0.0705	0.0660	0.0760	0.07108
60	0.1011	0.1014	0.0983	0.1049	0.10143
80	0.1294	0.1348	0.1278	0.1418	0.13345
100	0.1643	0.1666	0.1582	0.1718	0.16523

Tabla 64 Níquel: Evaluación de la linealidad (coeficiente de correlación).

Pendiente	0.001595	Criterio de Aceptación	Evaluación
Ordenada al Origen	0.005947		
Coefficiente de Correlación	0.9999	≥ 0.995	Pasa

Tabla 65 Níquel: Evaluación del intervalo de trabajo (% de error).

Número de Dilución	Media de los Valores de Concentración (a)	Valor Teórico (b)	Sesgo (c)	% Error	Criterio de Aceptación	Evaluación
1	19.4	20	0.56	2.8	≤ 10%	Pasa
2	40.8	40	0.84	2.1	≤ 10%	Pasa
3	59.9	60	0.13	0.2	≤ 10%	Pasa
4	80.0	80	0.04	0.1	≤ 10%	Pasa
5	99.9	100	0.12	0.1	≤ 10%	Pasa

(a) Concentración calculada promedio.

(b) Concentración esperada.

(c) Diferencia entre Concentraciones.

Tabla 66 Níquel: Datos crudos de precisión a condición de repetibilidad.

Conc Teórica (µg/L)	Conc. 1	Conc. 2	Conc. 3	Conc. 4	Conc. 5
30	33.75	32.11	31.33	30.38	31.52
50	51.00	52.45	53.36	54.07	53.22
90	96.82	97.22	98.69	99.89	88.03

Tabla 67 Níquel: Evaluación de precisión a condición de repetibilidad.

Conc. Obtenida Promedio	Desv. Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
31.8	1.25	3.92	≤ 10%	Pasa
52.8	1.17	2.21	≤ 10%	Pasa
96.1	4.69	4.88	≤ 10%	Pasa

Tabla 68 Níquel: Datos crudos de precisión intermedia

Primer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
30.4	31.5	31.0
54.1	53.2	53.6
99.9	88.0	94.0

Segundo día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
34.9	34.7	34.8
8i54.5	54.5	54.5
92.8	91.4	92.1

Tercer día		
Conc. 1	Conc. 2	Promedio
29.4	30.6	30.0
52.5	51.1	51.8
87.8	91.1	89.5

Tabla 69 Níquel: Evaluación de precisión intermedia.

Conc teórica (µg/L)	Conc. Obtenida Promedio	Desviación Estándar	% CV	Criterio de Aceptación	Evaluación
30	31.9	2.52	7.89	$\leq 10\%$	Pasa
50	53.3	1.38	2.59	$\leq 10\%$	Pasa
90	91.8	2.27	2.47	$\leq 10\%$	Pasa

Tabla 70 Níquel: Datos crudos del límite de cuantificación.

Conc. (µg/L)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Absorbancia Promedio
20	0.0354	0.0380	0.0349	0.0395	0.03695

Tabla 71 Níquel: Evaluación del límite de cuantificación.

Indicador	Criterio de Aceptación	Resultado	Evaluación
Coeficiente de Variación	< 15%	5.89%	Pasa
% de Error (sesgo)	< 10%	2.8%	Pasa

Tabla 72 Níquel: Datos crudos de veracidad.

Concentración 1	Concentración 2	Concentración 3	Concentración 4	Concentración 5
51.0	52.5	53.4	54.1	53.2
Concentración 6	Concentración 7	Concentración 8	Concentración 9	Concentración 10
53.97	53.2	51.4	52.5	53.3

Tabla 73 Níquel: Evaluación de veracidad.

Concentración de Referencia	Concentración Obtenida Promedio	% Recuperación.	Criterio de Aceptación	Evaluación
50	52.8	105.68	de 80 a 120 %	Pasa

3.5 Cuantificación de los metales en las partículas ambientales PM_{2.5}.

En las Tablas 74 a 78 se presentan los resultados del control de calidad aplicado durante el análisis de las muestras. Los resultados obtenidos demuestran que se cumplió con los criterios establecidos en el documento “Determinación de metales en material particulado ambiental usando Espectroscopia de Absorción Atómica”⁽⁴⁶⁾ Para los resultados de verificación continua de calibración, muestra duplicada y muestra fortificada se reportan los promedios obtenidos. Durante el análisis de las muestras de níquel, las concentraciones obtenidas se encontraron por debajo del límite de cuantificación, por lo que se procedió a concentrar la muestra (tres veces) e inyectar, se analizaron a la par soluciones de control de calidad con el mismo

incremento de concentración El incremento en concentración de las soluciones de control estuvo dentro de lo esperado con un recobro del 90 al 110%.

Tabla 74 Resultados de control de calidad aplicado durante el análisis de las muestras de hierro.

Procedimiento de Calidad	Indicador	Resultado	Criterio de Aceptación.	Evaluación
Calibración inicial	Coeficiente de Correlación	0.9994	> 0.995	Pasa
Verificación inicial de la calibración	Concentración	101.07	90 a 110%	Pasa
Blanco de Calibración	Concentración	< Límite de Cuantificación	< Límite de Cuantificación	Pasa
Verificación continua de la calibración	Concentración	98.16	80 a 120%	Pasa
Muestra duplicada	Diferencia porcentual relativa	2.38%	< 20%	Pasa
Muestra Fortificada.	Recobro	2.48%	85 a 115%	Pasa

Tabla 75 Resultados de control de calidad aplicado durante el análisis de las muestras de plomo.

Procedimiento de Calidad	Indicador	Resultado	Criterio de Aceptación.	Evaluación
Calibración inicial	Coeficiente de Correlación	0.9996	> 0.995	Pasa
Verificación inicial de la calibración	Concentración	104%	90 a 110%	Pasa
Blanco de Calibración	Concentración	< Límite de Cuantificación.	< Límite de Cuantificación	Pasa
Verificación continua de la calibración	Concentración	98.98%	80 a 120%	Pasa
Muestra duplicada	Diferencia porcentual relativa	5.36%	< 20%	Pasa
Muestra Fortificada.	Recobro	93.14%	85 a 115%	Pasa

Tabla 76 Resultados de control de calidad aplicado durante el análisis de las muestras de manganeso.

Procedimiento de Calidad	Indicador	Resultado	Criterio de Aceptación.	Evaluación
Calibración inicial	Coeficiente de Correlación	0,9995	> 0.995	Pasa
Verificación inicial de la calibración	Concentración	107.46	90 a 110%	Pasa
Blanco de Calibración	Concentración	< Límite de Cuantificación.	< Límite de Cuantificación	Pasa
Verificación continua de la calibración	Concentración	103.47	80 a 120%	Pasa
Muestra duplicada	Diferencia porcentual relativa	4.71%	< 20%	Pasa
Muestra Fortificada.	Recobro	98.50	85 a 115%	Pasa

Tabla 77 Resultados de control de calidad aplicado durante el análisis de las muestras de arsénico.

Procedimiento de Calidad	Indicador	Resultado	Criterio de Aceptación.	Evaluación
Calibración inicial	Coeficiente de Correlación	0.9992	> 0.995	Pasa
Verificación inicial de la calibración	Concentración	101.91	90 a 110%	Pasa
Blanco de Calibración	Concentración	< Límite de Cuantificación	< Límite de Cuantificación	Pasa
Verificación continua de la calibración	Concentración	94.77	80 a 120%	Pasa
Muestra duplicada	Diferencia porcentual relativa	9.76%	< 20%	Pasa
Muestra Fortificada.	Recobro	91.19%	85 a 115%	Pasa

Tabla 78 Resultados de control de calidad aplicado durante el análisis de las muestras de níquel.

Procedimiento de Calidad	Indicador	Resultado	Criterio de Aceptación.	Evaluación
Calibración inicial	Coeficiente de Correlación	0.9995	> 0.995	Pasa
Verificación inicial de la calibración	Concentración	101.62%	90 a 110%	Pasa
Blanco de Calibración	Concentración	<Límite de Cuantificación.	< Límite de Cuantificación	Pasa
Verificación continua de la calibración	Concentración	103.60%	80 a 120%	Pasa
Muestra duplicada	Diferencia porcentual relativa	7.87%	< 20%	Pasa
Muestra Fortificada.	Recobro	98.68	85 a 115%	Pasa

En las Tablas 79 y 80 se presentan los resultados del análisis de metales en cada una de las muestras de PM_{2.5} de las zonas 1 y 2, respectivamente. Los promedios mensuales de la concentración de cada metal por zona se muestran en las Tablas 81 y 82. El metal cuantificado en mayor concentración en las PM_{2.5} fue el fierro seguido del plomo, manganeso, arsénico y níquel.

Tabla 79 Concentración de metales en cada una las muestras de PM_{2.5} de la Zona 1.

Fecha	Fe	Pb	Mn	As	Ni
28/02/08	341.4	25.3	20	10.5	1.6
05/03/08	437.4	73.5	28	8.6	1.4
12/03/08	227.5	12.3	10.1	7.0	0.5
17/03/08	268.1	34.6	14.1	9.8	1.7
24/03/08	141.5	7.8	7.2	1.7	0.5
04/04/08	388.3	16.9	15.2	0.7	0.5
10/04/08	320.5	22.4	17	2.5	0.6
16/04/08	440.2	17.1	18.5	7.4	0.4
22/04/08	267.4	27.1	12	10.2	1.0
29/04/08	349.3	36.9	13.8	5.9	0.4
04/05/08	31.7	2.4	5.1	5.9	0.7
10/05/08	181.1	91.5	11.4	8.8	0.7
22/05/08	354.9	26.7	19.2	4.4	0.6
03/06/08	160.7	3.1	6.0	2.7	0.3
09/06/08	44.8	N.D.	1.0	1.7	0.2
15/06/08	206.4	15.1	6.9	4.4	0.3
21/06/08	410.2	33.9	13.3	2.5	0.7
27/06/08	241	6.8	11.3	4.2	0.5
03/07/08	211.2	4.1	9.5	4.2	0.4
11/07/08	193.5	3.4	7.9	4.2	0.4
15/07/08	325.4	6.5	14.6	5.3	1.0
21/07/08	416.7	14.6	17.8	3.3	1.1
27/07/08	294.4	13.4	15.4	3.7	0.9
02/08/08	211.4	2.5	10.2	4.7	0.6
08/08/08	276	13.2	13.1	2.7	0.3
15/08/08	203.9	38	11	5.3	0.8
02/09/08	346.1	35.4	14.5	4.2	0.8
07/09/08	73.7	N.D.	1.5	3.4	0.7
19/09/08	97.2	18.9	7.4	2.4	0.8
27/09/08	106.1	18.9	8.5	3.7	0.4
01/10/08	174.1	15.5	10.1	2.8	0.5
07/10/08	101.3	32.3	9.9	1.4	0.4
19/10/08	116.2	67.3	6	2.1	0.3
25/10/08	165.9	88.8	13.6	2.8	0.6
31/10/08	81.4	50.4	5.4	1.7	0.5
06/11/08	190.7	31.9	14.7	1.5	0.2
12/11/08	257.8	47.3	20.8	4	0.7
18/11/08	231.8	26.4	12.9	0.1	1.2
06/12/08	205.5	41.0	14.5	6.0	1.0
12/12/08	181	8.6	6.7	1.0	0.7
18/12/08	327.6	37.7	28	8.5	1.6
30/12/08	280.2	28.2	24.7	6.4	0.7
05/01/09	123.1	22.1	6	4.2	0.7
11/01/09	45.5	5.9	7.7	N.D.	0.2
19/01/09	164.5	14.1	11	1.8	0.2
23/01/09	260.7	16.4	15.8	5.0	0.9
29/01/09	159.2	13.5	10.2	4.7	1.3
10/02/09	N.D.	38.6	15.3	5	1.0
23/02/09	257.9	42.3	15.9	3.9	0.5
06/03/09	78.9	8.9	4.2	4.9	0.7

N.D = No detectado

Tabla 80 Concentración de metales en cada una las muestras de PM_{2.5} de la Zona 2.

Fecha	Fe	Pb	Mn	As	Ni
28/02/08	140.1	30.7	18	3.9	0.7
05/03/08	139.9	5.8	10.5	0.6	0.2
12/03/08	154.2	26.7	18.6	4.7	1.1
17/03/08	276.5	72.8	27.3	3.1	0.9
24/03/08	122.3	10.5	11.7	1.6	0.3
04/04/08	240.3	71.3	24.7	1.2	1.0
10/04/08	315.7	61.7	27.3	4.2	0.7
16/04/08	470.9	196.9	39	5.3	1.3
22/04/08	274.7	41.2	25.1	8.2	1.6
29/04/08	135.8	40.7	18.5	1.1	0.2
04/05/08	529.8	76	39.3	3.6	1.0
10/05/08	304.5	28	25.2	4	0.6
22/05/08	177.9	19.8	13.2	2.4	0.5
03/06/08	142.5	32.1	14.3	6.4	1.1
09/06/08	363.1	131	96.7	3.5	0.3
15/06/08	358.4	42.2	23.3	7.7	0.5
21/06/08	341.5	63	27.1	N.D.	0.6
27/06/08	257.1	6.5	13.3	0.6	0.3
03/07/08	308.2	67.6	24.8	2.0	0.6
11/07/08	190.6	287	22.1	1.8	0.6
15/07/08	32.6	4.2	9.8	2.4	0.7
21/07/08	75.3	7.3	11.2	1.5	N.D.
27/07/08	145.5	14.6	12.8	4.3	0.2
02/08/08	259.7	19.1	16.9	2.9	0.4
08/08/08	157.7	13.1	6.2	1.8	0.4
15/08/08	186.5	10	12.7	3.4	0.5
02/09/08	369.3	20.2	17.1	3.2	0.4
07/09/08	359.6	14.9	19.7	3.9	0.5
19/09/08	253.9	16.2	19.8	6.3	0.5
27/09/08	182.3	22.6	21	3.5	0.3
01/10/08	335.4	29	18.6	1.7	0.7
07/10/08	298.8	51.2	20.8	3.7	0.6
19/10/08	179.8	37.8	13.7	3.2	1.3
25/10/08	116.5	16.9	10.3	2.7	0.9
31/10/08	248	41.6	15.3	1.7	0.8
06/11/08	315.3	48.2	33.7	3.2	0.8
12/11/08	192.1	88.6	20.9	2.9	0.5
18/11/08	32.8	N.D.	0.6	3.8	0.2
06/12/08	287.5	25.1	18	2.4	0.3
12/12/08	1053.4	22.4	63	1.6	0.4
18/12/08	194	80.8	28.1	1.9	0.5
30/12/08	299	129.1	26.3	4.0	1.0
05/01/09	54.2	155.1	6.1	0.4	0.4
11/01/09	231.7	103.9	46.7	0.8	1.4
19/01/09	278.6	58.8	27.9	4.6	0.5
23/01/09	798.5	95.1	58.7	2.0	0.9
29/01/09	197.0	33.6	14.5	1.7	0.7
10/02/09	366.6	84ñ0	46.8	5.8	1.3
23/02/09	549.6	143.1	46.5	1.5	N.D.
06/03/09	202.3	78.2	22.9	4.6	0.8

N.D = No detectado

Tabla 81 Concentración mensual cada metal en las PM_{2.5} de la Zona 1.

Mes	Fierro	Plomo	Manganeso	Arsénico	Níquel
Marzo-08	230.68	27.42	12.71	6.39	0.94
Abril-08	353.14	24.08	15.28	5.35	0.61
Mayo-08	189.21	40.18	11.87	6.37	0.69
Junio-08	212.63	12.28	7.70	3.12	0.40
Julio-08	288.22	8.37	13.04	4.11	0.74
Agosto-08	230.42	17.91	11.42	4.24	0.60
Septiembre-08	155.80	23.00	8.00	3.40	0.66
Octubre-08	127.79	50.85	9.02	2.18	0.43
Noviembre-08	226.78	35.18	16.14	1.87	0.69
Diciembre-08	248.57	28.87	18.48	5.46	1.00
Enero-09	150.62	14.40	10.14	3.94	0.64
Feb-09	289.13	35.39	17.10	6.45	1.04
Media Anual	224.79	25.61	12.30	4.35	0.70

Tabla 82 Concentración mensual cada metal en las PM_{2.5} de la Zona 2.

Mes	Fierro	Plomo	Manganeso	Arsénico	Níquel
Marzo-08	166.61	29.29	17.2	2.77	0.65
Abril-08	342.26	109.95	30.35	3.56	0.99
Mayo-08	284.54	41.15	24.27	3.87	0.77
Junio-08	292.53	54.96	34.96	4.36	0.55
Julio-08	177.12	119.61	18.92	2.07	0.63
Agosto-08	164.93	12.83	11.94	2.78	0.31
Septiembre-08	300.1	20.58	19.24	3.75	0.48
Octubre-08	198.33	35.32	14.92	3.2	0.95
Noviembre-08	197.06	56.63	17.63	2.88	0.58
Diciembre-08	377.62	82.53	28.3	2.06	0.51
Enero-09	436.25	85.94	44.46	2.48	0.93
Feb-09	328.87	84.7	32.7	3.42	0.86
Media Anual	269.94	56.49	24.14	3.14	0.65

El comportamiento espacial y temporal simultáneo de cada metal cuantificado se muestra en las Figuras 21 a 25.

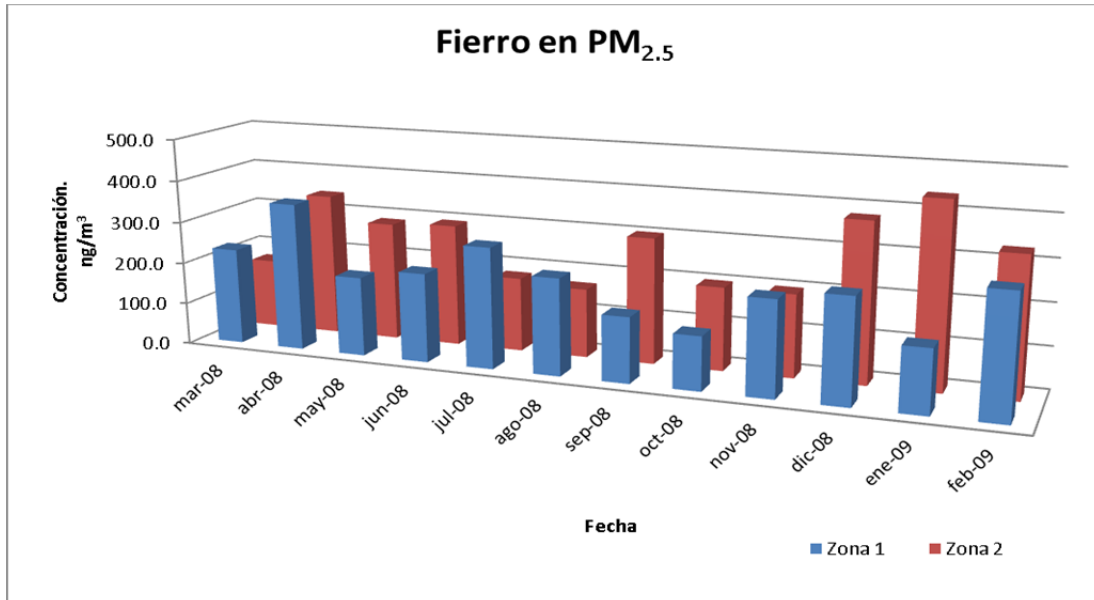


Figura 21 Concentración de fierro en PM_{2.5} en dos zonas del AMM período marzo 2008 – febrero 2009

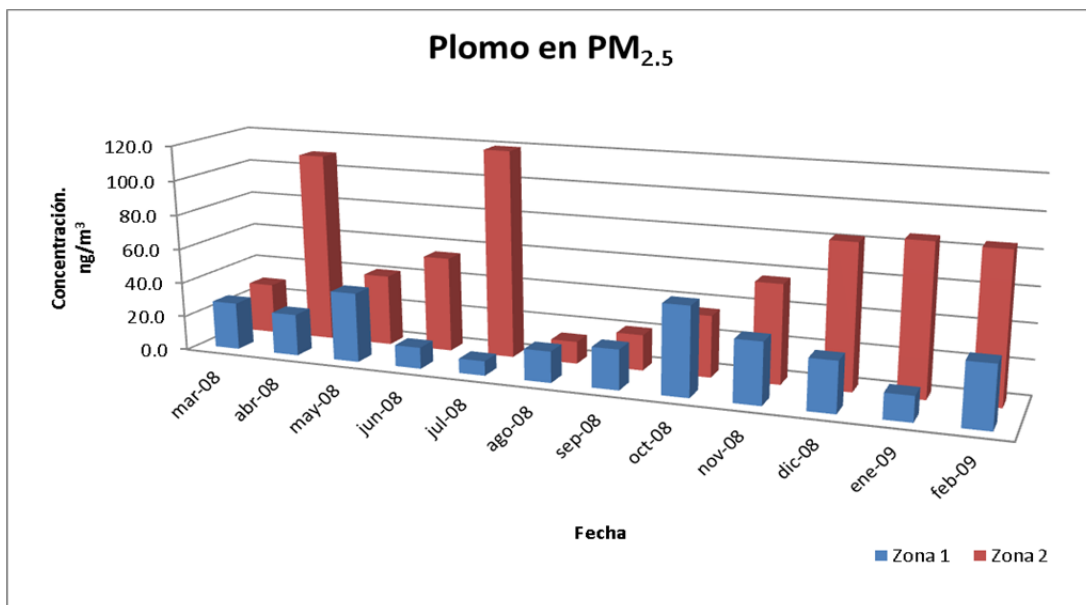


Figura 22 Concentración de plomo en PM_{2.5} en dos zonas del AMM período marzo 2008 – febrero 2009.

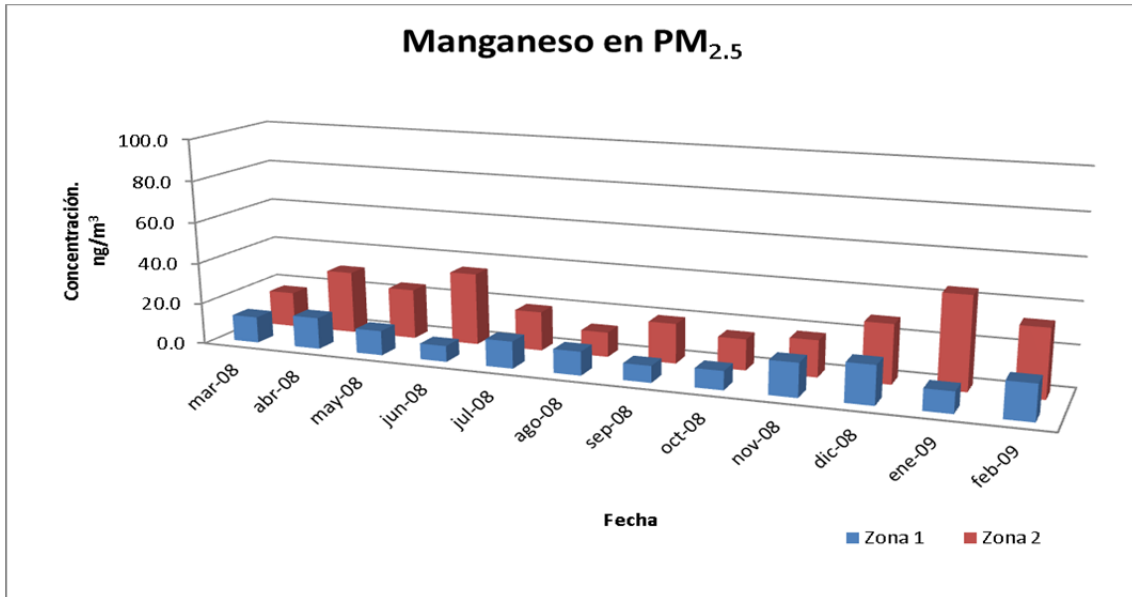


Figura 23 Concentración de manganeso en PM_{2.5} en dos zonas del AMM período marzo 2008 – febrero 2009.

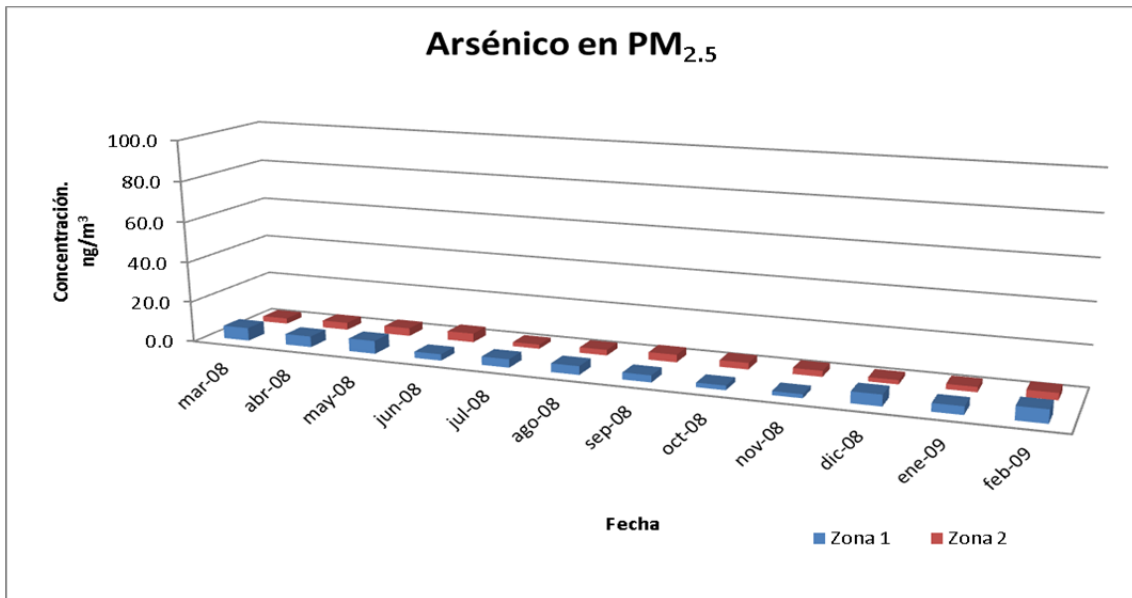


Figura 24 Concentración de arsénico en PM_{2.5} en dos zonas del AMM período marzo 2008 – febrero 2009.

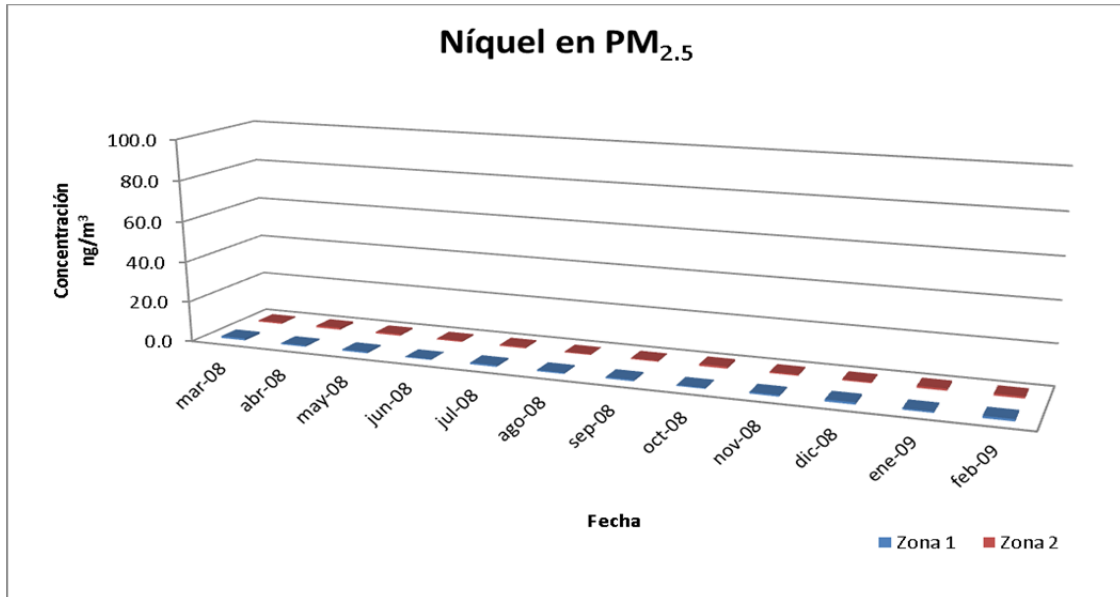


Figura 25 Concentración de níquel en PM_{2.5} en dos zonas del AMM período marzo 2008 – febrero 2009.

Para estudiar las relaciones entre variables, se hizo un análisis de correlación de Pearson que incluyó los datos de ambas zonas bajo estudio, con un tamaño de muestra de 100 observaciones (Tabla 83).

Se observó una correlación positiva entre la concentración de partículas menores a 2.5 micras (PM_{2.5}) y todos los metales estudiados, es decir, a mayor concentración de PM_{2.5}, mayor concentración de fierro, plomo, manganeso, arsénico, y níquel.

En relación a las variables climatológicas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) se observó una correlación negativa entre PM_{2.5} y velocidad del viento y no hubo correlación entre las PM_{2.5} y la humedad relativa y temperatura. (Tabla 83)

Tabla 83 Correlación de Pearson. ZONAS 1 Y 2, n=100

	PM _{2.5} (µg/m ³)	Arsénico (ng/m ³)	Fierro (ng/m ³)	Plomo (ng/m ³)	Manganeso (ng/m ³)	Níquel (ng/m ³)
PM _{2.5} (µg/m ³)	1					
Arsénico (ng/m ³)	.425**	1				
Fierro (ng/m ³)	.261**	.110	1			
Plomo (ng/m ³)	.331**	-.063	.213*	1		
Manganeso (ng/m ³)	.329**	.018	.695**	.492**	1	
Níquel (ng/m ³)	.552**	.497**	.233*	.192	.214*	1
Temperatura °C	.014	.016	.085	-.112	-.150	-.105
Humedad relativa (%)	.059	.146	-.288**	-.021	-.106	.052
Velocidad del viento (km/h)	-.208*	-.196	.004	-.169	-.040	-.264**

3.6 Comparación del contenido de los metales en las dos zonas de estudio.

El análisis de varianza se llevó a cabo bajo un diseño de bloques al azar y la comparación de medias se hizo por el método de diferencia mínima significativa. Las variables a evaluar fueron el contenido de fierro, plomo, manganeso, arsénico y níquel en las PM_{2.5} (Tablas 84). Se observó diferencia significativa en el contenido de arsénico, plomo y manganeso en ambas zonas. El contenido de arsénico fue mayor en la Zona 1, mientras que el contenido de plomo y manganeso fue mayor en la Zona 2

Tabla 84 Comparación de medias por diferencia mínima significativa.

Variable dependiente	Zona (1)	Zona (2)	Diferencia de media (1-2)	Error estándar	Significancia	Intervalo de confianza del 95%	
						Límite inferior	Límite superior
PM <2.5 micrómetros)	1	2	-3.916	2.430	0.111 n. s.	-8.747	.915
Fierro (ng/m ³)	1	2	-45.156	28.555	0.117 n. s.	-101.911	11.600
Plomo (ng/m ³)	1	2	-30.880*	7.414	< 0.001 **	-45.615	-16.145
Manganeso (ng/m ³)	1	2	-11.838*	2.330	< 0.001 **	-16.468	-7.207
Arsénico (ng/m ³)	1	2	1.214*	.406	0.004 **	.407	2.021
Níquel (ng/m ³)	1	2	.039	.068	0.567 n. s.	-.096	.174

CAPÍTULO IV

Discusión

En este trabajo se monitorearon los niveles de partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) en dos zonas del Área Metropolitana de Monterrey. La primera, la Zona 1, ubicada cercana al cruce de las Avenidas Francisco I. Madero y José Eleuterio González, representa una zona de alto tráfico vehicular. La segunda, la Zona 2, ubicada en el municipio de Santa Catarina, además de representar una zona de alto tráfico vehicular, tiene una alta exposición industrial. El tipo de tráfico difiere en ambas zonas, en la Zona 1, predomina el tráfico ligero con motor a gasolina, y en la Zona 2, predomina el transporte de carga con motor diesel. En este estudio además, se cuantificó la concentración de fierro, plomo, manganeso, arsénico y níquel contenido en las $PM_{2.5}$ utilizando un método validado en nuestro departamento.

Los resultados permiten observar que la concentración de partículas menores a 2.5 micras es elevada. En ambas zonas se observa que diciembre fue el mes que presentó los niveles más altos de partículas $PM_{2.5}$. En este mes se rebasó en ambas zonas el límite máximo diario permitido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-1993 de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La Zona 2 rebasó en dos ocasiones la especificación permitida mientras que la Zona 1 lo hizo en una ocasión. Los meses de julio, agosto y septiembre fueron los que presentaron niveles más bajos de $PM_{2.5}$. Casi la mitad de los

días considerados en este trabajo, contienen concentraciones de $PM_{2.5}$ superiores a $25 \mu g/m^3$. La Organización Mundial de la Salud ha propuesto que los valores diarios sean inferiores a $25 \mu g/m^3$, esto como medida de protección a la población.

Con respecto a la concentración de $PM_{2.5}$ la normatividad mexicana establece para efectos de protección a la salud de la población más susceptible una concentración de $65 \mu g/m^3$ como promedio de 24 horas y un promedio anual diario de $15 \mu g/m^3$.

Así mismo, considera dos criterios para el cumplimiento de la norma. El primero impone que el percentil 98 del promedio de 24 horas sea menor o igual a $65 \mu g/m^3$. El segundo criterio establece que el promedio anual de los valores diarios sea menor o igual a $15 \mu g/m^3$ ⁽⁵⁵⁾. Los resultados de este estudio muestran que en ambas zonas no se cumplen los criterios establecidos por norma.

El promedio de $PM_{2.5}$ obtenido en este estudio concuerda con lo reportado por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental de Nuevo León para el periodo de estudio y coincide también en que diciembre fue el mes en que se presentaron las concentraciones más elevadas de $PM_{2.5}$. También es en este mes en el que ambas zonas superaron el límite de promedio diario de 24 horas presentando una concentración superior a $65 \mu g/m^3$. Estos niveles elevados pudieron deberse al alto tráfico vehicular causado por la temporada navideña y la movilización de viajeros a través del Área Metropolitana de Monterrey, además de la pirotecnia utilizada en las festividades propias del mes y cambios en las condiciones climatológicas como menor

velocidad del viento y humedad relativa. El viento dispersa y facilita la limpieza de contaminantes en el aire, por lo cual, al disminuir su velocidad se disminuye la dispersión y remoción de contaminantes. Algunos componentes de las partículas las vuelven higroscópicas, de tal manera que la humedad relativa juega un papel importante al modificar las propiedades de éstas, de modo que el incremento en la humedad puede modificar su tamaño, y hacer que se aglutinen en partículas de mayor tamaño y precipiten ⁽⁵⁶⁾.

Si bien es cierto que el análisis de varianza bajo un diseño de bloques al azar no mostró diferencia significativa entre las dos zonas de estudio, se pudo observar que las concentraciones de $PM_{2.5}$ de la Zona 2 fueron superiores a las de la Zona 1. La mayor concentración, aunque no significativa, puede deberse al efecto aditivo del viento. En el Área Metropolitana de Monterrey la dirección predominante del viento es de este a oeste, lo cual puede transportar los contaminantes de otras zonas del AMM al municipio de Santa Catarina. Aunado a esto, el municipio de Santa Catarina, colinda con el Cerro de las Mitras y la Sierra Madre Oriental, los cuales pueden actuar como barreras, limitar la dispersión de partículas y permitir la acumulación de contaminantes.

En nuestro país, sólo en cuatro zonas metropolitanas se determinan las $PM_{2.5}$ siendo las siguientes: Mexicali, Guadalajara, el valle de México y Monterrey, de estas cuatro, sólo se cuenta con información del Área Metropolitana de Monterrey y la Zona Metropolitana del valle de México, por lo que se desconoce el grado de exposición promedio a las $PM_{2.5}$ en el resto del país ⁽⁴⁰⁾.

En Estados Unidos en el año 2002, el promedio nacional anual de $PM_{2.5}$ fue de $12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 90% de las zonas presentaron concentraciones inferiores a $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En Europa, los niveles promedios anuales en zonas rurales oscilan entre los 11 y $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para zonas urbanas entre 15 a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para sitios con alto tráfico entre 20 y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁽⁵⁸⁾. En Asia, donde las concentraciones de $PM_{2.5}$ son responsables de la falta de visibilidad de la atmósfera, las concentraciones en un día pueden alcanzar niveles tan elevados como $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los promedios mensuales varían entre 61 y $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los resultados de este estudio indican que la calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey no es adecuada. En la última guía de calidad del aire de la Organización de las Naciones Unidas, se reporta que por cada elevación de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se incrementa un 6% el riesgo de mortalidad por todas las causas, 1.3% la mortalidad diaria relacionada con enfermedad respiratoria, y 0.9% la mortalidad diaria por enfermedades cardiovasculares ⁽⁵⁷⁾. Estos datos deben tomarse en cuenta para la planeación de acciones que permitan reducir los niveles de contaminación y de este modo proteger a la población más susceptible.

En estudios recientes se ha visto que al disminuir los niveles de $PM_{2.5}$ se incrementa la esperanza de vida de la población ⁽⁵⁸⁾. Una estimación realizada en la Ciudad de México, indica que una reducción del 10% de la contaminación puede generar beneficios de dos mil millones de dólares por año en gastos de salud ⁽⁵⁹⁾.

A la fecha no hay estudios realizados en Monterrey que asocien mortalidad con incrementos de $PM_{2.5}$, sin embargo, se puede asumir que la población está en riesgo, dado que los niveles de contaminación por $PM_{2.5}$ reportados desde el año 2003, han estado consistentemente elevados.

Por otro lado, diversos estudios muestran que la composición química de las partículas varía de un lugar a otro, y que la composición de éstas pudiera influir de manera importante en los efectos adversos a la salud. Debido a la multitud de compuestos presentes en las $PM_{2.5}$ los estudios para la caracterización de su composición química implican un alto costo.

A la fecha, en el AMM sólo se cuentan con dos estudios relacionados, en los que se haya estudiado la composición química de las $PM_{2.5}$, uno de ellos, realizado por nuestro departamento donde se evaluó el contenido de 17 hidrocarburos aromáticos policíclicos con potencial cancerígeno, en dos zonas del AMM detectándose su presencia en las dos zonas ⁽⁶⁰⁾, y el otro realizado por Aldape y cols ⁽⁴¹⁾ en el que se determinó el contenido de varios metales en una zona del AMM pero por un período de solo un mes.

Este trabajo representa el primer estudio realizado en el Área Metropolitana de Monterrey de caracterización del contenido de metales en partículas $PM_{2.5}$ con tiempos de muestreo de 24 horas durante un periodo de un año. La información de este estudio

permite tener una visión más completa del comportamiento espacial y temporal de las $PM_{2.5}$ de AMM y de la fracción metálica evaluada.

Uno de los objetivos del presente estudio fue la caracterización del contenido de metales en dos zonas del AMM. La obtención de partículas se realizó acorde al documento 40 CFR Parte 58, el cual establece las características del filtro a utilizar, y recomienda entre ellas lo siguiente: que no sea higroscópico, un tamaño de 8 x 10 pulgadas, y un peso máximo de 2.4 mg. Algunas referencias reportan el uso de filtros Partisol® y dicótomos de 37 mm a 47 mm de diámetro ^(61,62), en ellos, la obtención de muestra es mucho menor, por lo general emplean muestreadores de bajo volumen, con un flujo de 1 m³/h; En este estudio se utilizaron muestreadores de alto volumen (flujo de \approx 80 m³/h.) que permite el uso de filtros de mayor tamaño, obtener mayor cantidad de muestra y permite la caracterización del contenido de partículas suspendidas ⁽⁶³⁾.

Para la digestión de las muestras se siguió lo establecido en el compendio de la Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos “Compendio de Métodos para la determinación de compuestos inorgánicos en aire Ambiental” ⁽⁴⁶⁾. En un primer paso, se realizó un rastreo selectivo del contenido de los siguientes metales: Pb, As, Cd, Ni, Mn, Fe, Cr, V y Cu. Se pudo detectar la presencia de ellos en ambas zonas de estudio, siendo mayor la concentración para fierro, seguido de plomo, manganeso, cobre, arsénico, vanadio, cromo, níquel y cadmio. Los resultados de este estudio coinciden con los de estudios realizados en otros países en los que se ha reportado la presencia de estos mismos metales en las $PM_{2.5}$ siguiendo el mismo orden en frecuencia de concentración aunque en diferente magnitud ⁽⁶⁶⁾. Al respecto cabe señalar que si bien

algunos de los metales presentes en las PM_{2.5} del AMM también han sido reportados en las PM_{2.5} de otros no puede hacerse una comparación de las concentraciones de los metales encontradas en las en las PM_{2.5} de diferentes países ya que los períodos de muestreo, los métodos utilizados para el análisis y las condiciones meteorológicas fueron diferentes en cada estudio (Tabla 85) ⁽⁶⁴⁻⁶⁸⁾.

Tabla 85. Metales presentes en PM_{2.5}, reportados en otros países.

Metal / Lugar	As₃ ng/m	Fe₃ ng/m	Ni₃ ng/m	Mn₃ ng/m	Pb₃ ng/m
Inglaterra 2000	0.30	27.6	0.97	0.69	13.6
Estados Unidos 2002	ND	143	0.66	3.77	5.00
Grecia 2003	5.78	ND	2.19	ND	10.4
India 2007 - 2008	4	2,620	40	60	590

El procedimiento validado en nuestro laboratorio se aplicó al análisis cuantitativo de los cinco metales seleccionados (hierro, plomo, manganeso, arsénico y níquel). La cuantificación de ellos se realizó empleando tres diferentes técnicas de Espectroscopia de Absorción Atómica: Flama, Horno de Grafito y Generación de Hidruros. Se aplicó sólo una técnica por metal, la técnica seleccionada se escogió en función de la sensibilidad para cuantificar cada elemento. Se detectó consistentemente la presencia de estos metales en las muestras obtenidas. La concentración de los metales en el Área Metropolitana de Monterrey, presenta una variación espacial y temporal; los meses con mayor concentración fueron los correspondientes a la temporada invernal, junto con los meses de abril y julio. Estos meses se caracterizan

por ser de periodo vacacional en los que puede existir una gran movilización de vehículos a través del AMM.

No obstante el hecho de que no se haya observado diferencia significativa en las concentraciones de partículas ambientales entre ambas zonas de estudio (Tabla 84), en la comparación de medias se observó diferencia estadística altamente significativa en las variables arsénico, plomo y manganeso, con valores de p igual a 0.004, < 0.001 y < 0.001, respectivamente. En la Zona 1 se observaron mayores concentraciones de arsénico que las observadas en la Zona 2, con valores promedio de 4.36 y 3.14 ng/m³, respectivamente. En relación a las concentraciones de plomo y manganeso, éstas resultaron superiores en la Zona 2, que las observadas en la Zona 1, con valores promedio para el plomo de 25.61 y 56.49 ng/m³, respectivamente; mientras que para manganeso, los valores promedio fueron de 12.30 y 24.14 ng/m³, respectivamente. No se encontró diferencia significativa para el contenido de fierro y níquel en las zonas estudias.

En la Zona 1, circulan en su mayoría vehículos con motor a gasolina, mientras que en la Zona 2, lo hacen vehículos con motor diesel, la variación de arsénico en los combustibles fósiles, es mayor en la gasolina que en el diesel, lo que podría explicar la mayor concentración de arsénico en la Zona 1 en comparación con la Zona 2 ⁽⁶⁹⁾.

Actualmente no hay legislación en nuestro país que establezca un límite para cada uno de los metales en las PM_{2.5}. Se tiene implementada en el territorio nacional la

NOM-026-SSA1-1993 que establece un límite de plomo en el aire ambiente como medida de protección a la población, sin embargo, esta regulación se enfoca a partículas suspendidas totales, en los años recientes se ha visto que las partículas mayormente asociadas con efectos adversos a la salud son las $PM_{2.5}$. Legislaciones como Estados Unidos o la Unión Europea han cambiado sus estándares de calidad del aire, y establecido una concentración menor de plomo en aire, muestra de ello, en Estados Unidos que el límite bajó de $1,500 \text{ ng/m}^3$ a 150 ng/m^3 y el monitoreo se puede realizar en Partículas Suspendidas Totales o en PM_{10} en función de la tecnología disponible en el sitio. En la Unión Europea, el límite se redujo de $2,000 \text{ ng/m}^3$ a 500 ng/m^3 y se estableció la medición en PM_{10} . Además se cuentan estándares para evaluar la calidad del aire con respecto a otros metales como lo son arsénico, cadmio y níquel (71-72).

Los datos científicos muestran que el arsénico, y níquel son cancerígenos y genotóxicos para el ser humano y no hay ningún nivel identificable por debajo del cual estas sustancias no constituyan un riesgo para la salud humana. El impacto a la salud y el medio ambiente se produce a través de las concentraciones en el aire. A la fecha la información científica en torno a la contaminación del aire en Monterrey es escasa y se necesitan estudios epidemiológicos de mortalidad y morbilidad que puedan estimar los efectos que las partículas $PM_{2.5}$ puedan tener en nuestra población.

El problema de la contaminación no se limita a una región en particular, su control, requiere la acción conjunta de todos los sectores tanto a nivel regional, nacional como internacional.

Este trabajo representa el primer estudio de evaluación del contenido de metales en las partículas $PM_{2.5}$ del Área Metropolitana de Monterrey con tiempos de muestreo de 24 horas durante un período de un año. Los resultados obtenidos indican que se debe considerar el establecimiento de medidas encaminadas al control de calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey.

CAPÍTULO V

Conclusiones

- 1.- Los niveles de $PM_{2.5}$ en las zonas 1 y 2 del AMM estudiadas son elevados y rebasan el límite anual de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-1993.
- 2.- No hubo diferencia estadísticamente significativa en el contenido de $PM_{2.5}$ entre las zonas estudiadas.
- 3.- Los meses con los niveles más altos de $PM_{2.5}$ en ambas zonas son mayo, noviembre y diciembre.
- 4.- Se detectó la presencia de fierro, arsénico, plomo, manganeso, níquel, cadmio, cobre, cromo y vanadio en las $PM_{2.5}$ de ambas zonas.
- 5.- Se cuantificaron fierro, plomo, manganeso, arsénico y níquel en las $PM_{2.5}$ de ambas zonas.
- 6.- El fierro fue el metal más abundante en ambas zonas seguido del plomo, manganeso, arsénico y níquel.

7.- El contenido de plomo y manganeso en las partículas $PM_{2.5}$ fue mayor en la Zona 2, y el de arsénico en la Zona 1.

Perspectivas.

- 1.- Continuar la caracterización química de las $PM_{2.5}$ evaluando otros agentes potencialmente tóxicos.

- 2.- Ampliar el estudio de contaminantes atmosféricos con la inclusión de otras zonas del Área Metropolitana de Monterrey.

- 3.- Evaluar el uso de biomarcadores que permitan establecer el grado de exposición a los contaminantes atmosféricos y su impacto en la salud.

- 4.- Realizar estudios encaminados a la especiación de metales e identificación de fuentes contaminantes.

Bibliografía:

- 1 Croxxato, H. R. (1985). "Editorial. Ciencia, humanismo y biosfera." REVISTA AMBIENTE Y DESARROLLO I(2): 9-12.
- 2 Albert, L. A. (1997). Introduccion a la toxicologia ambiental, ECO.
- 3 Lacasaña-Navarro, Met al. (1999). "Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres mega ciudades de América Latina." Salud Pública de México 41: 203-215.
- 4 Maldonado, J. M. (2009). "CIUDADES Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL." Revista de Ingeniería 30 (Noviembre): 66-71.
- 5 WHO (2000). Air quality guidelines for Europe ; second edition, WHO Regional Publications.
- 6 McGranahan, G. (2003). Air pollution and health in rapidly developing countries. London, Earthscan Publications Ltd.
- 7 Boubel, R. W. (1994). Fundamentals of air pollution, Academic Press.
- 8 Bai, N., M. Khazaei, et al. (2007). "The pharmacology of particulate matter air pollution-induced cardiovascular dysfunction." Pharmacology & Therapeutics113(1): 16-29.
- 9 Brunekreef, B. and S. T. Holgate (2002). "Air pollution and health."The Lancet 360(9341): 1233-1242.
- 10 Schwartz, J. and D. W. Dockery (1992). "Increased Mortality in Philadelphia Associated with Daily Air Pollution Concentrations." American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 145(3): 600-604.
- 11 Schwartz, J. (1991). "Particulate air pollution and daily mortality in detroit."Environmental Research 56(2): 204-213.

- 12 Chellam, S. (2005). "Emissions of Organic Compounds and Trace Metals in Fine Particulate Matter from Motor Vehicles: A Tunnel Study in Houston, Texas." *J Air Waste Manag Assoc* 55(January 2005): 60-72.
- 13 Dockery, D. W., C. A. Pope, et al. (1993). "An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities." *New England Journal of Medicine* 329(24): 1753-1759.
- 14 Cervantes, M. (2005). "Las partículas suspendidas en tres grandes ciudades mexicanas." *Gaceta Ecológica*(74): 15-28.
- 15 Churg, A. (2000). "Ambient Atmospheric Particles in the Airways of Human Lungs." *Ultrastructural Pathology*24(6): 353-361
- 16 Dockery, D. W. (2006). "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect." *Journal of the Air & Waste Management Association* 56(June 2006): 709-742.
- 17 MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a material particulado.52.- Gilman, A. G. (2003). Las bases farmacológicas de la terapéutica, McGraw-Hill Interamericana.
- 18 Klassen, C. (2007). Casarett&Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons.
- 19 Gilman, A. G. (2003). Las bases farmacológicas de la terapéutica, McGraw-Hill Interamericana.
- 20 Zanobetti, A., M. Franklin, et al. (2009). "Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions." *Environmental Health* 8(1): 58.
- 21 WHO (2005). Effects of air pollution on children's health and development. A review of evidence., World Health Organization Europe.

- 22 Romero-Placeres, M., P. Más-Bermejo, et al. (2004). "Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana." Salud Pública de México46: 222-233.
- 23 Rosales-Castillo, J. A., V. M. Torres-Meza, et al. (2001). "Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos." Salud Pública de México43: 544-555.
- 24 Cormier, S. et al. (2006). "Origin and Health Impacts of Emissions of Toxic By-Products and Fine Particles from Combustion and Thermal Treatment of Hazardous Wastes and Materials." *Environ Health Perspect* 114(6).
- 25 Schwarze, P. E., J. Øvrevik, et al. (2006). "Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies." *Human & Experimental Toxicology* 25(10): 559-579.
- 26 Chen, L. C. and M. Lippmann (2009). "Effects of Metals within Ambient Air Particulate Matter (PM) on Human Health." *Inhalation Toxicology* 21(1): 1-31.
- 27 Schlesinger, R. B., N. Kunzli, et al. (2006). "The Health Relevance of Ambient Particulate Matter Characteristics: Coherence of Toxicological and Epidemiological Inferences." *Inhalation Toxicology* 18(2): 95-125.
- 28 Grahame, T. J. and R. B. Schlesinger (2007). "Health Effects of Airborne Particulate Matter: Do We Know Enough to Consider Regulating Specific Particle Types or Sources?" *Inhalation Toxicology* 19(6-7): 457-481.
- 29 USEPA (2008). "Technology Transfer Network Air Toxics Web Site."2012, from <http://www.epa.gov/ttn/atw/188polls.html>.
- 30 Vouk, V. B. and W. T. Piver (1983). "Metallic elements in fossil fuel combustion products: amounts and form of emissions and evaluation of carcinogenicity and mutagenicity." *Environ Health Perspect* 47.

- 31 Burnett, R. (2000). "Association between particulate- and gas-phase components of urban air pollution and daily mortality in eight Canadian cities" *Inhalation Toxicology* 12(s4): 15-39.
- 32 Laden, F., L. M. Neas, et al. (2000). "Association of Fine Particulate Matter from Different Sources with Daily Mortality in Six U.S. Cities." *Environ Health Perspect* 108(10).
- 33 Ostro, B., W.-Y. Feng, et al. (2006). "The Effects of Components of Fine Particulate Air Pollution on Mortality in California: Results from CALFINE." *Environ Health Perspect* 115(1)
- 34 Heinrich, J., B. Hoelscher, et al. (1999). "Respiratory diseases and allergies in two polluted areas in East Germany." *Environ Health Perspect* 107(1).
- 35 Pope, C. A., J. Schwartz, et al. (1992). "Daily Mortality and PM10 Pollution in Utah Valley." *Archives of Environmental Health: An International Journal* 47(3): 211-217.
- 36 Krzyzanowski, M. (2005). Health effects of transport-related air pollution.
- 37 Dusseldorp, A., H. Kruize, et al. (1995). "Associations of PM10 and airborne iron with respiratory health of adults living near a steel factory." *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 152(6): 1932-1939.
- 38 Roemer, W., G. Hoek, et al. (2000). "PM10 elemental composition and acute respiratory health effects in European children (PEACE project)." *European Respiratory Journal* 15(3): 553-559.
- 39 Hong, Y.-C., S.-S.Hwang, et al. (2006)."Metals in Particulate Pollutants Affect Peak Expiratory Flow of Schoolchildren." *Environ Health Perspect* 115(3).
- 40 INE (2011). Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009).

- 41 Aldape, F., J. Flores M, et al. (1999). "PIXE analysis of airborne particulate matter from Monterrey, Mexico. A first survey." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 150(1–4): 439-444.
- 42 Gonzales-Santiago, O. (2011). "Temporal Analysis of PM10 in Metropolitan Monterrey, México." Journal of the Air & Waste Management Association 61(May): 573-579.
- 43 Gobierno del Estado de Nuevo León. "Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 2008-2012."
- 44 Alatorre, A. A. G. (2002). Análisis estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: un diagnóstico para el desarrollo, TEC de Monterrey, Centro de Estudios Estratégicos, Centro de Desarrollo Estratégico Metropolitano.
- 45 INE (2009). Ampliación de la red de monitoreo SIMA en el Área Metropolitana de Monterrey.
- 46 USEPA (1999). EPA/625/R-96/010a Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air.
- 47 CENAM-EMA (2008). Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en las mediciones analíticas que emplean las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica y de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente.
- 48 Quíroga, V. (1976). Manual Práctico para el Análisis de Experimentos de Campo, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, OEA.
- 49 NORMA Oficial Mexicana NOM-177-SSA1-1998, Que establece las pruebas y procedimientos para demostrar que un medicamento es intercambiable. Requisitos a que deben sujetarse los terceros autorizados que realicen las pruebas.
- 50 CITAC/EURACHEM (2002). Guide to Quality in Analytical Chemistry.

- 51 Broekaert, J. A. C. (2005). Analytical atomic spectrometry with flames and plasmas, Wiley-VCH.
- 52 Villegas, W. Análisis Ultravioleta-visible. la Teoría y la Práctica en El Ejercicio Profesional, Uady.
- 53 CITAC/EURACHEM (2002). Guide to Quality in Analytical Chemistry.
- 54 CENAM-EMA (2008). Guía para la validación y la verificación de los procedimientos de examen cuantitativos empleados por el laboratorio clínico.
- 55 Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo.
- 56 Muñoz, A. (2001). "Partículas suspendidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y mutagenicidad en el suroeste de la Ciudad de México." Revista Internacional de Contaminación Ambiental 17(4): 193-204.
- 57 WHO (2006). Air Quality Guidelines, Global Update 2005
- 58 Pope, C. A., M. Ezzati, et al. (2009). "Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States." New England Journal of Medicine 360(4): 376-386
- 59 Molina, M. (2004). "Megacities and Atmospheric Pollution." Journal of the Air & Waste Management Association 54(June): 644-680.
- 60 González Santiago, O. (2009). Determinación del contenido de PAHs en partículas PM2.5 en una zona de alto tráfico vehicular y otra con potencial exposición industrial del Área Metropolitana de Monterrey / por Omar González Santiago. Facultad de Medicina, UANL.
- 61 Quijano, A. (2010). "Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia." Revista de la Facultad de Ciencias Básicas 8(1): 1-20.

- 62 Figueroa, D. A., C. J. Rodríguez-Sierra, et al. (2006). "Concentrations of Ni and V, other heavy metals, arsenic, elemental and organic carbon in atmospheric fine particles (PM_{2.5}) from Puerto Rico. *Toxicology and Industrial Health* 22(2): 87-99.
- 63 Thermo Scientific Aerosol and Dust Monitoring Solutions, [http://www.groco.is/groco/upload/files/frettir_2012/web_aerosol-dust_brochure_design_rv3.2_final\[1\].pdf](http://www.groco.is/groco/upload/files/frettir_2012/web_aerosol-dust_brochure_design_rv3.2_final[1].pdf)
- 64 Martuzevicius, D., S. A. Grinshpun, et al. (2004). "Spatial and temporal variations of PM_{2.5} concentration and composition throughout an urban area with high freeway density—the Greater Cincinnati study." *Atmospheric Environment* 38(8): 1091-1105.
- 65 Moreno, T. (2011). "Variations in time and space of trace metal aerosol concentrations in urban areas and their surroundings." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11: 14747–14776.
- 66 Joseph, A. (2012). "Chemical Characterization and Mass Closure of Fine Aerosol for Different Land Use Patterns in Mumbai City. *Aerosol and Air Quality Research* 12(1): 61-72.
- 67 Heal, M. (2004). "Total and water soluble trace metal content of urban background PM₁₀, PM_{2.5} and Black Smoke in Edinburgh, UK," *Atmospheric Environment*(39): 1417-1430.
- 68 Vasilakos, C., S. Pateraki, et al. (2007). "Temporal determination of heavy metals in PM_{2.5}; aerosols in a suburban site of Athens, Greece." *Journal of Atmospheric Chemistry* 57(1): 1-17.
- 69 Brandão, G., R. de Campos, et al. (2006). "Determination of arsenic in diesel, gasoline and naphtha by graphite furnace atomic absorption spectrometry using micro emulsion medium for sample stabilization. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 385(8): 1562-1569.

- 70 Cortez-Lugo, M., M. M. Téllez-Rojo, et al. (2003). "Tendencia de los niveles de plomo en la atmósfera de la zona metropolitana de la Ciudad de México: 1988-1998." *Salud Pública de México* 45: 196-202.
- 71 Directiva 2004/07/CE (2004) Del Parlamento Europeo y del Consejo." *Diario Oficial de la Unión Europea*.
- 72 Directiva 1999/30/CE del Consejo (1999) *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*.

Anexo 1

Calibración del muestreador de alto volumen con separador para PM2.5

Se instala un filtro limpio en el muestreador.

Se cierra el equipo.

Se instala el manómetro en el muestreador.

Se deja operar el equipo por cinco minutos.

Se toma la caída de presión en el manómetro.

Se toman los datos de presión atmosférica y temperatura locales.

Una vez tomada la lectura del manómetro se apaga el equipo y se retira el filtro.

Se instala el calibrador (VARIFLO) en el muestreador (Figura A1.1).



Figura A1.1 Instalación del VARIFLO.

Los orificios del VARIFLO deben encontrarse totalmente abiertos.

Se enciende nuevamente el quipo y se deja operar por al menos dos minutos.

Se comienza a girar la perilla del VARIFLO para ajustar la lectura de presión del manómetro al mismo valor que se obtuvo con el filtro limpio.

Una vez que se han igualado las presiones se toma la caída de presión del VARIFLO (Figura A 1)

Toda la información debe ser vaciada en la hoja de calibración del muestreador.



Figura A 1. 2.- Posición del manómetro en la lectura de la caída de presión del VARIFLO



CALIBRACION DE MUESTREADORES DE ALTO VOLUMEN PARA PARTICULAS SUSPENDIDAS FRACCION RESPIRABLE PM2.5

ESTANDAR DE TRANSFERENCIA	Pa = Presión barométrica (mm Hg)
Modelo:	Ta = Temperatura ambiente (°C)
No. De Serie:	T1 = Temperatura ambiente (K)
Fecha certificación:	Pstd = Presión estándar (mm Hg) 760
Pendiente (m):	Tstd = Temperatura estándar (K) 298
Intersección (b):	MUESTREADOR
	Marca:
	Modelo:
	No. Serie:
	Operador:
	Firma:

DATOS DE CALIBRACION PARA EL MUESTREADOR DE PARTICULAS SUSPENDIDAS PM2.5 CON SISTEMA VENTURI															
MAMOMETRO PRESION A TRAVES DEL ORIFICIO DE AGUA	PRESION DEL VENTURI DEL VENTURI DEL VENTURI	PRESION DEL VENTURI DEL VENTURI	PRESION DEL VENTURI DEL VENTURI	PI DEL VENTURI DEL VENTURI	Pa - ΔPstd (mm Hg)	Pa - ΔPstd (mm Hg)	Pa - ΔPstd (mm Hg)	Pa - ΔPstd (mm Hg)	FLUJO VOLUMETRICO ESTANDAR Qstd			FLUJO VOLUMETRICO ACTUAL Qa			Error %
									FLUJO VOLUMETRICO ESTANDAR	FLUJO VOLUMETRICO ACTUAL	FLUJO VOLUMETRICO ESTANDAR	FLUJO VOLUMETRICO ACTUAL	FLUJO VOLUMETRICO ESTANDAR	FLUJO VOLUMETRICO ACTUAL	
									{ m ³ /min std }	{ m ³ /min std }	{ m ³ /min std }	{ m ³ /min }	{ m ³ /min }	{ m ³ /min }	
No.															
$Q_{std} = \sqrt{\frac{\Delta H * Pa * T_{std}}{P_{std} * T_1}} \cdot \frac{P_1}{P_a} \cdot \frac{Q_a}{Q_{std}}$															
$Q_{std} = \sqrt{\frac{\Delta H * Pa * T_{std}}{P_{std} * T_1}} \cdot \frac{P_1}{P_a} \cdot \frac{Q_a}{Q_{std}}$															
$1 \frac{m^3}{min} = 35.31 \frac{Ft^3}{min}$															
$Q_{std} = \sqrt{\frac{\Delta H * Pa * T_{std}}{P_{std} * T_1}} \cdot \frac{P_1}{P_a} \cdot \frac{Q_a}{Q_{std}}$															

FORMULAS:	$Q_a = Q_{std} * \frac{P_{std} * T_1}{P_a * T_{std}}$
	mm Hg = in H2O * 1.87
	RESULTADO DE LA CALIBRACION:

Nota 1: Para el flujo volumétrico estándar se utiliza la pendiente (m) y la intersección (b) de la curva del estándar de transferencia a condiciones estándar
Nota 2: Los datos de flujo de la "Look-up Table" son empleando la tabla de flujos del respectivo muestreador TISCH.

Cálculos

Primero debemos obtener el valor del flujo de diseño del equipo. Este flujo corresponde al que se obtiene con el filtro limpio.

La presión del manómetro medida en el equipo en pulgadas de agua debe transformarse a Mg. Se multiplica por 1.87.

A la presión ambiente (P_a) se le resta la caída de presión del equipo DP_{cfd} .

La denominamos $P_1 = (P_a - DP_{cfd})$.

Se obtiene la relación de presión (P_1/P_a), este cociente siempre va a ser menor de 1.

El valor obtenido de P_1/P_a se cruza en la Tabla de flujos "LOOK-UP TABLE" contra el valor de temperatura y donde se cruza es el flujo.

El segundo paso es obtener el valor de flujo dado por el calibrador VARIFLO.

La presión del manómetro medida en el equipo en pulgadas de agua debe transformarse a Mg. Se multiplica por 1.87.

Se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_{STD} = \frac{\sqrt{\frac{\Delta H * P_a * T_{STD}}{P_{STD} * T_1}} - b}{m}$$

Este es el flujo volumétrico a condiciones estándar.

m y b son la pendiente y la intersección al eje de la calibración del VARIFLO a condiciones estándar.

Una vez obtenido el flujo a condiciones estándar se transforma a las condiciones locales de presión y temperatura.

$$Q_a = Q_{STD} * \frac{P_{STD} * T_1}{P_a * T_{STD}}$$

El flujo obtenido con el VARIFLO debe ser el mismo (con un error no mayor del 5 %) que se obtuvo de la LOOK-UP TABLE con el filtro limpio instalado.

Si esto sucede la calibración se considera satisfactoria.

Anexo 2

Calculo de la concentración de PM2.5

Para obtener la concentración del filtro se hace lo siguiente.

Se obtiene el flujo de trabajo del equipo tal y como lo indica el formato de instalación del filtro.

Se obtiene el volumen de aire muestreado: $V = Q_a * t$.

Dónde:

V = Volumen de aire muestreado (m³)

Qa = Flujo volumétrico (m³/min)

t = Tiempo (min)

Ya obtenido el volumen de aire se procede al cálculo de la concentración

$$C = \frac{(W_f - W_i) * 10^6}{V} \quad (\mu\text{g} / \text{m}^3)$$

Dónde:

C = Concentración

Wi = Peso del filtro antes del muestreo (gramos)

Wf = Peso del filtro después del muestreo (gramos)

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Medicina. Departamento de Farmacología y Toxicología

MUESTREADOR DE PARTICULAS PM2.5 CON SISTEMA VENTURI

Equipo: Muestreador de Alto Volumen
 Marca: Tisch-Enviroment Estado: _____
 Modelo: _____ Ciudad: _____
 No. de serie: _____ Localidad: _____

FILTRO	
No. de Filtro _____	
Fecha de instalación: _____	Fecha de retiro: _____

DATOS DEL MUESTREO	
ti: _____ Hrs	Convertir a minutos multiplicando por 60
tf: _____ Hrs	
<input type="checkbox"/> $\Delta t = tf - ti =$ _____ Hrs	$\Delta t =$ _____ Mins
Pavg: _____ mm Hg	
Tavg: _____ °C	
Nota 1: ti y tf tomados del indicador de tiempo transcurrido del equipo	
Nota 2: La presión y temperatura son promedios del día del muestreo	

FLUJO DE MUESTREO	
$\Delta H_{2O_i} =$ _____ in H ₂ O	Tomada cuando se instala el filtro en el equipo
$\Delta H_{2O_f} =$ _____ in H ₂ O	Tomada antes de retirar el filtro del equipo después del muestreo
$\Delta H_{2O_{avg}} = (\Delta H_{2O_f} + \Delta H_{2O_i}) / 2 =$ _____ in H ₂ O	
Para convertir a mmHg se multiplica X 1.87	$\Delta P = \Delta H_{2O_{avg}} * 1.87 =$ _____ mm Hg
$(P_{avg} - \Delta P) / P_{avg} =$ _____	
Para encontrar el valor del flujo cruzar el último resultado con la temperatura en la "Look-up Table"	
Flujo de muestreo Qa = _____ m³/min	

Nota: A la gráfica del equipo se le deben anotar los datos del número de filtro, sitio de muestreo, fecha, tiempos inicial y final

Observaciones: _____

Responsable: _____ Firma: _____

CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS PM_{2.5}

Numero de filtro = _____

	Inicial	Final
Peso (g)	_____	_____
Fecha	_____	_____
Operador	_____	_____

Calcular el volumen total del aire muestreado con la siguiente ecuación:

$$V = Q_a \times t = \underline{\hspace{2cm}}$$

Dónde:

V = volumen de aire total

Q_a = flujo de muestreo m³/min

t = tiempo total en minutos

Calcular y reportar la concentración de partículas con la siguiente ecuación:

$$PM_{2.5} = (P_f - P_i/V) (10^6)$$

Dónde:

P_f = peso final del filtro en gramos

P_i = peso inicial del filtro en gramos

V = volumen de aire total

Concentración de partículas PM_{2.5} = _____ μg/m³

Responsable _____

Firma _____

Anexo 3

Cálculo del percentil 98

El valor del percentil 98 se calcula como se indica a continuación.

a. Se ordenan los valores diarios de concentración obtenidos durante un año en una serie ascendente ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) en la que cada valor es igual o mayor que el valor anterior ($x_n \geq x_{n-1}$).

b. Se multiplica el número total de valores, n , por 0.98. Se toma la parte entera del valor resultante, i , y el valor del percentil 98 se calcula con la ecuación:

$$P_{0.98} = x_{i+1}$$

dónde:

$P_{0.98}$ = percentil 98

i = la parte entera del producto de 0.98 y n

x_{i+1} = es el número $(i + 1)$ -ésimo número en la serie ordenada

c. El percentil 98, $P_{0.98}$, es el valor de concentración con índice $i + 1$ en la serie ordenada de valores.

Glosario

Agua tipo 1.- Agua pura Clase I ASTM, posee resistividad mínima de 18,2 M Ω ·cm.

Humedad relativa.- Es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Se expresa en tanto por ciento. %

Resistividad.- Es la resistencia eléctrica específica de un material. Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohmios por metro (Ω ·m).¹

Validación.- Evidencia experimental documentada de que un procedimiento cumple con el propósito para el que fue diseñado.

Linealidad: Capacidad de un método analítico, en un intervalo de trabajo, para obtener resultados que sean directamente proporcionales a la concentración del compuesto en la muestra.

Precisión: Grado de concordancia entre resultados analíticos individuales cuando el procedimiento se aplica repetidamente a diferentes porciones de una muestra homogénea del producto, se evalúa como repetibilidad y reproducibilidad (precisión intermedia).

Límite de cuantificación: Concentración más baja del compuesto que puede cuantificarse cumpliendo con la precisión y exactitud establecidas en el método.

Veracidad: Grado de concordancia existente entre la media aritmética de un gran número de resultados y el valor verdadero o aceptado como referencia.