



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AIRE RESPECTO DE PARTÍCULAS
SUSPENDIDAS TOTALES (PST) Y METALES PESADOS (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr)
DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, DURANTE EL
PERIODO JUNIO DE 2001 A MAYO DE 2002**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
AREA INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA

MARTÍN EUSEBIO CRUZ CAMPAS

HERMOSILLO, SONORA

FEBRERO DE 2005

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	6
3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	7
4. ANTECEDENTES	
4.1 Calidad del Aire	8
4.1.1 Fuentes de Contaminación	8
4.1.2 Tipos de Contaminantes del Aire	9
4.1.2.1 Partículas	9
4.1.2.2 Metales Pesados	16
4.2 Efectos de la Contaminación del Aire	20
4.2.1 Partículas	21
4.2.2 Metales Pesados	21
4.2.2.1 Efectos a la salud por plomo	22
4.2.2.2 Efectos a la salud por cadmio	22
4.2.2.3 Efectos a la salud por níquel	23
4.2.2.4 Efectos a la salud por cobre	24
4.2.2.5 Efectos a la salud por cromo	24
4.3 Máximos Permisibles de Calidad del Aire	25
4.3.1 Partículas	25
4.3.2 Metales pesados	26
4.3.2.1 Máximos permisibles para plomo	26

4.3.2.2	Máximos permisibles para cadmio	28
4.3.2.3	Máximos permisibles para níquel	28
4.3.2.4	Máximos permisibles para cobre	29
4.3.2.5	Máximos permisibles para cromo	29
4.3.3	Índices de calidad del Aire	30
4.4	Estaciones y Redes de Monitoreo	34
4.4.1	A Nivel Internacional	34
4.4.2	A Nivel Nacional	49
4.4.3	A Nivel Local	50
4.5	Programas de Calidad del Aire	50
4.5.1	A Nivel Internacional	50
4.5.2	A Nivel Nacional	52
4.5.3	a Nivel Local	54
5. AREA DE ESTUDIO		
5.1	Localización	57
5.2	Climatología	57
5.3.	Vegetación	59
5.4	Población	59
6. MATERIALES Y METODOS		
6.1	Localización y Distribución de las Estaciones de Muestreo	60
6.2	Frecuencia y Procedimiento de Colecta de Muestras de Aire	60
6.3	Determinaciones Analíticas	63
6.3.1	Partículas suspendidas totales (PST)	63
6.3.2	Metales pesados totales (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr)	63
6.4	Control de Calidad	63
6.4.1	Aseguramiento de calidad para monitoreo en aire	63
6.4.2	Otros elementos de control de calidad	64
6.4.2.1	Muestreo	64
6.4.2.2	Comparativo de consideraciones para redes de monitoreo	64

6.5 Análisis de Resultados	66
6.5.1 Líneas de tendencia de concentraciones según parámetro y datos climáticos	66
6.5.2 Comportamiento espacial y temporal de los resultados	66
7. RESULTADOS	
7.1 Control de Calidad	67
7.1.1 Aseguramiento de calidad para monitoreo en aire	67
7.1.1.1 Chequeo de filtros	67
7.1.1.2 Equipos	67
7.1.1.3 Límite de detección	67
7.1.1.4 Cobertura	68
7.1.1.5 Calibración de muestreadores	70
7.1.1.6 Calibración analítica	71
7.1.1.7 Evaluación del desempeño	72
7.1.1.8 Precisión	72
7.1.1.9 Exactitud	73
7.1.2 Otros elementos de control de calidad	73
7.1.2.1 Muestreo	73
7.1.2.2 Comparativo de consideraciones para redes de monitoreo	75
7.2 Partículas Suspendidas Totales (PST).	78
7.2.1 Concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) por estación de monitoreo	78
7.2.2 Comparación con los máximos permisibles para PST	79
7.2.3 Líneas de tendencia de PST con datos climáticos	79
7.2.4 Comportamiento espacial y temporal de PST	83
7.2.4.1 Comportamiento espacial	83
7.2.4.2 Comportamiento temporal	85
7.3 Metales Pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).	88
7.3.1 Concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) por estación de monitoreo.	88
7.3.2 Comparación con los máximos permisibles para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).	90

7.3.2.1 Plomo	90
7.3.2.2 Cadmio	92
7.3.2.3 Níquel	92
7.3.2.4 Cobre	95
7.3.2.5 Cromo	95
7.3.3 Líneas de tendencia de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) con datos climáticos.	98
7.3.4 Comportamiento espacial y temporal de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).	105
7.3.4.1 Comportamiento espacial	105
7.3.4.2 Comportamiento temporal	108
8. DISCUSIÓN	
8.1 Programa de Monitoreo de la Calidad del Aire en Hermosillo, Sonora	112
8.2 Muestreo	115
8.3 Concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) para el período Junio de 2001a Mayo de 2002.	116
8.4 Concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) para el periodo Junio de 2001 a Mayo de 2002	121
9. CONCLUSIONES	
9.1 Partículas Suspendidas Totales (PST)	129
9.2 Metales Pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr).	129
10. RECOMENDACIONES	131
11. LITERATURA CITADA	133
12. ANEXOS	139

1.- Resultados de concentración de partículas suspendidas totales (PST) en aire ambiente en las tres estaciones de monitoreo durante el periodo junio de 2002 a mayo de 2002.

- 2.- Resultados de control de calidad (fase analítica)
 - 2a.- Resultados de la calibración analítica
 - 2b.- Resultados de la estabilidad de calibración
 - 2c.- Resultados de exactitud
- 3.- Resultados del coeficiente de determinación (R^2) para partículas suspendidas totales (PST).
- 4.- Resultados de estadístico de Van der Waerden para partículas suspendidas totales (PST).
- 5.- Resultados de la prueba a posteriori para partículas suspendidas totales (PST).
- 6.- Resultados de concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) en aire ambiente en las tres estaciones de monitoreo durante el período junio de 2001 a mayo de 2002.
- 7.- Resultados del coeficiente de determinación (R^2) para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).
- 8.- Resultados de estadístico de Van der Waerden para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).
- 9.- Resultados de las pruebas a posteriori para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Representación esquemática de la distribución de tamaño de partículas en el aire ambiente	10
2. Pirámide de efectos a la salud	20
3. Localización del área de estudio.	58
4. Ubicación de las estaciones de monitoreo en la Ciudad de Hermosillo, Sonora.	61
5. Muestreador de alto volumen (HI-VOL).	62
6. Distribución y comparación de concentraciones de PST con los máximos permisibles según la NOM-024-SSA1-1993.	80
7. Líneas de tendencia con mayor valor de correspondencia (R^2).	82
8. Distribución de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en las tres ubicaciones de monitoreo.	84
9. Distribución de concentraciones de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) según estación del año.	86
10. Concentraciones detectadas de plomo por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.	91
11. Concentraciones detectadas de cadmio por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.	93
12. Concentraciones detectadas de níquel por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.	94
13. Concentraciones detectadas de cobre por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.	96
14. Concentraciones detectadas de cromo por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.	97
15. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el plomo en cada estación de monitoreo.	99
16. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el cadmio en cada estación de monitoreo.	100
17. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el níquel en cada estación de monitoreo.	101

18. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el cobre en cada estación de monitoreo.	103
19. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el cromo en cada estación de monitoreo.	104
20. Distribución de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) en las estaciones de monitoreo Centro, Noreste y Noroeste.	106
21. Distribución de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) según estación del año.	109

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Composición de aire seco no contaminado	8
2. Fuentes de emisión de partículas	12
3. Parámetros de calidad del aire monitoreados en México	13
4. Resultados de PST para tres estaciones de muestreo en la Ciudad de Hermosillo en el período 1990-1995	15
5. Puntos de quiebre para valores IMECA	33
6. Efectos asociados a la salud	33
7. Número mínimo de puntos de muestreo para mediciones mixtas para evaluar el cumplimiento con los máximos para la protección de la salud humana y los umbrales de alerta en zonas y poblaciones	36
8. Número mínimo de puntos de muestreo para mediciones mixtas para evaluar el cumplimiento con los máximos de protección de ecosistemas o vegetación	36
9. Criterios de evaluación de la calidad de los datos	37
10. Requerimientos mínimos (aseguramiento de calidad)	40
11. Resumen de escalas espaciales para estaciones de monitoreo locales y nacionales	44
12. Distancias de separación entre estaciones de monitoreo para plomo y avenidas o calles	46
13. Frecuencia de valores de partículas suspendidas totales (PST) por rangos de concentración.	47
14. Resumen estadístico anual para plomo.	47
15. Rangos del índice de calidad del aire y descripción de la categoría.	48
16. Puntos de quiebre para PSI (Pollutants Standard Index) unidades métricas	49
17. Objetivos de calidad en las mediciones – plomo	65
18. Valores de límite de detección de metales pesados obtenidos	68
19. Porcentajes de muestreos exitosos – cobertura	69
20. Comparativo de consideraciones para redes de monitoreo según la normatividad de la comunidad europea	76

21. Comparativo de consideraciones para redes de monitoreo según la normatividad de los Estados Unidos de América (EUA).	77
22. Resumen de concentración de partículas suspendidas totales (PST) en las tres estaciones de monitoreo en la Ciudad de Hermosillo, Sonora para el período Mayo de 2001 a Junio de 2002.	78
23. Valores de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados detectados en aire ambiente de la ciudad de Hermosillo, Sonora durante el período junio de 2001 a mayo de 2002.	89

RESUMEN

Partiendo del hecho de que una calidad aceptable del aire es un derecho humano fundamental, así como a que existe legislación nacional e internacional que regula y exige dicha calidad, es indispensable el desarrollo de evaluaciones, diagnósticos y programas que garanticen el conocimiento y atención oportunos a los problemas de contaminación del aire. El presente trabajo evalúa la calidad del aire para la ciudad de Hermosillo, Sonora, México respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) durante el período junio de 2001 a mayo de 2002. Para la evaluación se utilizaron los datos y filtros de los muestreos ejecutados por el H. Ayuntamiento de Hermosillo durante ese período en tres estaciones de monitoreo (Mazón, Cesues y Cbtis). La evaluación consideró determinar: Los valores de concentración en el aire ambiente de PST y los metales mencionados, la calidad del aire ambiente para esos parámetros, conocer el comportamiento espacial y temporal de los mismos, así como determinar la posible relación entre las variaciones de concentraciones de los parámetros estudiados y elementos climáticos. Además se evaluaron las características de operación y calidad de los datos obtenidos por la red de monitoreo, a fin de recomendar actividades tendientes a establecer un control de calidad en el programa. Los resultados del presente estudio indican que las concentraciones de PST rebasaron frecuentemente los $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (normativa para máximo permisible diario) en dos de las tres estaciones de monitoreo, y que en las tres estaciones se rebasó al máximo permisible promedio anual de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ concluyéndose que la calidad del aire se encontraba entre no satisfactoria y mala durante el período analizado. Se estableció que existe diferencia espacial, pero no temporal de las concentraciones de PST y se determinó que al menos para una estación existe una correspondencia entre la variación de la concentración de PST y la variación de la temperatura ambiente. Respecto de la concentración detectada de los metales Pb, Cd, Ni, Cu y Cr, se estableció que las mismas se encuentran por debajo de los criterios y/o máximos permisibles usados como referencia de calidad del aire, por lo que se concluyó que dicha calidad fue satisfactoria para el período analizado. En cuanto al comportamiento espacial, solo se detectó que el níquel presenta concentraciones diferentes por estación de monitoreo, mientras que para el resto de los metales no existe diferencia significativa. En el comportamiento temporal, se estableció que el Pb, Cd, Cu y Cr presentan concentración diferente entre las estaciones del año, mientras que el Ni no presenta diferencia significativa en su concentración a lo largo del año analizado. Se identificó mediante una línea de tendencia de tipo polinomial, que para el cobre existe una correspondencia significativa entre la variación de la concentración de este metal y el tiempo. En el estudio se recomiendan acciones específicas respecto del muestreo y control de calidad, pero de manera relevante se recomienda la elaboración e implementación de un programa ejecutivo de calidad del aire que considere por un lado garantizar la calidad de los datos y por el otro una estructura operativa que permita detectar los eventos de riesgo a la salud (contingencias) y la ejecución oportuna y eficaz de acciones de control por las distintas instancias involucradas.

ABSTRACT

Considering the fact that healthy levels of air quality is a fundamental human right and that national and international regulations are in place to enforce such standards, it is mandatory the evaluation, diagnostics and the development of programs to generate the knowledge needed to take the necessary steps to solve air quality problems. The present work studies air quality levels for the City of Hermosillo, in the state of Sonora in Mexico. It is concerned with total suspended particulates (TSP), and heavy metals (Pb, Cd, Ni, Cu and Cr) in air. The time period analyzed was from the month of June 2001 to the month of May 2002. Data and sampling filters taken by the City of Hermosillo in three sampling stations (Mazón, CESUES and CBTIS) were used for this study. The study was set up to analyze information so that the results would state the concentration levels of TSP and heavy metals in air, the behavior in time and space of those parameters and the relationship between concentration levels and climate. Another part of the study dealt with the evaluation of the operation conditions and data generated by the monitoring network of the city in order to propose recommendations to establish a quality control system in the air monitoring program. The results of the study show that concentration levels of TSP in two out of three monitoring stations were very often greater than $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, levels that are out of compliance. On the other hand, in the three monitoring stations analyzed the concentration of TSP was greater than the yearly maximum allowable limit of $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Based on that information the study concludes that air quality in Hermosillo is characterized as bad or not satisfactory for the period analyzed. The study also shows that there is a spatial but not temporal difference in TSP concentrations, and found correlation between TSP concentration and air temperature. Regarding air concentrations of metals Pb, Cd, Ni, CU and Cr, it was found that they are below the maximum allowable limit or criteria for air quality, concluding that air quality is satisfactory for these parameters for the period. Regarding spatial variability, it was found that only nickel shows significant statistical difference among monitoring stations. Regarding temporal behavior of the concentrations of metals among climate seasons, there was a significant difference in metal concentrations with the exception of Ni. Using a polynomial trend statistical analysis it was found that there is a significant correlation between copper concentrations in air and time. Several recommendations are made regarding sampling and quality control, but most significant is the recommendation to prepare and implement an Air Quality Program, including quality assurance of the data and the design and implementation of a system to assure timely detection of health risks in order to have an efficient emergency response of all the agencies involved.

1. INTRODUCCION

Los seres humanos requieren de un suplemento regular de alimento, agua y esencialmente de un suplemento continuo de aire, los requerimientos de aire y agua son relativamente constantes (10-20 m³ y 1-2 l/día, respectivamente), que toda la gente tenga libre acceso al aire y agua de calidad aceptable es un derecho humano fundamental (WHO, 2003).

A lo largo de la historia, la humanidad ha estado en contacto con los contaminantes atmosféricos, sin embargo a medida que se desarrollaron las grandes ciudades y se consolidó la revolución industrial, la contaminación del aire se ha visto como algo común y cotidiano (Dickson, 1996). El problema de la contaminación del aire no puede encuadrarse como una situación que solo afecta a una región determinada, aunque hay que reconocer que se presenta de manera palpable en las zonas citadinas, existen abrumadoras evidencias sobre los efectos que ocasionan los contaminantes del aire sobre la vida que conocemos sobre el planeta. En adición al daño que el aire contaminado causa al organismo humano, igual lo provoca también de manera severa a los animales y al suelo (Seinfeld, 1978). Cabe señalarse que una agravante de la contaminación atmosférica que presentan las ciudades actuales, tiene como característica principal el hecho de que en ellas se reúnen generalmente todas las clases de fuentes de emisión en diversa proporción. Las emisiones de contaminantes a la atmósfera no solo tienen efectos a nivel local en la salud de las personas o en el estado de sus pertenencias, sino también a nivel regional como es la afectación de los bosques y ecosistemas acuáticos debido a las lluvias ácidas o incluso a nivel mundial, como el cambio climático y la reducción del espesor de la capa de ozono estratosférico (Gobierno del Estado de Baja California, 1999; SEMARNAT, 2003).

En la actualidad se ha desarrollado una sólida base de tecnología para la evaluación de la calidad del aire, sin embargo ha sido el público en general la principal fuerza de advertencia sobre la necesidad de la protección ambiental al tener conocimiento de muchos problemas específicos y localizados de contaminación del aire (Corbitt, 1989). En nuestro país, se ha reconocido por las autoridades ambientales que existen zonas o ciudades con una problemática ambiental crítica en materia de calidad de aire, de tal forma que ha sido necesario como respuesta, el establecimiento de normas en los siguientes temas: Verificación vehicular, niveles máximos de emisión para fuentes móviles, recuperación de vapores de estaciones de servicio, niveles máximos de emisión

para actividades industriales, especificaciones de combustibles y métodos de medición de contaminantes, así mismo se han implementado redes de monitoreo de calidad del aire en varias ciudades de México (SEMARNAT, 2002). Actualmente en México, existen normas de calidad del aire para Partículas Suspensas Totales (PST), Partículas menores a 10 micras (PM10), Monóxido de carbono (CO), Dióxido de azufre (SO₂), Dióxido de nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y Plomo (Pb), las cuales fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 23 de diciembre de 1994.

A nivel nacional, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) publicada en el DOF (1988), en su artículo 110, establece que para la protección a la atmósfera se considerará que la calidad debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país. En Sonora, la Ley 217 del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Boletín Oficial del Gobierno del Estado, 1991) establece en su artículo 72, que para la protección a la atmósfera se considerarán los siguientes criterios: 1.- La calidad del aire deberá ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y en las regiones del Estado; y 2.- Las emisiones de contaminantes de la atmósfera deberán ser reducidas y controladas para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y del Equilibrio Ecológico.

A nivel municipal, en el proyecto de Reglamento de Ecología y Protección al Ambiente del Municipio de Hermosillo, Sonora (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2000), se propone en su artículo 47 que para la prevención y control de la contaminación de la atmósfera en el municipio se considerarán los siguientes criterios: 1.- Que la calidad del aire sea satisfactoria en los asentamientos humanos del municipio de acuerdo a los parámetros fijados por las Normas Oficiales Mexicanas y las Normas Técnicas Complementarias derivadas de ese Reglamento y 2.- Que las emisiones de contaminantes a la atmósfera sean prevenidas, reducidas o controladas para asegurar que la calidad del aire sea satisfactoria para el bienestar de la población, la protección al ambiente y el equilibrio ecológico. Así mismo en el artículo 64 se propone que el Ayuntamiento por conducto de la Dirección de Ecología, establecerá y operará sistemas de monitoreo de la calidad del aire, de conformidad con lo establecido en la Ley General, con el fin de evaluar el estado del aire ambiente de los centros de población de acuerdo a los parámetros señalados en las normas oficiales mexicanas.

En febrero de 1998, el H. Ayuntamiento de Hermosillo a través de la Dirección General de Desarrollo Urbano y Obras Públicas y ésta a su vez vía la Subdirección de Ecología, elabora el Protocolo del Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad

del Aire (PEMCA) en la Ciudad de Hermosillo, Sonora. Este programa presentaba como objetivo general el que mediante la coordinación de los tres niveles de gobierno y otras instituciones se implementara y administrara el PEMCA con el objetivo de conocer los niveles de contaminantes en la atmósfera urbana que afectan la calidad del aire a fin de proponer medidas de prevención y control más adecuadas que signifiquen verdaderas alternativas de solución a la problemática ambiental. La Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP, 1982) informa al Ayuntamiento que considera factible la ejecución del PEMCA y notifica sobre el “Acuerdo de coordinación específico con el objeto de llevar a cabo el programa de gestión y evaluación de la calidad del aire, relativo a la operación de equipo de monitoreo atmosférico”. La SEMARNAP publica el “Acuerdo de coordinación específico que celebran la SEMARNAP y el Estado de Sonora, con el objeto de llevar a cabo el Programa de Gestión y Evaluación de la Calidad del Aire, relativo a la operación de equipo de monitoreo atmosférico en los municipios de Agua Prieta, Cajeme, Cananea, Hermosillo, Naco, Nacozari de García, Navojoa, Nogales y San Luis Río Colorado, Son.” (DOF, 2000), En este acuerdo los municipios establecen que en beneficio de la población tienen interés en realizar las acciones necesarias que procuren el mejoramiento ambiental y ecológico de sus circunscripciones territoriales y, en especial, las encaminadas a la prevención y control de la contaminación del aire causada por la emisión de gases, humos y polvos. En este acuerdo, los tres niveles de gobierno declaran que el acelerado desarrollo de las zonas urbanas, el crecimiento de la población y la planta industrial y de servicios, así como el incremento en el parque vehicular emiten cantidades de humos, polvos y gases que son causa y origen de la contaminación del aire y deterioran su calidad.

El Ayuntamiento de Hermosillo, le ha dado continuidad al PEMCA operando la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad desde el año 2000 a la fecha, a través de tres estaciones de monitoreo y considerando los parámetros de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Partículas Menores a 10 Micras (PM10). Con la finalidad de obtener adicionalmente parámetros físicos y químicos de las muestras, además de las determinaciones gravimétricas; el Ayuntamiento establece compromisos y acuerdos con instituciones de educación e investigación a fin de conjuntamente obtener diagnósticos y estadísticas de varios parámetros de calidad del aire. El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro de estos acuerdos, siendo el compromiso la determinación de la calidad del aire respecto a partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados en

muestras tomadas por la red de monitoreo en sus tres puntos durante el período junio 2001- mayo 2002.

Los objetivos planteados incluyeron la determinación de las concentraciones de PST y los metales plomo, cadmio, níquel, cobre y cromo en el aire ambiente de la Ciudad de Hermosillo, Sonora, la determinación de la calidad del aire basada en dichas concentraciones respecto de criterios o estándares de calidad y un análisis estadístico comparativo del comportamiento espacial y temporal de los resultados de las concentración detectadas para las tres estaciones de monitoreo de la ciudad que son: Centro, CESUES (Noreste) y CBTIS (Noroeste); acotándose el estudio al periodo junio 2001 a mayo de 2002. Adicionalmente se analizó la correspondencia (coeficiente de determinación R^2) entre la variación de la concentración de cada elemento estudiado y algunos parámetros climáticos como la temperatura ambiente, presión, humedad y condiciones de viento. Las metodologías de muestreo y analíticas utilizadas, por la Dirección de Ecología del H. Ayuntamiento de Hermosillo la primera y en el desarrollo de este estudio la segunda, corresponden a las estandarizadas en normas y generalmente utilizadas por las autoridades ambientales como la SEMARNAT en México y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en los Estados Unidos de América (EUA), las cuales se describirán y discutirán mas adelante.

Se requirió el apoyo por parte del H. Ayuntamiento a través del suministro de los datos de muestreo y los filtros usados en ese lapso de tiempo. Como parte de este estudio se realizó la verificación de los valores de peso final de los filtros utilizados durante dicho periodo, los resultados obtenidos indican que las concentraciones promedio anual de PST fueron 140.1, 110.9 y 244.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para las estaciones Centro, Noreste y Noroeste respectivamente, estableciéndose que la calidad del aire se encontraba entre no satisfactoria y mala al rebasarse en diferentes grados el máximo permisible normado en México. El análisis estadístico comparativo, reveló que existe diferencia de los niveles de concentración de PST entre las tres estaciones de monitoreo, y demostró además que no existe diferencia significativa temporalmente, al menos entre las estaciones del año. Por otro lado, se determinó para una de las estaciones de monitoreo un valor de coeficiente de determinación R^2 de 0.52 entre las concentraciones de PST y la temperatura ambiente lo cual indica que existe una correspondencia real entre las variaciones de ambos parámetros.

En relación a los metales en aire, se analizaron un promedio 53 filtros por cada una de las tres estaciones de monitoreo con las que contaba la ciudad, sumando un total

de 795 análisis de metales en dichas muestras. Las concentraciones máximas detectadas de metales en aire ambiente fueron de $0.081 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para plomo, de $0.009 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para cadmio, de $0.027 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para níquel, de $0.218 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para cobre y de $0.028 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para cromo. La calidad del aire respecto de estos metales fue satisfactoria para el periodo de estudio en virtud de que ninguna de las concentraciones detectadas rebasó los máximos permisibles o criterios de calidad seleccionados como indicador de calidad. El análisis estadístico comparativo reveló que solamente existió diferencia de los niveles de concentración de entre las tres estaciones de monitoreo para el níquel, concluyéndose que los demás metales (plomo, cadmio, cobre y cromo) presentan una distribución espacial homogénea; en cuanto a las pruebas de comparación temporal, el resultado fue contrario, o sea, solamente para el níquel se identificó que no existe diferencia entre los niveles de concentración en las cuatro estaciones del año, mientras que para los demás metales se identificó que al menos una estación del año presenta niveles de concentración diferente. Respecto al coeficiente de determinación R^2 , solamente el cobre presentó un valor significativo de 0.58 con la fecha (el tiempo) lo que indica que existe correspondencia entre las variaciones de ambos parámetros bajo una línea de tendencia polinomial de sexto orden.

Otro aspecto importante de la investigación fue identificar las condiciones operativas de las estaciones de monitoreo y de control de calidad de los muestreos que prevalecieron en el periodo de estudio a fin de contribuir mediante la recomendación de estrategias y acciones de mejora.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Realizar una evaluación de la calidad del aire ambiente respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales Pesados (plomo, cadmio, níquel, cobre y cromo) de la Ciudad de Hermosillo, Sonora, México para el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales Pesados en el aire ambiente, en tres estaciones de muestreo en la Ciudad de Hermosillo, Sonora para el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.
- Determinar la calidad del aire en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, mediante la comparación de las concentraciones detectadas contra los máximos permisibles, estándares o criterios de calidad existentes establecidos por la normatividad nacional o extranjera para el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.
- Evaluar mediante análisis estadísticos el comportamiento espacial y temporal de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales Pesados en el aire ambiente de la ciudad, así como determinar la posible relación entre las variaciones de concentraciones de los parámetros estudiados y los elementos climáticos durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.

3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION

3.1 Hipótesis de Trabajo (H1)

La concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales Pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) en el aire ambiente de la Ciudad de Hermosillo, rebasaron los máximos permisibles o estándares dando como resultado una mala calidad del aire para el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.

3.2 Hipótesis de Nulidad (H0)

La calidad del aire en la Ciudad de Hermosillo, Sonora respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales Pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) para el periodo junio de 2001 a mayo de 2002 fue satisfactoria.

4. ANTECEDENTES

4.1 Calidad del Aire

La calidad del aire está determinada por el grado de contaminación que presenta, y el término de contaminación del aire es usado para describir la presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes del aire en cantidades y/o características de duración que pueden ser perjudiciales a, o que tienen interferencia con la salud pública o algún proceso ambiental natural (Canter, 1997). Las características de la calidad inicial o no contaminada del aire seco es presentada en la Tabla 1 (Corbitt, 1989).

Tabla 1. Composición de aire seco no contaminado

Componente	Concentración (ppm)
Nitrógeno	780,800
Oxígeno	209,500
Argón	9,300
Bióxido de Carbono	315
Neón	18
Helio	5.2
Metano	1
Criptón	1
Óxido Nitroso	0.5
Hidrógeno	0.5
Xenón	0.08
Bióxido de Nitrógeno	0.02
Ozono	0.01

Fuente: Corbitt (1989)

4.1.1 Fuentes de Contaminación

Las fuentes generadoras de contaminantes a la atmósfera pueden ser de origen natural o antropogénicas, las primeras consisten en las erupciones volcánicas, los incendios forestales y las quemas agrícolas que pueden representar hasta el 39.9% de las emisiones anuales de macropartículas (Dickson, 1996). Canter (1997), reporta también entre éstas, la emisión de polen de las plantas y las tolveneras. Por otro lado, como parte de las actividades antropogénicas actuales se generan emisiones a la atmósfera a través

de los procesos industriales que generan subproductos gaseosos, los automóviles generan gases de desecho, los procesos de manufactura, la combustión de la basura y las plantas productoras de energía generan gases y humos. En los Estados Unidos de Norteamérica se estima que se liberan más de 200 millones de toneladas de contaminantes atmosféricos al año (Dickson, 1996).

Existen varias formas de clasificación de las fuentes de contaminación del aire, entre las que podemos citar: por número (fuentes simples o múltiples), por área (fuentes fijas o móviles), y lineales (calles o carreteras de tráfico pesado y líneas frontales de incendios forestales), (Canter, 1997).

4.1.2 Tipos de Contaminantes del Aire

Los contaminantes del aire se pueden clasificar en dos grupos: Los *contaminantes primarios* o sustancias directamente vertidas en la atmósfera y que se constituyen por aerosoles (dispersores de partículas sólidas y líquidas), gases (compuestos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, monóxido de carbono y anhídrido carbónico), otras sustancias (metales pesados, sustancias minerales, compuestos halogenados, compuestos orgánicos azufrados, compuestos orgánicos halogenados) y los *contaminantes secundarios* o sustancias que no se vierten directamente a la atmósfera, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas de los contaminantes primarios en el aire, por ejemplo, contaminantes fotoquímicos (oxidantes como ozono y radicales libres activos) y la acidificación (lluvia ácida) a partir de los óxidos de azufre o nitrógeno) www.miliarium.com/proyectos/eia/esia/medioatmosfera.asp. Debido a que el presente trabajo se enfoca al diagnóstico de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) a continuación se describen las características y antecedentes de estudio de estos dos tipos de contaminantes.

4.1.2.1 Partículas. El material particulado en el aire ambiente representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas. La masa y la composición en el ambiente urbano tienden a dividirse en dos principales grupos: partículas gruesas y partículas finas, la barrera entre estas dos fracciones de partículas usualmente se encuentra entre 1 y 2.5 micras. Sin embargo el límite entre partículas gruesas y finas es algunas veces fijado por convención a 2.5 micras en diámetro aerodinámico (PM 2.5) para propósitos de medición. Las partículas más pequeñas contienen los aerosoles formados secundariamente,

partículas de combustión y vapores orgánicos y metálicos recondensados. Las partículas más grandes usualmente contienen materiales terrígenos y polvos fugitivos de caminos e industrias. La fracción fina contiene la mayor parte de la actividad (contaminantes) ácida y mutagénica del material particulado. La contaminación del aire por partículas es una mezcla de sólidos, líquidos o sólidos y partículas líquidas suspendidas en el aire, las cuales pueden variar en tamaño, composición y origen, es por ello conveniente clasificar las partículas por sus propiedades aerodinámicas debido a lo siguiente: a). Estas propiedades gobiernan el transporte y la remoción de partículas del aire; b). Gobiernan su depositación en el sistema respiratorio y c). Son asociadas con la composición química y las fuentes de las partículas. El tamaño de las partículas suspendidas en la atmósfera varía sobre cuatro órdenes de magnitud, desde unos pocos nanómetros hasta decenas de micra (WHO, 2003) tal como se ilustra en la figura 1.

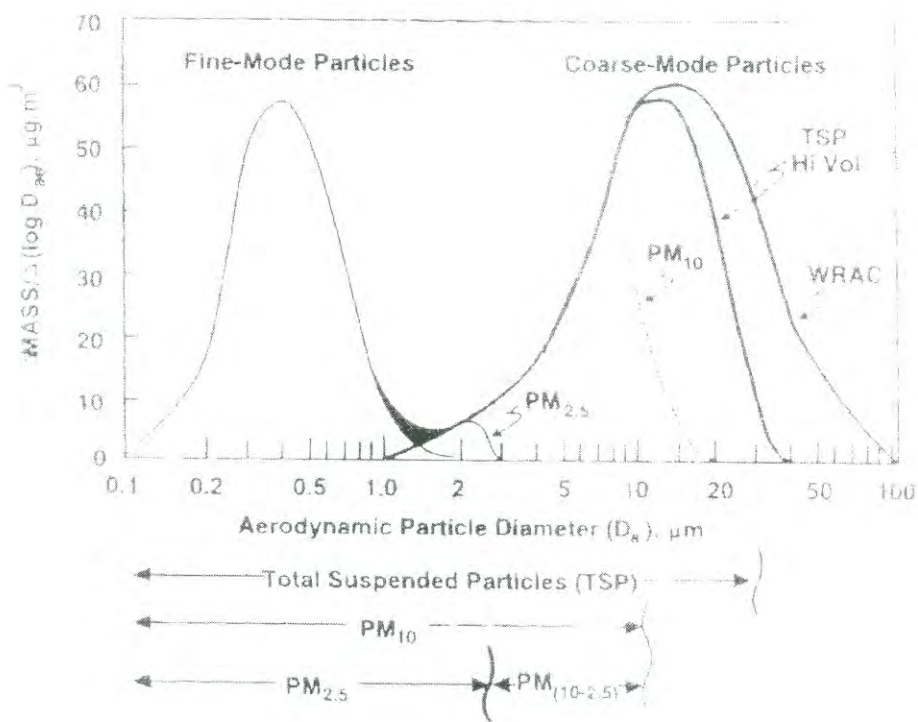


Figura 1. Representación esquemática de la distribución de tamaño de partículas en el aire ambiente (USEPA 1996 - WHO 2000).

En los EUA el material particulado es producido junto con los contaminantes gaseosos del aire, en su mayor parte debido a las actividades industriales. De acuerdo a información del Departamento de Salud, Educación y Bienestar de Estados Unidos, presentada por Dickson, (1996); los porcentajes del total anual de emisiones de macropartículas por las diferentes fuentes es el siguiente: transporte con 4.3%, la combustión de carburantes con el 31.4%, los procesos industriales con el 26.5%, la eliminación de desechos sólidos con 3.9% y diversas con el 33.9% que incluyen incendios forestales, agrícolas y urbanos, así como combustión de desechos. En la Tabla 2 se presentan con mayor detalle las fuentes generadoras de partículas.

En México, la SEMARNAT (2000) a través del Instituto Nacional de Ecología (INE) establece que el sector transporte tiene especial importancia en las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, así como el sector industrial en el bióxido de azufre, mientras que el suelo y la vegetación en la concentración de partículas. De acuerdo a esa publicación los parámetros monitoreados en ciudades mexicanas son los que se presentan en la Tabla 3. Es importante señalar que en cuanto a partículas suspendidas totales (PST), para el Valle de México durante el período reportado (1988-1999), todos los años se determinaron valores máximos para 24 horas que sobrepasaron los $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ llegando inclusive a rebasar los $2,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a principios de los noventas; siendo el máximo permisible de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para la zona metropolitana del Valle de Toluca en el Estado de México, también se tienen valores críticos para el periodo muestreado, ya que de 1996 a 1999 el porcentaje de días que rebasaron la norma fue entre el 20 y 30%, mientras que en cuanto al promedio anual, todos los años se rebasó el máximo permisible que es de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

De acuerdo a la información presentada por INEGI (2000) en donde se considera la información de 1995-1996 del inventario de emisiones por fuente para algunas de las principales ciudades de México, se establece que para la Zona Metropolitana del Valle de México, se emiten 31,854 toneladas por año de partículas, siendo la fuente mayoritaria de aporte las fuentes naturales con un 56.7%.

Para la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, se estimó una emisión anual de 301,784 ton/año de partículas, representando la fuente de suelos y vegetación la mayoritaria con 294,304 ton/año ó 97.5%; para la Zona Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, se estimó una emisión anual de 815,628 ton/año, en donde la principal fuente es igualmente suelos y vegetación, aportando 763,725 ton/año y representando un 93.6% de dicha emisión.

Tabla 2. Fuentes de emisión de partículas.

<i>Fuentes</i>	<i>Porcentaje del total anual de emisiones de macropartículas</i>
TRANSPORTE	4.3
Vehículos de motor (gasolina)	1.8
Vehículos de motor (diesel)	1.0
Ferrocarriles	0.7
Vehículos marinos	0.4
Uso de combustibles del transporte	0.4
COMBUSTIÓN DE CARBURANTES (fuentes estacionarias, plantas de energía, calefacción de espacios industriales, etc)	31.4
Carbón	29.0
Aceite pesado	1.0
Gas natural	0.7
Madera	0.7
PROCESOS INDUSTRIALES	26.5
Refinación y elaboración de hierro y acero	7.3
Refinación y elaboración de otros metales	0.4
Cemento	3.1
Roca, arena y grava	3.1
Transferencia y almacenamiento de grano	2.8
Pulpa y papel	2.5
Procesamiento de asfalto	1.9
Cal	1.6
Molienda de harina y alimentos	1.1
Roca fosfática	0.7
Purificación del carbón	0.6
Otros procesamientos de minerales	0.6
Refinerías de petróleo	0.4
Otras industrias químicas	0.3
Otras	0.1
ELIMINACIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS	3.9
DIVERSAS	33.9
Incendios forestales	23.7
Quemas agrícolas	8.4
Combustión de desechos de carbón	1.4
Incendios urbanos	0.4

Fuente: Dickson (1996).

Tabla 3. Parámetros de calidad del aire monitoreados en México

Parámetro	Zona o Ciudad (Periodo)						
	Valle de México (1988-1999)	Guadalajara (1994-1999)	Monterrey (1993-1998)	Valle de Toluca (1994-1999)	Ciudad Juárez (1996-1999)	Tijuana (1997-1998)	Mexicali (1997-1998)
PST	✓			✓			
PM10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ozono	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bióxido de Azufre	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Monóxido de Carbono	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bióxido de Nitrógeno	✓	✓	✓	✓		✓	✓

Fuente: SEMARNAT (2000).

Para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca se calculó una emisión anual de 123,375 toneladas al año, en donde la principal fuente emisora corresponde a suelos y vegetación con una emisión de 119,711 ton/año que representa el 97.0% de este parámetro, finalmente para Cd. Juárez, Chihuahua se estimó una emisión de 46,607 ton/año de partículas, de las cuales el 96.7% (45,096 ton/año) son emitidas por la fuente de suelos. En todas estas localidades el inventario de emisiones considera partículas, bióxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y plomo; y las fuentes emisoras consideradas son industria, generación de electricidad, servicios, transporte, fuentes naturales (suelos y vegetación o solamente suelos). Cabe señalarse que en cuanto a la emisión de plomo, solo es considerado en tres zonas y solamente en una fuente emisora que es el transporte.

Para la Ciudad de Hermosillo, Sonora, la SEMARNAP (hoy SEMARNAT), a través de la Delegación Federal en el Estado de Sonora emitió en agosto de 1996 el Reporte de concentración de partículas en aire ambiente para la ciudad de Hermosillo, Sonora, México durante el periodo 1990-1995. En este reporte se incluyen cuatro estaciones de monitoreo, de las cuales en tres se muestreaban PST y en dos PM10. Como se aprecia en la Tabla 4, según los resultados obtenidos de 1990 a 1995 y de acuerdo a los máximos permisibles vigentes, solamente en una estación durante 1994, no se rebasó el máximo permisible de 24 hrs que es de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero si fue rebasado en los demás años, mientras que el máximo permisible anual que es de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio aritmético anual fue rebasado en todas las estaciones durante todos los años analizados.

Mas recientemente en la Ciudad de Hermosillo se ha venido desarrollando el programa de monitoreo (PEMCA) de manera mas permanente con la participación directa del H. Ayuntamiento de Hermosillo, contándose con información de monitoreos a partir del año 2000 a la fecha para PST y PM10, sin embargo los resultados no han sido publicados oficialmente ni analizados a detalle. El H. Ayuntamiento mediante la Dirección de Desarrollo Urbano y Obras Públicas y la Subdirección de Ecología elaboró los Reportes Técnicos Anuales correspondientes a 2001 y 2002, ambos documentos presumiblemente fueron entregados a la Delegación de SEMARNAT en el estado, sin embargo a la fecha no existe la divulgación de los resultados oficialmente a nivel local, ni aparecen integrados en el Sistema Nacional de Información Ambiental.

Tabla 4. Resultados de partículas suspendidas totales (PST) para tres estaciones de muestreo en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, en el período 1990-1995

	AÑO	Estación CESUES	Estación MAZON	Estación SEMESON
% logrado de días de muestreo		48.63	51.09	36.72
Concentración promedio mas alta en 24 hrs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1990	760.0	346.0	--
	1991	648.0	479.4	920.6
	1992	528.0	601.8	983.0
	1993	457.6	266.9	760.3
	1994	273.8	285.0	245.5
	1995	273.5	701.1	719.9
Concentración promedio anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1990	307.1	151.0	--
	1991	481.1	198.8	493.0
	1992	366.8	229.3	565.2
	1993	250.6	148.8	304.1
	1994	152.7	142.4	133.4
	1995	126.6	150.8	331.8

Fuente: SEMARNAP (1996).

Existe en la versión de consulta (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003) del proyecto de Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Hermosillo, Sonora 2003 (Generación 2025+), la presentación de las gráficas de concentraciones de PST y PM10 que incluyen las tres estaciones de monitoreo y su comparación gráfica con el máximo permisible diario; en la de PST, aunque está en escala de tiempo mensual, se identifica claramente que para la estación noroeste (ubicada en el CBTIS No. 206) se rebasa muy frecuentemente el máximo permisible de 24 horas de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que las estaciones noreste (ubicada en el CESUES) y la centro (ubicada en el edificio antes Mazón y ahora FAMSA) solo rebasa este máximo esporádicamente; en dicho documento no se presentan los valores de concentración, sin embargo, es claro establecer con las gráficas que los promedios anuales de las tres estaciones también rebasarían el máximo permisible anual de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.1.2.2 Metales Pesados. La WHO (2000a), considerando criterios medioambientales de salud publicó en sus guías de calidad del aire, los valores guía para 35 contaminantes del aire, de los cuales, 16 son contaminantes orgánicos, 3 son contaminantes de aire en interiores, 4 son los contaminantes clásicos (NO_2 , O_3 , Partículas y SO_2) y 12 son contaminantes inorgánicos y entre ellos los siguientes metales: arsénico, cadmio, cromo, plomo, manganeso, mercurio, níquel, platino y vanadio.

Se ha considerado como fuente de metales (principalmente del plomo) a los aditivos de la gasolina y otros hidrocarburos. Fuentes estacionarias como la minería, fundición, incineración de residuos, producción de fierro y acero, manufactura de álcalis y baterías, son las fuentes posibles de estas partículas, tanto por sus chimeneas, como por emisiones fugitivas (Dickson, 1996). Ilyin et al. (2002), reportan que existen diferentes vías naturales de aporte de metales a la atmósfera en escala global, siendo las fuentes las siguientes: partículas de suelo transportadas por el viento, volcanes, spray de sal marina e incendios forestales y que la intensidad de las emisiones naturales dependerán de varios factores ambientales en el tiempo como son la temperatura, la humedad del suelo y la velocidad del viento, y que debido a esto es lógico suponer que hay un ciclo estacional en la intensidad de dichas emisiones.

Considerando que el costo de la presente investigación estuvo directamente relacionada al número de metales a analizar, se consideró prioritariamente el análisis de aquellos metales cuyas concentraciones en el aire ambiente se encontraban reguladas oficialmente, por lo que se decidió evaluar al plomo, el cual está normado en México y en

muchos otros países, así como al cadmio y al níquel, los cuales han sido propuestos ya por la Comisión de las Comunidades Europeas para ser normados y finalmente se consideraron también el cobre y cromo en virtud de que se contaba con el equipamiento para su análisis. A continuación se presentan antecedentes de estos metales.

Antecedentes de plomo en aire ambiente.- Para la mayor parte de Europa las concentraciones de plomo no exceden los 15 ng/m³, pero entre los valores mas altos registrados se tienen 210 ng/m³ en el norte de Italia, 170 ng/m³ en Rumania y 130 ng/m³ en Ucrania (Ilyn et al., 2002). El Municipio de Praga (2003), reporta resultados para su ciudad entre los cuales se establece que los mayores valores de concentración de plomo en aire son de 221.0 ng/m³, mientras que el valor promedio es de 34.6 ng/m³ de un total de 25 mediciones. En un comparativo de tres ciudades realizado por el Departamento de Salud, Educación y Bienestar de Estados Unidos, se determinó que el promedio anual en µg/m³ fue de: 2.0, 3.0 y 3.0 para las ciudades de Cincinnati, Los Angeles y Filadelfia respectivamente (Straub, 1989). En áreas rurales pueden encontrarse niveles de plomo promedio de 0.1 µg/m³, mientras que los niveles típicos en las ciudades son en el rango de 0.5 a 2 µg/m³. Los niveles de cualquier área en particular dependerán del tipo y permanencia de las fuentes de emisión (por ejemplo el tráfico y la operación de industrias), así como de las condiciones de dispersión del área (WHO, 1984). El Gobierno de Chile (2002), en un estudio realizado por el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA) para el periodo entre 1997 y 2000, se obtuvieron valores promedio anual que variaron entre 0.05 a 0.50 µg/m³ en tres estaciones de monitoreo en la ciudad de Santiago de Chile.

A nivel nacional, uno de los programas de calidad de aire más relevantes respecto de datos de plomo en aire, ha sido el llevado a cabo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México conocido actualmente como PROAIRE; este programa reporta valores que decrecen desde 3.0 µg/m³ en 1990 hasta 0.3 µg/m³ en el año 2000 (Gobierno del Estado de México, 2002).

A nivel local, la Delegación Sonora de la SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social) (1993), presentó en el Congreso Internacional Ecológico Sonora 93, datos donde se identifica que en la estación de monitoreo MAZON (ubicada en el centro de la ciudad), los valores detectados de concentración promedio de plomo por día fluctúan de 0.044 a 0.952 µg/m³, mientras que los promedios mensuales para esta misma estación se ubicaron entre 0.1 y 0.7 µg/m³. Para la estación SEMESON (noroeste de la ciudad), los valores de concentración promedio diario se encontraban entre 0.21 y 1.374 µg/m³, y los

promedios mensuales de esa estación fluctuaron entre 0.06 y 0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, finalmente para la estación CESUES (noreste de la ciudad), los valores diarios de plomo se ubicaron entre 0.037 y 0.871 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ encontrándose las concentraciones promedio mensual en el rango de 0.14 y 0.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Antecedentes de cadmio en aire ambiente.- Referente al cadmio, los niveles en el aire ambiente son generalmente bajos con concentraciones promedio a largo plazo que pueden variar desde menores a 0.001 a 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dependiendo del grado de industrialización y la presencia de industrias que emiten cadmio, se ha estimado que los miembros de una población típica, inhalarán generalmente menos de 0.05 $\mu\text{g}/\text{dia}$. Para áreas inusualmente contaminadas, se han estimado valores máximos de hasta 3.5 $\mu\text{g}/\text{dia}$ (WHO, 1984). Por otro lado, los valores promedio detectados de cadmio en el aire ambiente de la Ciudad de Praga (República Checa) se encuentran en 4.18 ng/m^3 , mientras que el valor máximo para esa misma estación es de 67.7 ng/m^3 (Municipio de Praga, 2003). El Gobierno de Chile (2002) reporta promedios mensuales que van desde 0.0005 hasta 0.0045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentraciones de cadmio en lugares de la ciudad de Santiago de Chile, mientras que los promedios anuales fueron entre 0.0010 y 0.0025 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En este mismo estudio, se cita que las concentraciones naturales de cadmio en la atmósfera son de 0.0001 a 0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En México no se identifican antecedentes de monitoreo de este metal en el aire ambiente.

Antecedentes de níquel en aire ambiente.- En cuanto al níquel, la WHO (1984), establece que muy pocos datos han sido reportados sobre este metal en el aire, sin embargo al parecer los niveles en el aire son generalmente menores a 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Valores mayores han sido reportados en el pasado, generalmente asociados con áreas industriales. La concentración típica para un área urbana es de 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la Ciudad de Praga de la República Checa, se llevaron a cabo monitoreos ambientales en los cuales se detectó un valor máximo de 62.8 ng/m^3 y un valor promedio de 10.98 ng/m^3 de níquel de un total de 25 muestreos (Municipio de Praga, 2003). En un estudio realizado por el Gobierno de Chile (2002), se identificó que para tres puntos monitoreados en la ciudad de Santiago, las concentraciones promedio mensuales de níquel fluctuaron de 0.0025 a 0.024 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que los promedios anuales se ubicaron entre 0.0050 y 0.025 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo 1997–2000. En México no se identifican antecedentes de monitoreo de este metal en el aire ambiente.

Antecedentes de cobre en aire ambiente.- Barceloux (1999), reporta que la concentración de cobre en la atmósfera se encuentra en el rango de 5 a 200 ng/m³. Las emisiones de cobre en la atmósfera representan solo el 0.4% del total liberado al medio ambiente y provienen de emisiones de fuentes naturales (tolvaneras, actividades volcánicas, incendios forestales) y fuentes antropogénicas (producción de metales no ferrosos, fundidoras de cobre, producción de fierro y acero e incineradores municipales). De manera general los procesos de combustión producen emisiones de cobre en forma de pequeñas partículas (<1 um) de óxidos y cobre elemental, mientras que el liberado en material particulado (como el de tolváneras) se presenta en partículas mas grandes (<10 um) de compuestos de cobre (carbonatos, óxidos y sulfatos). El Municipio de Praga, (2002) reporta un valor máximo de concentración de cobre en aire ambiente de 309.0 ng/m³ y un valor promedio de 138.96 ng/m³ considerando un total de 24 muestras. En el estudio del Gobierno de Chile (2002), realizado en la ciudad de Santiago de Chile se identificaron concentraciones promedio mensual entre 0.025 y 0.250 µg/m³ de cobre en aire. En México no se identifican antecedentes de monitoreo de este metal en el aire ambiente.

Antecedentes de cromo en aire ambiente.- La WHO (1984), estableció que existe sólo una limitada cantidad de información en los niveles de cromo en el aire. Los valores reportados sugieren que concentraciones medias en el aire en ciudades son típicamente alrededor de 0.02 µg/m³. Sin embargo en áreas altamente industrializadas, se han reportado concentraciones veinte veces mayores a este valor. La mayor parte del cromo en el aire está en forma de finas partículas de las cuales alrededor de la mitad de aquellas inhaladas serán depositadas en el tracto respiratorio. Basado en un volumen diario de respiración de 22.8 m³ y un 50% de retención alveolar, la cantidad diaria depositada en los pulmones será de 0.2 µg. Otra referencia señala que una concentración máxima de 26.2 ng/m³ y una promedio de 3.70 ng/m³ de cromo en aire ambiente fueron detectados en el monitoreo ambiental desarrollado en la ciudad de Praga (Municipio de Praga, 2003). En México no se identifican antecedentes de monitoreo de este metal en el aire ambiente.

4.2 Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire

La WHO (2000b), establece que los efectos potencialmente relevantes para la valoración de la contaminación de aire son los siguientes: Efectos agudos: mortalidad diaria, admisiones en hospital por problemas respiratorios y por problemas cardiovasculares, visitas a emergencias por problemas respiratorios y cardíacos, visitas para cuidados primarios por condiciones respiratorias y cardíacas, uso de medicamentos para problemas respiratorios y cardiovasculares, días de actividades restringidas, ausencia a trabajo, días perdidos de escuela, automedicación, síntomas agudos y cambios fisiológicos (por ejemplo en la función de los pulmones), Resultados de enfermedad crónica: Mortalidad (en infantes y adultos) por enfermedades crónicas cardio-respiratorias, enfermedades crónicas con incidencia o prevalencia (incluye asma), Cambios crónicos en el funcionamiento fisiológico y cáncer pulmonar, Resultados reproductivos: Complicaciones en embarazo (incluye muerte fetal), bajo peso al nacer, y parto prematuro. Así mismo este documento establece la pirámide de efectos a la salud por contaminación del aire (figura 2).

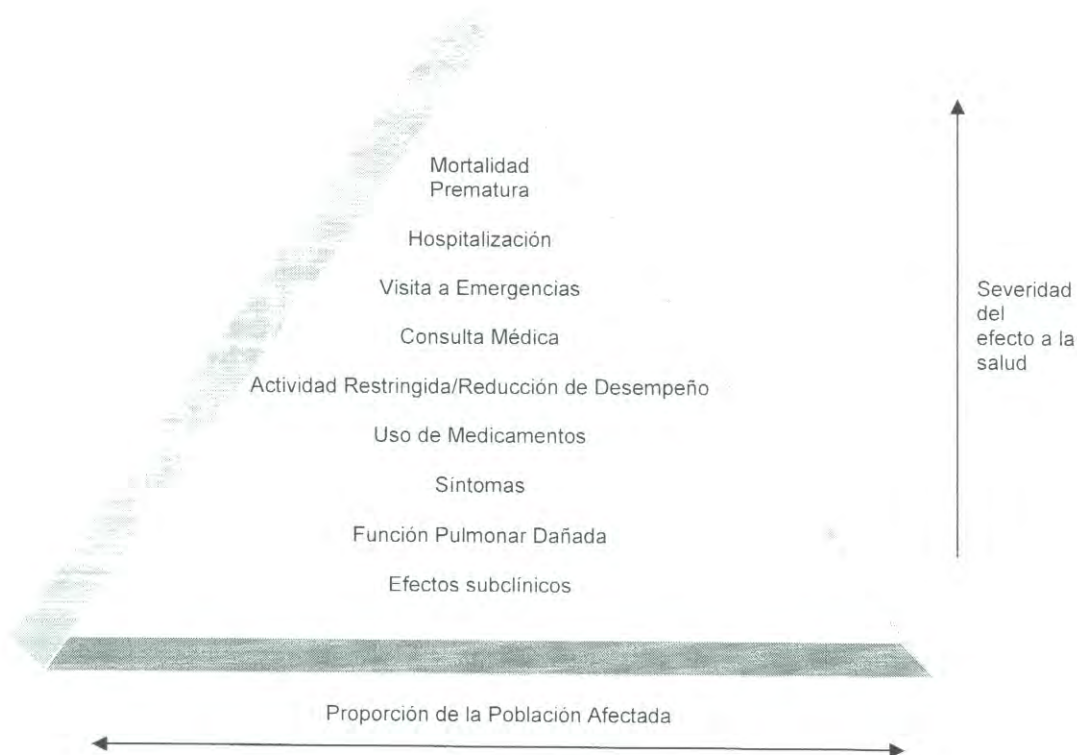


Figura 2. Pirámide de efectos a la salud (WHO, 2000b).

4.2.1 Partículas.

En el hombre, el ingreso de los contaminantes se efectúa principalmente a través de las vías respiratorias y en menor grado por otras rutas, cuyo efecto en la salud dependerá de la edad del individuo, tipo de alimentación, modo de vida, tipo de trabajo desempeñado y el grado de resistencia a las enfermedades (Wark, 1997). La contaminación por material particulado presenta algunos efectos que son muy evidentes al público en general, como son los problemas por disminución de la visibilidad e irritación a lo ojos; pero otros efectos resultado de la interacción con otros elementos son menos obvias, por ejemplo, los efectos adversos de los óxidos de azufre se incrementan con la presencia de material particulado y los problemas respiratorios se verán acelerados para aquellos contaminantes asociados con la inhalación de partículas (Corbitt, 1989).

Es conocido el efecto del material particulado en los problemas de asma, así como otros efectos epidemiológicos y de molestia provocados por las partículas suspendidas en el aire ambiente (Straub, 1989). Existen evidencias de la relación entre el incremento de mortalidad y el incremento de concentración de aerosoles, por ejemplo para EUA, se identificó un incremento entre el 2 y 4% en el nivel de mortalidad cuando la concentración de aerosoles rebasa los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el aire ambiente (Slanina y Zhang, 2004).

4.2.2 Metales Pesados.

En los países en desarrollo, se han detectado problemas mucho mayores por las emisiones tóxicas que en los países desarrollados. Un ejemplo es el uso de las gasolinas con plomo usadas en los primeros, las cuales contribuyen a la contaminación con plomo en áreas metropolitanas, la cual puede causar daño severo y permanente al cerebro e inclusive la muerte. Otro ejemplo es el de la producción de químicos en los procesos industrializados, a la cual está asociada la generación de residuos tóxicos, sobre todo en la rama de químicos orgánicos sintéticos identificados como tóxicos, cancerígenos y mutagénicos (Shen, 1995). Cuando las concentraciones de los contaminantes presentes en el aire rebasan los umbrales permisibles para el hombre, o cuando por una prolongada exposición a los mismos se presenta una intoxicación, los efectos identificados pueden ser los siguientes: alteración en los signos vitales, (temperatura, presión, respiración), coloración y olor anormal de la piel, efectos en el ojo (excesiva contracción o dilatación, conjuntivitis), efectos gastrointestinales (dolor, vómito) y efectos en el sistema nervioso central como convulsión, parálisis o alucinación (Alloway y Ayres, 1993).

4.2.2.1 Efectos a la salud por plomo. El plomo es un metal gris plateado con un punto de fusión de 327.5°C y un punto de ebullición de 1740°C, posee cuatro isótopos y cuatro electrones en su valencia lo cual lo mantiene típicamente en estado de oxidación y la mayor parte de sus sales tienen muy pobre solubilidad en agua. El plomo es un contaminante generalizado en el ecosistema. En la escala global la combustión de aditivos de alkilplomo en los combustibles de motores contribuye a la mayor parte de las emisiones de plomo en la atmósfera lo cual tiene influencia en todos los componentes del medio ambiente. Desde el carbón así como otros muchos minerales, rocas y sedimentos, usualmente contienen bajas concentraciones de plomo, un número de otras actividades industriales como la producción de fierro y acero, fundidoras de cobre y combustiones de carbón deben ser consideradas fuentes adicionales de emisiones de plomo a la atmósfera. La mayor parte del plomo en el aire ambiente está en forma de partículas de tamaño de sub-micras. Entre un 30 a 50 % de esas partículas inhaladas son retenidas en el sistema respiratorio, virtualmente todo este plomo retenido es absorbido por el cuerpo. Partículas en el rango de 1 a 3 micras son eficientemente depositadas en los pulmones; partículas más grandes son depositadas con eficiencia variable, mayormente en el tracto respiratorio superior con una absorción incompleta. La toxicidad del plomo puede ser genéricamente explicada por su interferencia en diferentes sistemas enzimáticos en donde inactiva las enzimas interponiéndose en los grupos de proteínas o desplazando otros iones metálicos esenciales, por lo que muchos órganos o sistemas son potencialmente blancos de este metal. Se incluyen efectos de biosíntesis del sistema nervioso, al riñón y al sistema reproductivo además de efectos a los sistemas cardiovascular, hepático, endocrinal y gastrointestinal. Los niños presentan un grupo de riesgo respecto de los efectos en el sistema nervioso central y han recibido particular atención en estudios relacionados con el plomo y el déficit en el comportamiento neuronal derivado de exposición a niveles de plomo en el ambiente (WHO, 2000b).

4.2.2.2 Efectos a la salud por cadmio. El cadmio es un metal suave, dúctil de color blanco o plateado que posee puntos de fusión y ebullición relativamente bajos (320.9 y 765°C) y una presión de vapor relativamente alta. En el aire el cadmio es rápidamente oxidado a óxido de cadmio, sin embargo cuando gases reactivos o vapores como son el dióxido de carbono, vapor de agua, dióxido de azufre, trióxido de azufre o ácido clorhídrico están presentes, los vapores de cadmio reaccionan para producir carbonato de cadmio, hidróxido, sulfuro, sulfato o cloratos, respectivamente; esos compuestos pueden ser

formados en las chimeneas y emitidos al ambiente. Debido a que el cadmio posee un excepcionalmente largo período de vida media, repercute en una acumulación del metal virtualmente irreversible en el cuerpo a lo largo de la vida; por ejemplo en la sangre más del 90% del cadmio es encontrado en las células. Los dos sitios más importantes de almacenamiento de cadmio en el cuerpo son el hígado y los riñones (WHO, 2000b). Exposiciones en corto plazo a concentraciones moderadas (200-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de humos de cadmio durante menos de 1 hora puede causar síntomas como fiebre, usualmente con una completa recuperación en unos cuantos días. Una exposición más intensa o prolongada puede generar una pneumonitis con muerte en un 15 a 20 % de los casos. Algunos efectos respiratorios crónicos consistentes en bronquitis, obstrucción de pulmón o enfisema han sido sufridos en el pasado por trabajadores altamente expuestos al cadmio. El riñón es el órgano crítico después de una exposición de largo plazo tanto ambiental como ocupacional al cadmio. En 1993, la International Agency for Research on Cancer (IARC) clasificó al cadmio y compuestos de cadmio en el grupo 1 de cancerígenos humanos (WHO, 2000b).

4.2.2.3 Efectos a la salud por níquel. Es un metal duro de color blanco plateado, presenta varias formas de compuestos debido a sus estados de oxidación, el ión bivalente parece ser el más importante tanto para sustancias orgánicas e inorgánicas, pero la forma trivalente puede ser generada por reacciones redox en la célula, los compuestos de níquel que son prácticamente insolubles en agua incluyen carbonato, sulfuros y óxidos; además pueden ser disueltos en fluidos biológicos (WHO, 2000b). Las fuentes de níquel pueden ser la corteza terrestre, el agua (dulce o marina), meteoritos, suelos agrícolas, el carbón y el petróleo crudo, y algunos productos comerciales como los minerales sulfatados y los óxidos de silicatos. El minado y refinación del níquel, la producción de acero y de otras aleaciones, así como el niquelado y la incineración de combustibles y residuos municipales contribuyen con cerca del 90 % de la emisión total global estimada (WHO, 2000b). Las principales rutas de exposición a los humanos es por inhalación, ingestión y absorción a través de la piel. Se ha registrado que debido a una inhalación aguda de carbonyl níquel se genera daño severo a los pulmones. Se han reportado efectos renales reversibles, dermatitis alérgica, irritación de la mucosa y asma después de la exposición a compuestos inorgánicos de níquel; los efectos renales y la dermatitis presumiblemente se relacionan tanto con la inhalación y la ingestión de níquel y la dermatitis se relaciona al contacto cutáneo (WHO, 2000b). Hay evidencia de que el níquel está incrementando las

alergias en la población en general, especialmente en mujeres. Cerca del 2% de los hombres y el 11% de las mujeres muestran una reacción positiva a la piel en una prueba de un parche de sulfato de níquel. El tracto respiratorio es también un órgano blanco para manifestaciones alérgicas por exposiciones de níquel, El asma alérgica ha sido reportada en trabajadores de la industria del plateado o niquelado después de una exposición al sulfato de níquel (WHO, 2000b).

4.2.2.4 Efectos a la salud por cobre. El cobre es un irritante en el sistema respiratorio produciendo además irritación en la mucosa de la boca, ojos y nariz. Una alta inhalación de polvo de cobre puede causar perforación del septum nasal. La fiebre de humo de metales (fiebre, resfriados, mialgias, dolor de cabeza, malestar, garganta seca) puede resultar por la inhalación de humos de operaciones de fundido de cobre. Sin embargo este tipo de enfermedades no es muy común debido a las altas temperaturas necesarias para producir humos de cobre. Ni la IARC (International Agency of Research on Cancer) ni el Programa Toxicológico de Estados Unidos han listado al cobre o sus compuestos como cancerígeno (Barceloux, 1999).

4.2.2.5 Efectos a la salud por cromo. El cromo es un metal duro y gris más comúnmente encontrado en estado trivalente en la naturaleza, los compuestos de cromo hexavalente son encontrados en pequeñas cantidades. El cromato de hierro (FeOCr_2O_3) es el único mineral que contiene una cantidad significativa de cromo. El cromo en el aire puede originarse por la erosión eólica de superficies, arcillas y muchos otros tipos de suelo. Entre los efectos a los humanos, se han registrado úlceras, reacciones corrosivas en el septum nasal, dermatitis aguda y alergias entre sujetos expuestos a compuestos de cromo (VI). Necrosis del riñón han sido reportados, iniciando con necrosis tubular así como necrosis difusa del hígado y subsecuente pérdida de estructura. Se ha reportado que en la ingestión de compuestos de cromo VI resultan en un sangrado gastrointestinal proveniente de úlceras en la mucosa intestinal. En humanos han sido reportados efectos sistémicos en las vías respiratorias así como en el sistema cardiovascular hígado y riñón. En el riñón altas dosis de cromatos inducen necrosis. Existe suficiente información sobre el riesgo de cáncer en órganos respiratorios por la exposición a cromatos (WHO, 2000b).

4.3 Máximos Permisibles de Calidad del Aire

Los máximos permisibles son valores de concentración para compuestos o elementos contaminantes, que han sido establecidos para garantizar que mientras las condiciones ambientales se encuentren por debajo de éstos, no existe riesgo a la salud de la población. Idealmente los límites que establecen las normas deberían estar basados en estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición tanto en animales como en los seres humanos, que identifiquen los niveles del contaminante que son capaces de causar un efecto negativo en la salud de algún grupo de la población con un cierto margen de seguridad. Sin embargo, en nuestro país debido principalmente a la falta de recursos e infraestructura suficiente para realizar todos los estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición necesarios para fundamentar el establecimiento de estándares de calidad del aire y a la gravedad del problema que se tenía a principios de los años noventas, las normas de calidad del aire mexicanas tuvieron como base fundamental la revisión de normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud y por los Estados Unidos de América (SEMARNAT, 2003).

4.3.1 Partículas

La Comunidad Europea ha establecido en la Directiva 1999/30/CE, entre otros, el límite de partículas en el aire ambiente, el cual queda definido como $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀ en 24 horas y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀ en 1 año civil, a cumplirse como fase 1 para el 1 de enero del 2005 (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1999). A su vez, El Consejo Suizo (Swiss Federal Council, 2000), tiene establecida la ordenanza sobre control de contaminantes del aire 814.318.142.1 en la cual se observa que para partículas en suspensión total el máximo permisible es de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio aritmético anual y que para el 95% de los promedios en 24 hrs en un año la concentración debe ser menor o igual a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La República Checa tiene establecido en su acta No. 211/1991 los valores límite de concentración de contaminantes en el aire, entre los que se encuentra el Material Particulado Suspendido, cuyo máximo permisible diario es de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y su máximo permisible anual es de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Municipio de Praga, 2003). Escocia tiene establecido un máximo permisible de concentración de partículas PM₁₀ de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por día y un máximo permisible de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual a cumplirse el 1 de enero del 2005, y para el 1 de enero del 2010, el máximo permisible promedio anual será de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En EUA, los máximos permisibles han sido publicados como estándares nacionales de calidad del aire o NAAQS (National Ambient Air Quality Standards) por la EPA (1990), y se tiene determinado un máximo permisible de concentración de partículas menores a 10 micras (PM10) de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas y una concentración de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como media aritmética anual. Existe además un máximo permisible de concentración de partículas menores a 2.5 micras (PM2.5), siendo los valores de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio en 24 horas y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la media aritmética anual.

En México, los máximos permisibles de calidad del aire para Partículas Suspensas Totales (PST) y partículas menores de 10 micras (PM10) han sido publicados como Normas Oficiales Mexicanas. Referente al parámetro de PST, el máximo permisible fue establecido en la NOM-024-SSA1-1993 (DOF, 1994), siendo dicho valor de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas en un período de un año y $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual; mientras que para PM10 los valores son de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas en un período de un año y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual, según la NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 1994).

4.3.2 Metales Pesados

4.3.2.1 Máximos permisibles para plomo. La Organización Mundial de Salud (WHO, 2000a) establece en su segunda edición de las Guías de Calidad del Aire para Europa, que para el plomo el máximo permisible sea de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio anual.

La comunidad europea estableció en su directiva 82/884/CEE (DOCE, 1982) el valor límite para plomo de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero posteriormente se redefinió un máximo de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como valor límite anual para la protección de la salud humana (DOCE, 1999); estableciendo un margen de tolerancia del 100% a la entrada de esta directiva, reduciendo a partir del 1 de enero de 2001 y cada doce meses un porcentaje anual para lograr el 0% para el 1 de enero del 2005 o para el primero de enero del 2010 en los puntos colindantes de fuentes de las cuales la comisión deberá ser notificada, en estos casos el valor límite a cumplir el 1 de enero de 2005 será de $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este mismo instrumento se establece las concentraciones umbrales para protección de la salud, siendo el umbral superior del 70% del máximo permisible ($0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el umbral inferior del 50% del máximo permisible ($0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

El Consejo Suizo (Swiss Federal Council, 2000), tiene establecido en su ordenanza 814.318.142.1 un máximo permisible de $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio aritmético anual para plomo. La República Checa estableció en su acta No. 211/1994 de control de la contaminación del aire, un máximo permisible de plomo en el aire de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Así mismo establece un margen de tolerancia de $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el año 2001 y los umbrales para protección a la salud fueron: El alto de $0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el bajo de $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$; siendo la fecha de cumplimiento el 1 de enero de 2005.

De acuerdo a información de la base de datos de la Agencia Ambiental Europea denominada STAR (<http://star.eea.eu.int/default.asp>), existe como regulación del Ministerio de Naturaleza Uso y Protección Ambiental un valor límite de $0.0003 \text{mg}/\text{m}^3$ de plomo en aire ambiente según el documento de regulación GOST 17.2.3.01-86 de 1986. Así mismo, dicha base de datos establece que el Ministerio de Salud de Rusia, cuenta con la regulación de $0.0015 \text{mg}/\text{m}^3$ de dicho metal en aire como estándar máximo permisible para períodos de 20 a 30 minutos por una sola vez, establecida en 1989; este mismo organismo cuenta con un valor límite establecido de $0.001 \text{mg}/\text{m}^3$ de plomo para un período de 24 horas y un valor límite de $0.0006 \text{mg}/\text{m}^3$ para un período mensual.

El Gobierno de Chile (2001), implementó la norma de calidad primaria para plomo en aire que define el nivel de calidad primaria anual para plomo en el aire en $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y define la concentración anual de plomo como la media aritmética de los valores efectivamente medidos de concentración mensual por filtro o concentración mensual por compuesto en cada estación de monitoreo en un año calendario. Establece que se considerará rebasada la norma cuando el promedio aritmético de los valores de concentración anual de dos años sucesivos supere el nivel de la norma en cualquier estación de monitoreo. Establece también que se considerará rebasada la norma si la concentración anual correspondiente al primer periodo anual contado desde su entrada en vigencia, es superior en mas del 100% al nivel de la norma en cualquier estación de monitoreo.

En los Estados Unidos de América, existe la normativa conocida como estándares nacionales primario y secundario de calidad de aire para plomo, siendo el máximo permisible de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio trimestral (CFR 40, 1992).

En México, respecto a metales en aire, actualmente solo existe un máximo permisible para plomo y fue establecido en la NOM-026-SSA1-1993, correspondiendo a un valor de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en un período de tres meses promedio aritmético (DOF, 1994).

4.3.2.2 Máximos permisibles para cadmio. La WHO (2000a), en su segunda edición de las Guías de Calidad del Aire para Europa, define que para el cadmio el máximo permisible sea de 5 ng/m^3 en un promedio anual.

La CEC (Comission of the European Communities, 2003), en su propuesta 2003/0164 para establecer la determinación del requerimiento de cumplir con umbrales de evaluación para el monitoreo en aire ambiente de arsénico, cadmio, mercurio, níquel e hidrocarburos aromáticos policíclicos, a fin de que a mas tardar el 31 de diciembre de 2008, se cuente con información estadística de estos elementos, propone un valor para cadmio de 5 ng/m^3 en promedio anual.

La ordenanza 814.318.142.1 del Consejo Suizo (Swiss Federal Council, 2000) tiene establecido un máximo permisible de 10 ng/m^3 para cadmio en promedio aritmético anual. El Gobierno de la Republica Checa estableció un máximo de $0.01 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ de concentración de cadmio como el máximo permisible de calidad del aire para un período anual. Así mismo establece un máximo permisible de $0.005 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, un margen de tolerancia de $0.003 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ para el año 2001 y los siguientes umbrales para protección al ecosistema: Alto de $0.003 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ y bajo de $0.002 \text{ } \mu\text{g/m}^3$; siendo la fecha de cumplimiento el 1 de enero de 2005.

Según información de la base de datos STAR de la Agencia Ambiental Europea (<http://star.eea.eu.int/default.asp>), existe la guía estándar de calidad del aire para cadmio de 0.00005 mg/m^3 promedio en 24 horas establecido en el estándar técnico de la Asociación de Ingenieros Alemanes VDI 2310 guía para estándares de calidad del aire; en esta misma base de datos aparece otra regulación para cadmio según el Ministerio de Naturaleza Uso y Protección Ambiental que establece un valor límite de 0.0003 mg/m^3 ; otra regulación por parte del Ministerio del Medio Ambiente de Eslovenia también aparece en la base de datos y establece un valor límite de $0.02 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en una media anual. En México no existe actualmente normatividad sobre calidad del aire para este metal.

4.3.2.3 Máximos permisibles para níquel. La república Checa estableció como máximos permisible en aire ambiente una concentración de $0.02 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, un valor de tolerancia de $0.016 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ para el año 2001, y los umbrales superior e inferior de 0.014 y $0.01 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ respectivamente para protección del ecosistema a cumplirse para el 1 de enero de 2010.

La CEC (Commission of the European Communities, 2003), en su propuesta 2003/0164 establece los umbrales de evaluación para el monitoreo en aire ambiente de arsénico, cadmio, mercurio, níquel e hidrocarburos aromáticos policíclicos, a fin de que a mas tardar el 31 de diciembre de 2008, se cuente con información estadística de estos elementos. En la propuesta se incluye un valor umbral para níquel de 20 ng/m³ en promedio anual.

En la base de datos STAR de la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2004), aparece registrado por parte del Ministerio de Naturaleza Uso y Protección Ambiental, un valor límite de 0.001 mg/m³ para níquel como regulación de control de calidad del aire para áreas pobladas; también aparece la regulación del Ministerio de Salud de Rusia que establece un valor límite de 0.003 mg/m³ de níquel para un período de 24 horas, un valor límite de 0.0015 mg/m³ promedio mensual y un valor límite de 0.001 mg/m³ promedio anual. En ésa misma base de datos, aparece la guía del Gobierno de Lituania de concentración máxima permisible de contaminantes en el aire en áreas residenciales, que establecen un valor límite de 0.001 mg/m³ promedio diario como concentración de níquel en aire ambiente (<http://star.eea.eu.int/default.asp>).

En México no se cuenta con ninguna norma que regule la concentración de níquel en aire ambiente.

4.3.2.4 Máximos permisibles para cobre. La Agencia Ambiental Europea tiene en su base de datos (STAR) registrado el estándar de calidad de aire ambiente para cobre con un valor límite de 0.002 mg/m³ según la regulación establecida en el documento GOST 17.2.3.01-86 de protección a la naturaleza, medio ambiente-regulaciones de control de calidad del aire para áreas pobladas de 1986. (<http://star.eea.eu.int/default.asp>). En México no se cuenta con normatividad de calidad del aire respecto de cobre.

4.3.2.5 Máximos permisibles para cromo. La Agencia Ambiental Europea, tiene en su base de datos STAR registrado el estándar de calidad de aire ambiente para niveles de cromo en áreas residenciales, con un valor límite de 0.0015 mg/m³ promedio diario según la guía establecida por el Gobierno de Lituania para la concentración máxima permisible en el aire en áreas residenciales (<http://star.eea.eu.int/default.asp>).

En México no existe ninguna norma ambiental que establezca máximos permisibles de este metal en el aire ambiente.

4.3.3 Índices de Calidad del Aire

El cumplimiento de los máximos permisibles puede ser también evaluado a través de los índices de contaminación del aire ó índices de calidad del aire y que representan una combinación matemática de las concentraciones de los contaminantes del aire que nos aporta una medición numérica aproximada de la calidad del aire en un momento dado. Estos índices tienen poca base científica pero han sido utilizados para informar al público (de un modo cualitativo) sobre el grado de contaminación presente en un determinado momento. Es recomendable que la medición de concentraciones de contaminantes sea usada por todos los servicios de información, cuando sea posible con referencias simultáneas para esas concentraciones que sean consideradas por las autoridades de salud y que impliquen peligros a la salud humana (IUPAC, 1997), a continuación se describen algunos ejemplos de éstos:

Air Quality Index (AQI) representado por la ecuación: $AQI = \sum_{i=1}^3 W_i * I_i$ donde I_1 = subíndice de CO estimado, I_2 = subíndice TSP estimado, I_3 = subíndice SO₂ estimado y W_i = Peso asignado al tipo de contaminante I . Si el valor de calidad del aire es 25 o menos, la calidad es considerada relativamente buena, si el valor está entre 26 y 50 la calidad es considerada buena (aunque pueden haber efectos en personas sensibles). Si el valor se ubica entre 51 a 100 la calidad es pobre (puede haber efectos adversos de corta duración en humanos y animales o causar daños significativos a la vegetación y a las propiedades), un valor de más de 100 se clasifica como calidad muy pobre y puede causar efectos adversos a una gran proporción de aquellos que estén expuestos (www.atl.ec.gc.ca/aiquality/whatis_index_e.html).

Mitre Air Quality Index (MAQI) representado por la ecuación $MAQI = \sqrt{\sum_{i=1}^5 I_i^2}$ donde I_i = subíndice de calidad del aire para el contaminante i . (www.adb.org/Documents/Books/dev_env_statistics/appendix.pdf)

El *Indice de Calidad del Aire (ICAIRE)*, que toma los valores de 0 a 100 y es representado por la ecuación $ICAIRE = K C_i P_i / P_i$, donde: C_i : Valor porcentual asignado a los parámetros, P_i : Peso asignado a cada parámetro, K : Constante que toma los siguientes valores 0.75 para aire con ligero olor no agradable 0.50 para aire con olor desagradable 0.25 para aire con fuertes olores desagradables y 0.00 para aire con olor insoportable por el ser humano. (www.miliarium.com/Proyectos/EIA/EsIA/medioatmosfera.asp).

Oak-Ridge Air Quality Index (ORAQI), representa la suma ponderada de la contribución de cada uno de los cinco contaminantes principales (SO₂, PST, NO₂, CO y CH) para los que están establecidos estándares y es obtenido por la ecuación: $ORAQI = [3.5 Ci/Cs]^{1.37}$, donde Ci es el valor analítico de la concentración medida y Cs es el valor de la concentración estándar, este índice toma valores desde 0 (aire limpio) a 50 (aire contaminado). La calidad del aire será la calidad mas pobre que resulte en cualquiera de los cinco contaminantes (www.miliarium.com/Proyectos/EIA/EsIA/medioatmosfera.asp).

En Estados Unidos, la EPA desarrolló el *Indice de Estándares de Contaminación* (Pollutants Standards Index, PSI) para proveer exactitud, frecuencia y un fácil entendimiento de los niveles diarios de contaminación del aire. Este índice provee un sistema uniforme de medición de los niveles de contaminación para los contaminantes del aire regulados bajo el Acta de Aire Limpio. Una vez medidos los niveles de contaminación es obtenido el índice y reportado en todas las áreas metropolitanas de los Estados Unidos con poblaciones mayores a 200,000 habitantes. Este índice informa al público en donde la calidad del aire es buena, moderada, insalubre o peor, además el índice está relacionado con efectos en la salud en sus diferentes niveles y describe los pasos de precaución que deberán ser tomados cuando los niveles de contaminación sean insalubres. La EPA utiliza este índice para medir los cinco contaminantes más importantes establecidos por los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente (NAAQS). El índice convierte las concentraciones medidas del contaminante en un número en la escala de 0 a 500, el número más importante en esta escala es 100 debido a que este número corresponde al estándar o máximo permisible establecido en el Acta de Aire Limpio, por lo tanto un índice que exceda el 100 significa que el contaminante se encuentra en el rango de insalubre para un día dado, los intervalos y los términos descriptivos del índice de los niveles de calidad del aire son: de 0 a 50 buena, de 50 a 100 moderada, de 100 a 200 insalubre, de 200 a 300 muy insalubre y arriba de 300 peligrosa. Los intervalos en la escala se relacionan con un efecto potencial a la salud según el tipo de contaminante, cada valor está considerado dentro de un margen de seguridad que basado en el conocimiento actual protege a la población altamente susceptible. La EPA determina el número del índice sobre la base diaria de cada uno de los cinco contaminantes y reporta el más alto de los cinco para cada área metropolitana (EPA, 1994).

En Argentina se ha establecido el *Indice de Calidad Ambiental* (ICA), a fin de evitar que la evaluación de la calidad del aire sea subjetiva si no se efectúa en base a parámetros medibles. Semanalmente se obtiene el índice en función de las lecturas de las

estaciones fijas aplicando una ecuación empírica: $ICA = 0.72 \left(\frac{[MPS]}{[MPS]_s} + \frac{[SO_2]}{[SO_2]_s} + \frac{[NOx]}{[NOx]_s} + \frac{[Pb]}{[Pb]_s} + \frac{[CO]}{[CO]_s} \right)^{3.5}$ donde: [MPS] = Concentración de material particulado en suspensión, [SO₂] = Concentración de dióxido de azufre, [NOx] = Concentración de óxidos de nitrógeno, [CO] = Concentración de monóxido de carbono, [Pb] = concentración de plomo, los subíndices "s" indican Concentración Standard (máximo permisible). En este caso, solo se evalúa la calidad del aire en función de MPS, SO₂ y NOx, suponiendo que los otros contaminantes están presentes en sus valores standard. De este modo, la expresión queda: $ICA = 0.72 \left(\frac{MPS}{100} + \frac{[SO_2]}{0.03} + \frac{[NOx]}{0.05} + 2 \right)^{3.5}$ cuyo resultado varía entre 0 y 500. De este modo, se tiene la siguiente escala comparativa: de 0 a 100 Muy Bueno, de 100 a 200 Bueno, de 200 a 300 Regular, de 300 a 400 Malo y de 400 a 500 Crítico. (www.saneamiento.mendoza.gov.ar/ica.htm).

En México, el *Índice Metropolitano de la Calidad del Aire* (IMECA), se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud, dentro de una región determinada. El IMECA consta de dos algoritmos de cálculo fundamentales; el primero, para la obtención de subíndices correspondientes a diferentes indicadores de la calidad del aire; y el segundo, para la combinación de éstos en un índice global. El primero involucra la utilización de funciones segmentadas basadas en dos puntos de quiebre principales. Estos puntos fueron obtenidos a partir de los criterios mexicanos de la calidad del aire, así como de niveles para los que ocurren daños significativos a la salud. Al primero se le asignó el valor de 100 y al segundo el de 500; entre estos dos puntos se definieron tres más, cuyo objetivo es clasificar el intervalo en diferentes términos descriptivos de la calidad del aire. La función principal del IMECA es mantener informada a la población sobre la calidad del aire en la Ciudad de México, así como observar el comportamiento de los distintos contaminantes y comparar la calidad del aire entre zonas que utilicen índices similares ([www.sima.com.mx/valle de mexico /quees imeca.htm](http://www.sima.com.mx/valle%20de%20mexico/quees_imeca.htm)).

En la tabla 5 se presentan los puntos de quiebre del IMECA y en la tabla 6 se presenta la calificación y los efectos asociados a la salud dependiendo de los diferentes niveles, así como recomendaciones o medidas de tipo preventivo.

Tabla 5. Puntos de quiebre para valores IMECA (Índice Metropolitano de Calidad del Aire).

IMECA	PST (24hr.) µg/m ³	PM10 (24hr) µg/m ³	SO ₂ (24hr.) ppm	NO ₂ (1 hr.) ppm	CO (8 hr) ppm	O ₃ (1 hr.) ppm
100	260	150	0.13	0.21	11	0.11
200	546	350	0.35	0.66	22	0.23
300	627	420	0.56	1.1	31	0.35
400	864	510	0.78	1.6	41	0.48
500	1000	600	1.00	2.00	50	0.60

Fuente: INEGI, 2000.

Tabla 6. Efectos asociados a la salud.

IMECA	CALIDAD DEL AIRE	EFFECTOS
0-50	Buena	
51-100	Satisfactoria	No se presentan efectos negativos en la salud
101-200	No Satisfactoria	Irritación de la conjuntiva o dolor de cabeza. Se reactivan los síntomas de los enfermos del corazón o de los pulmones.
201-300	Mala	Niños, ancianos y fumadores presentan trastornos del aparato respiratorio y cardiovascular. Lactantes, ancianos y fumadores pueden presentar, además de las molestias anteriores, alteraciones inflamatorias en el sistema respiratorio.
301-500	Muy mala	El resto de la población puede presentar trastornos funcionales en el aparato respiratorio y cardiovascular. Los enfermos crónicos de los pulmones o del corazón reactivan sus padecimientos de base. El resto de la población puede presentar alteraciones inflamatorias en su aparato respiratorio.

Fuente: INEGI, 2000.

4.4 Estaciones y Redes de Monitoreo

El muestreo o monitoreo de los parámetros indicadores de la calidad del aire, debe ser realizado bajo condiciones preestablecidas, que garanticen por un lado la calidad de los datos, y por otro que la información obtenida pueda ser comparada con la obtenida por otros muestreos en diferentes tiempos o en lugares diferentes; con la finalidad de conocer sobre las condiciones para el establecimiento de estaciones y redes de monitoreo. A continuación se presentan algunos ejemplos representativos sobre normatividad desarrollada en este sentido.

4.4.1. A Nivel Internacional

La Comunidad Europea (DOCE, 1999), en su directiva No. 1999/30/EC relacionada a los valores límite para SO_2 , NO_2 , NO , material particulado y plomo en el aire ambiente establece la metodología de localización de los puntos de muestreo para la medición de dichos parámetros en aire ambiente; de acuerdo a consideraciones de escala: Macroescala. *Los puntos de muestreo dirigidos a la protección de la salud deberán ser situados i). Para proveer datos en áreas donde las mas altas concentraciones ocurren y la población está directa o indirectamente expuesta por un período cuyo promedio es significativo respecto de los valores máximos permisibles, ii). Para proveer datos de los niveles en otras áreas dentro de zonas y aglomeraciones que son representativas de la exposición de la población en general. Los puntos de muestreo deberán generalmente estar situados evitando medir pequeños microambientes en sus colindancias. Como guía, un punto de muestreo orientado a determinar calidad del aire respecto de una zona de tráfico vehicular, no deberá ubicarse a menos de 200 m del sitio de interés, así mismo no deberá ser menor de varios kilómetros cuadrados cuando se oriente a caracterizar una zona urbana. Los puntos de muestreo, deberán además, donde sea posible ser representativos de ubicaciones similares no cercanas a su perímetro. Los puntos de muestreo dirigidos a la protección de ecosistemas y vegetación, deberán estar situados a más de 20 kilómetros de aglomeraciones o más de 5 kilómetros de otras áreas construidas, instalaciones industriales o carreteras.*

Microescala.- Las siguientes guías deberán cumplirse hasta donde sea aplicable: el flujo alrededor de la entrada del muestreador no deberá estar restringido por ninguna obstrucción que afecte el flujo de aire en la vecindad del muestreador (normalmente algunos metros desde edificios, balcones, árboles y otros obstáculos en al menos 0.5

metros de la construcción más cercana en el caso de puntos de muestreo que representen la calidad del aire en zonas de edificios; en general la entrada al muestreador deberá estar entre 1.5 metros (zona de respiración) y 4 metros sobre el suelo. Instalaciones más altas pueden también ser apropiadas si la estación es representativa de un área muy grande; la entrada al muestreador no deberá ser posicionada muy cercana a fuentes generadoras, a fin de evitar la toma directa de emisiones no mezcladas con el aire ambiente; la salida del muestreador deberá ser posicionada de tal manera que se evite la recirculación del aire emitido por el muestreador; para la ubicación de muestreadores orientados a áreas de tráfico, cada punto de muestreo deberá estar al menos a 25 metros de la avenida más importante y al menos a 4 metros del centro de la línea más cercana de tráfico. Los siguientes factores deberán ser también tomados en cuenta: fuentes de interferencia, seguridad, acceso, disponibilidad de energía eléctrica y comunicación telefónica, visibilidad del sitio en relación a su entorno, seguridad para el público y operadores, y la posibilidad de ubicar muestreadores para diferentes contaminantes y requerimientos de planeación. También se establecen los criterios para determinar el número mínimo de puntos de muestreo, y está dado por la Tabla 7 para evaluación del cumplimiento con la protección de la salud y por la Tabla 8 para la protección de ecosistemas o vegetación.

Esta normativa considera también los criterios de calidad de los datos y adquisición de los resultados de la evaluación de la calidad del aire, así como el número mínimo de cobertura (Tabla 9).

Tabla 7. Número mínimo de puntos de muestreo para mediciones mixtas para evaluar el cumplimiento con los máximos para la protección de la salud humana y los umbrales de alerta en zonas y poblaciones.

Población (miles)	Si la concentración excede el umbral superior	Si la concentración máxima está entre los umbrales superior e inferior	Para SO ₂ y NO ₂ en poblaciones en donde la máxima concentración está por debajo del umbral inferior
0-250	1	1	No aplica
250-499	2	1	1
500-749	2	1	1
750-999	3	1	1
1000-1499	4	2	1
1500-1999	5	2	1
2000-2749	6	3	2
2750-3749	7	3	2
3750-4749	8	4	2
4750-5999	9	4	2
Mayor de 6000	10	5	3

Para NO₂ y material particulado incluir al menos una estación de fondo urbano y una orientada al tráfico

Fuente: DOCE, 1999.

Tabla 8. Número mínimo de puntos de muestreo para mediciones mixtas para evaluar el cumplimiento con los máximos de protección de ecosistemas o vegetación.

Si la concentración máxima excede el umbral superior	Si la concentración máxima está entre los umbrales superior e inferior
Una estación cada 20,000 km ²	Una estación cada 40,000 km ²

Fuente: DOCE, 1999.

Tabla 9. Criterios de evaluación de la calidad de los datos.

Parámetro	Bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno y óxido de nitrógeno	Material particulado y plomo
Medición continua		
Exactitud:	15%	25%
Mínimo datos de captura:	90%	90%
Indicadores de medición		
Exactitud:	25%	50%
Mínimos datos de captura:	90%	90%
Mínimo tiempo de cobertura:	14% (una medición a la semana al azar, regularmente distribuidas durante el año, u 8 semanas regularmente distribuidas durante el año)	14% (una medición a la semana al azar, regularmente distribuidas durante el año, u 8 semanas regularmente distribuidas durante el año)
Modelación		
Exactitud		
Promedios horario:	50%-60%	
Promedios diarios:	50%	No definida a la fecha
Promedios anuales:	30%	50%
Estimación objetiva		
Exactitud:	75%	100%

Fuente: DOCE, 1999.

Finalmente, la directiva europea establece los métodos de referencia para la evaluación de la concentración de bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, material particulado y plomo. Se establece que el método de referencia para el muestreo de plomo está descrito en el anexo de la directiva 82/864/EEC, mientras que el método de referencia para el análisis de plomo es ISO 9855:1993 Aire ambiente-determinación del contenido de plomo particulado en aerosoles colectados en filtros. Método de espectroscopia de absorción atómica.

En Estados Unidos, se cuenta con la normatividad establecida en la Parte 58 del CFR 40 (1992) que establece la vigilancia de la calidad del aire ambiente. En esta normativa se definen claramente especificaciones, condiciones y requisitos para la instalación y operación de estaciones y redes de monitoreo incluyendo: Previsiones generales, Criterios de Monitoreo, Estaciones locales y estatales de monitoreo del aire (SLAMS), Estaciones nacionales de monitoreo de calidad del aire (NAMS), Índice de reporte de calidad del aire, Monitoreo federal y 7 apéndices explicativos de las condiciones y criterios de esas especificaciones.

Es importante señalar que en los criterios de monitoreo se establecen en la sección de calendario de operación los criterios para los tiempos de muestreo o monitoreo, de donde se puede señalar lo siguiente: para analizadores continuos se obtendrán promedios por hora, exceptuando periodos de mantenimiento rutinario, periodos de calibración y periodos o estacionalidades exceptuados por la administración regional. Para los métodos manuales (exceptuando PM₁₀), al menos una muestra de 24 horas cada seis días excepto por periodos de mantenimiento o estacionalidades exceptuados por el administrador. Para PM₁₀ se establece el monitoreo de acuerdo a la relación que exista entre el estándar (valor límite o máximo permisibles) y la concentración reportada, por ejemplo si la relación entre éstos dos valores es menor a 0.8 o mayor a 1.4 el monitoreo es cada seis días, mientras que si la relación se ubica en los rangos entre 0.8 y 0.9 ó entre 1.2 y 1.4, el monitoreo debe ser cada tercer día y finalmente si la relación se ubica entre 0.9 y 1.2, el monitoreo debe ser diario. A continuación se describen algunos de los elementos señalados en los apéndices de esa normatividad:

Requerimientos de aseguramiento de la calidad para estaciones estatales y locales de monitoreo del aire (SLAMS).- cada estado deberá desarrollar e implementar un programa del aseguramiento de la calidad consistente de políticas, procedimientos, especificaciones, estándares y documentación necesaria para: 1.- Proveer datos de calidad adecuada para cumplir con los objetivos del monitoreo, y 2.- Minimizar pérdida de

datos de calidad del aire debido al mal funcionamiento o condiciones fuera de control. Se deberá desarrollar un programa que al menos deberá incluir procedimientos operacionales para cada una de las siguientes actividades; Entrenamiento, instalación de equipo, selección y control de estándares de calibración, calibración, chequeo zero/span y ajuste de analizadores automáticos, chequeo de control y sus frecuencias, límites de control para zero, span y otros controles y su respectiva acción correctiva cuando los límites son rebasados, chequeo de calibración y zero/span para analizadores de rangos múltiples, mantenimiento preventivo y correctivo, procedimientos de control de calidad para monitoreo de episodios de contaminación del aire, captura y validación de datos, medición de datos de calidad (precisión y exactitud), documentación de información de control de calidad. En la tabla 10 se presenta un resumen de los criterios para la evaluación de los datos.

Metodología de monitoreo de calidad del aire ambiente.- Para propósitos de demostrar el cumplimiento con los estándares de calidad del aire (NAAQS: National Ambient Air Quality Standards) en cuanto al material particulado puede ser usado el muestreador de alto volumen para las estaciones locales por el tiempo en que la concentración de partículas medidas sea menor que el NAAQS para PM10. Si la medición de PST en un valor de 24 horas es mayor al estándar de PM10 en 24 horas o si el promedio anual es mayor que el estándar promedio anual para PM10 el muestreador de PST deberá ser reemplazado con uno de PM10. Cuando se exceda el máximo de 24 horas el muestreador deberá reemplazarse antes del término del trimestre siguiente al trimestre en el cual se excedió el máximo, cuando se excedió el máximo anual el reemplazo del PST por PM10 deberá operar para el 30 de junio del año siguiente.

Diseño de red para estaciones estatales y locales de monitoreo del aire (SLAMS: State and Local Air Monitoring Stations) y estaciones nacionales de monitoreo (NAMS: National Air Monitoring Stations).- La red de estaciones de monitoreo local deberá ser diseñada para cumplir con un mínimo de 4 objetivos de monitoreo básico que son : 1.- Para determinar altas concentraciones que se espera ocurran en el área cubierta por la red, 2.- Para determinar concentraciones representativas en áreas de alta densidad poblacional, 3.- Para determinar el impacto al ambiente por los niveles de contaminación de fuentes significantes o fuentes por categorías, y 4.- Para determinar la base general de los niveles de concentración.

Tabla 10. Requerimientos mínimos (aseguramiento de calidad).

	Método	Método de evaluación	Cobertura	Frecuencia Mínima	Parámetros reportados
Precisión	Métodos automáticos (SO ₂ , NO ₂ , O ₃ y CO)	Chequeos de respuesta a concentración entre 0.08 y 0.10 PPM	Cada analizador	Cada dos semanas	Concentración real y concentración medida
	Métodos manuales	Muestreadores duplicados	1 sitio por 1-5 sitios 2 sitios de 6-20 sitios 3 sitios por más de 20 sitios	Una vez por semana	Las dos concentraciones medidas
	Métodos automáticos (SO ₂ , NO ₂ , O ₃ y CO)	Chequeos de respuesta a 0.03- 0.08 ppm, 0.15-0.20 ppm, 0.35-0.45 ppm, 0.80-0.90 ppm	1.- Cada analizador 2.- 25% de los analizadores (al menos 1)	1.- una vez al año 2.- una vez por trimestre	Concentración real y concentración medida por cada nivel
Exactitud	Métodos manuales para SO ₂ y NO ₂	Chequeo de procedimiento analítico mediante auditoría con soluciones estándar	Sistema analítico	Cada día que son analizadas muestras, al menos 2 por trimestre	Concentración real y concentración medida por cada solución auditada
	PST, PM10	Chequeo de tasa de flujo del muestreador	1.- Cada muestreador 2.- 25% de los muestreadores (al menos 1)	1.- una vez al año 2.- una vez por trimestre	Flujo real y flujo indicado por el muestreador
	Plomo	1.- Chequeo de tasa de flujo como en PST 2.- Chequeo del sistema analítico con auditoría de tiras con plomo	1.- Cada muestreador 2.- Sistema analítico	1.- Incluido con PST 2.- Una vez por trimestre	1.- Igual que PST 2.- Concentración real y concentración medida de las muestras de auditoría

Fuente: 40 CFR (1992)

Se analiza también la relación entre los objetivos del monitoreo y la localización geográfica de las estaciones, incluyéndose criterios generales para la identificación de sitios candidatos. La escala de representatividad de mayor interés para los objetivos del monitoreo son los siguientes: 1. *micro escala*. En esta escala se definen las concentraciones en volúmenes de aire asociados con una dimensión de área en el rango de varios metros hasta alrededor de 100 metros, 2. *Escala media*.-Define la concentración típica de áreas consistentes de varias cuadras, en una medida cuyas dimensiones se encuentran en el rango de 100 metros a 0.5 Km., 3. *Escala de colonia*. Define las concentraciones de un área extendida de la ciudad que cuenta con una relativa uniformidad en el uso de suelo, sus dimensiones van de 0.5 a 4.0 Km., 4. *Escala urbana*.- Define de manera general las condiciones de toda la ciudad con dimensiones en el orden de 4 a 50 Km. Esta escala usualmente requerirá más de un sitio por definición, 5. *Escala regional*.- Define usualmente un área rural o de geografía razonablemente homogénea y con extensiones de decenas a cientos de kilómetros; y 6. *Escala nacional y global*.- Esta escala de medición representa concentraciones que caracterizan a un país o al mundo.

Los inventarios de emisiones son generalmente el tipo más importante de base informativa necesitada para diseñar redes de estaciones, los datos de emisión proveen de información valiosa concernientes al tamaño y distribución de fuentes. Otros aspectos a considerar en la ubicación de estaciones serían datos de tráfico, resúmenes climatológicos (frecuencia y velocidad del viento), datos geográficos (bosques, ríos, lagos, edificios, mapas de carreteras y topográficos), fotografías aéreas e inclusive de satélite, puede utilizarse además el uso de suelo, cercanía a cuerpo de agua y la distribución de fuentes contaminantes en el área.

En este caso mencionaremos los criterios de diseño para redes locales de monitoreo de plomo, aunque también se describen para SO₂, CO, O₃ y NO₂ en el apéndice D citado. En el caso del plomo los criterios para diseño consideran las siguientes escalas: la *Microescala*, la cual tipifica áreas como avenidas en el centro de la ciudad y corredores con alto tráfico donde el público puede estar expuesto a altas concentraciones por las fuentes móviles, generalmente esta escala representa un área impactada por una pluma con una dimensión de hasta aproximadamente 100 metros; la *Escala media*, que representa la calidad del aire en áreas hasta de varias cuadras en el orden de 100 a 500 metros, puede incluir escuelas, parques y áreas cercanas a bulevares; la *Escala de colonia*, que caracteriza la calidad del aire a través de un área relativamente uniforme con dimensiones de 0.5 a 4 kilómetros y representa áreas donde viven y juegan menores, esta

escala es importante debido a que este segmento de la población es el más susceptible a los efectos del plomo. La *Escala urbana* se utiliza para áreas metropolitanas con dimensiones entre 40 a 50 kilómetros y sirve para definir tendencias de calidad del aire, sus efectos y estrategias de control; la *Escala regional* se caracteriza por presentar niveles de calidad del aire sobre áreas de 50 a cientos de kilómetros, se utiliza para conocer el transporte Inter-regional de contaminantes. El número y el tipo de estaciones no están definidas y deberán ser determinados caso por caso. Como un mínimo deberá haber dos estaciones en cualquier área urbanizada cuya población exceda los 500,000 habitantes, también como un mínimo deberá haber 2 estaciones en cualquier área donde las concentraciones excedan frecuentemente $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética trimestral a partir del primero de enero de 1974, una de las 2 estaciones deberá ser tipo A (micro escala o escala media localizada cerca de la vía con tráfico mayor a 30,000 vehículos diarios promedio) y la otra estación deberá ser tipo b (escala de colonia) pudiéndose localizar en áreas residenciales con una combinación de alta población y tráfico denso.

Siguiendo con las especificaciones en el diseño de estaciones de monitoreo establecidas en el multicitado apéndice D de la parte 58 del CFR 40, y considerando que existen dos propósitos importantes para los datos del monitoreo, que son examinar y evaluar la calidad del aire para una cierta región y conocer las tendencias de los niveles de contaminantes en el aire para varios años, la EPA (1992) considera que una de las herramientas principales para desarrollar esas caracterizaciones es un programa de monitoreo del aire ambiente que implemente una red técnicamente representativa, el diseño de esa red deberá ser cuidadosamente evaluada no solo por sus resultados, sino a intervalos relativamente frecuentes, usando una apropiada combinación de otras herramientas técnicas que incluyen: modelos de dispersión y recepción, estudios de saturación, análisis de emisiones de fuentes puntuales y de área, y apoyo meteorológico. Los cambios sustanciales en las redes de monitoreo, son tanto inevitables como necesarios, sin embargo cualquier cambio sustantivo en la red o en el sitio de monitoreo que pueda afectar la continuidad o comparatividad de las mediciones de contaminantes deberá ser cuidadosamente considerado.

Como cambios sustantivos pueden incluirse cancelación de monitoreo en un sitio existente, relocalización de un sitio existente, un cambio en el tipo de método de monitoreo usado, cualquier cambio en la toma de muestra, en su altura u orientación, cualquier cambio significativo en los procedimientos de calibración o en los estándares, cualquier cambio significativo en la operación o en el aseguramiento de la calidad,

cualquier cambio significativo en las fuentes o en el carácter del área en la vecindad del sitio de monitoreo, o cualquier otro cambio que pueda potencialmente afectar la continuidad o comparatividad de los datos de monitoreo obtenidos antes y después del cambio. Algunos de esos cambios serán inevitables, otros serán necesarios. En todos los casos, los cambios y toda la información pertinente al efecto del cambio deberá ser apropiada y completamente documentada para su evaluación.

Tabla 11. Resumen de escalas espaciales para estaciones de monitoreo locales y nacionales.

Escala espacial	Escala aplicable para estaciones estatales o locales (SLAMS)						Escala requerida para estaciones nacionales (NAMS)					
	SO ₂	CO	O ₃	NO ₂	Pb	PM10	SO ₂	CO	O ₃	NO ₂	Pb	PM10
Micro		✓			✓	✓		✓			✓	✓
Media	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓
Colonia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Urbana	✓		✓	✓	✓	✓			✓			
Regional	✓		✓		✓	✓						

Fuente: 40 CFR (1992).

Criterios para establecimiento (instalación) de monitores de calidad del aire ambiente.- Contiene los criterios para ser aplicados en el establecimiento de las estaciones de monitoreo e incluye criterios para SO₂, CO, O₃, NO₂, Pb y PM₁₀. En este caso se describirá lo concerniente a plomo, considerando que es la misma metodología de muestreo de PST.

Ubicación vertical. Varios estudios han demostrado que las concentraciones de plomo detectadas, no muestran variación hasta los 6 ó 7 metros sobre el nivel del suelo. Al igual que el monitoreo de otros contaminantes la ubicación óptima para la entrada al muestreador para el monitoreo de plomo deberá estar a la altura del nivel de respiración. La entrada al muestreador para un monitor de microescala deberá ser de 2 a 7 metros sobre el nivel del suelo. El límite inferior está basado en el compromiso entre un fácil servicio al muestreador y el deseo de evitar condiciones no representativas debidas a re-entrada de polvos por la superficie. El límite superior representa el compromiso entre el deseo de tener mediciones que sean más representativas de la población expuesta y una consideración de los factores prácticos citados anteriormente. Para escala media o mayor se asume un incremento de la difusión vertical del contaminante, resultando un mayor gradiente por lo que la altura requerida de la entrada de aire puede ubicarse de 12 a 15 metros.

Espacio desde obstrucciones. El muestreador deberá ser colocado alejado de obstáculos como edificios de tal manera que la distancia entre el obstáculo y el muestreador sea al menos 2 veces la altura del obstáculo. Un mínimo de dos metros de separación de las paredes, parapetos y áticos es requerida para muestreadores ubicadas sobre techos. No deberán existir hornos e incineradores en la cercanía. Deberá haber un flujo sin restricción en un arco de al menos 270° alrededor del muestreador. Si la intención es determinar la máxima concentración (tipo a) desde una avenida o una fuente, no deberá haber obstrucción significativa entre éstas y el monitor. La dirección predominante para la estación del año con la mas alta concentración esperada deberá ser considerada dentro del arco de los 270°.

Espacio desde avenidas o calles.- Numerosos estudios han demostrado que los niveles de plomo en el aire ambiente cerca de fuentes móviles, está en función del tráfico vehicular y es mas pronunciado a un promedio diario mayor a 30,000 vehículos, hasta los primeros 15 metros en la dirección del viento desde la avenida. Sin embargo, para medir concentraciones pico de fuentes móviles se deberá colocar a una distancia mas adecuada a altas concentraciones. Para una estación a microescala la ubicación del monitor deberá

estar entre 5 y 15 metros de una vía importante. En la Tabla 12 se presentan las distancias de separación entre las estaciones de monitoreo y las avenidas.

Tabla 12. Distancias de separación entre estaciones de monitoreo para plomo y avenidas o calles.

Promedio de tráfico vehicular por día (ADT)	Distancia de separación entre avenidas y estaciones de monitoreo (mts)		
	Microescala	Escala Media	Escalas: Colonia, Urbana y Regional
≤ 10,000	5-15	15-50	> 50
20,000	5-15	15-75	> 75
≥ 40,000	5-15	15-100	> 100

Fuente: 40 CFR (1992)

Espacios entre árboles y otras consideraciones. Los árboles pueden proveer superficies para depositación o absorción de partículas de plomo y obstruir el flujo normal de los patrones de viento. Para la microescala y la escala media en categoría (a), los sitios de monitoreo en avenidas no deberán tener ningún árbol que se ubique entre los vehículos que transitan y el muestreador. Para la escala de Colonia y sitios de categoría (b), el muestreador deberá ubicarse al menos a 20 metros de la línea de sombra de árboles.

Información anual de calidad del aire para las estaciones estatales o locales de monitoreo del aire (SLAMS).- Este apéndice describe la información que deberá ser compilada y presentada anualmente a la EPA por cada estación local de monitoreo de la red. Los datos que tienen que ser presentados a la EPA deben contener la mínima información que permita identificar posibles cambios en las políticas concernientes a los estándares de calidad de aire ambiente (NAAQS). La información requerida está establecida en formatos para SO₂, TSP, Monóxido de carbono, Bióxido de nitrógeno, Ozono, Plomo y PM₁₀.

Para PST, la información en el reporte anual es la siguiente: nombre de la ciudad, nombre del poblado, y dirección de la estación de monitoreo, código del sitio y número de observaciones diarias. Respecto de las estadísticas anuales son la media aritmética anual, valores de PST diarios que exceden el estándar de 24 hrs para PM₁₀ y sus fechas, en caso de que esta situación rebase 10 ocasiones se deberán presentar solamente los 10 valores más altos, calendario de muestreos usado por ejemplo cada seis días, cada

tres días, etc., número de muestreos adicionales al calendario, y frecuencia de valores promedio de concentraciones de acuerdo a los rangos descritos en la Tabla 13.

Tabla 13. Frecuencia de valores de partículas suspendidas totales (PST) por rangos de concentración.

Rangos	Número de Valores
0-50 ug/m ³	
51-100	
101-150	
151-200	
201-250	
251-300	
301-400	
Mayor de 400	

Fuente: 40 CFR (1992).

Respecto al Plomo, se deberá anotar la ciudad, el poblado, la dirección de la ubicación de la estación, el código del sitio, el código del método de monitoreo, intervalo de muestreo de los datos presentados, por ejemplo muestreo de 24hrs ó dato trimestral. El reporte de estadísticas anuales comprende los cuatro promedios aritméticos trimestrales dados en dos decimales, así como el número de muestreos de 24 horas usados en los promedios como se indica en la Tabla 14.

Tabla 14. Resumen estadístico anual para plomo.

Trimestre	Número de muestras de 24hrs	Promedio aritmético trimestral (ug/m ³)
Enero-Marzo		
Abril-Junio		
Julio-Septiembre		
Octubre-Diciembre		

Fuente: 40 CFR (1992).

Índice uniforme de calidad del aire y reporte diario. Este apéndice describe el índice de uniformidad de calidad del aire que debe ser usado por los estados para el reporte diario de la calidad del aire. Los datos de monitoreo usados para preparar el reporte de este índice, deberán estar basados en datos obtenidos de la red local o estatal de estaciones de monitoreo. Generalmente el índice es reportado para una zona geográfica o para un área urbana, las agencias deberán reportar separadamente los índices de calidad de aire para zonas de la misma área urbana cuando se identifique una diferencia significativa en la calidad del aire en algunas porciones (sub-regiones) de dicha área.

Índice de reporte. El índice de reporte diario deberá contener la siguiente información: El área de reporte, el periodo de reporte, el contaminante crítico, el subíndice correspondiente al contaminante crítico y la palabra descriptiva de la calidad de acuerdo a la Tabla 15.

Tabla 15. Rangos del índice de calidad del aire y descripción de la categoría.

Valor del Índice	Palabra descriptiva de la calidad
0-50	Buena
51-100	Moderada
101-199	Insalubre
200-299	Muy Insalubre
300 o mayor	Peligrosa

Fuente: 40 CFR (1999).

El índice uniforme está basado en la estructura del Índice Estándar de Contaminantes ó PSI (Pollutants Standard Index), el cual incluye los cinco contaminantes para los cuales se han establecido los Estándares Nacionales Primarios de Calidad del Aire Ambiente (NAAQS). El índice uniforme se basa en calcular los subíndices (para cada contaminante) y establecer cuál representa la peor calidad del aire, siendo ése el PSI a reportar. Los cálculos de los subíndices están sustentados en la definición de puntos de quiebre asignados a los diferentes niveles de concentración, partiendo de que el valor de PSI de 100 corresponde al estándar o máximo permisible y que un PSI de 500 corresponde al umbral de peligrosidad.

La ecuación para la obtención de los subíndice es la siguiente:

$$li = ((I_{1,3}-I_{1,2})/(X_{1,3}-X_{1,2})) \times (\text{conc} - X_{1,2}) + I_{1,2}$$

donde: li es el subíndice (por contaminante) del PSI que se busca

$I_{1,3}$ es el rango mayor de los valores de PSI respecto de la concentración medida del contaminante.

$I_{1,2}$ es el rango menor de los valores de PSI respecto de la concentración medida del contaminante.

$X_{1,3}$ es el punto de quiebre mayor de las concentraciones respecto de la concentración medida del contaminante.

$X_{1,2}$ es el punto de quiebre menor de las concentraciones respecto de la concentración medida del contaminante.

Conc. es la concentración medida del contaminantes en aire ambiente.

En la Tabla 16 se presentan los valores del índice y los puntos de quiebre.

Tabla 16. Puntos de quiebre para PSI (Pollutants Standard Index) en unidades métricas ¹.

Valor de PSI	24 hrs PM µg/m ³	24 hrs SO ₂ µg/m ³	8 hrs CO mg/m ³	1 hr O ₃ µg/m ³	1 hr NO ₂ µg/m ³
50	50	80	5	120	
100	150	365	10	235	
200	350	800	17	400	1130
300	420	1600	34	800	2260
400	500	2100	46	1000	3000
500	600	2620	57.5	1200	3750

¹. A 25°C y 760 mmHg

Nota. La tabla también puede expresarse en ppm

Es importante señalar que en esta normativa, ya se establece un nuevo elemento para determinar la calidad del aire considerando dos parámetros contaminantes como son PST y SO₂, de tal manera que se establecen puntos de quiebre para el producto de estos dos parámetros.

4.4.2 A Nivel Nacional.

En México, a pesar de que ya existen estaciones de monitoreo operando en varias ciudades, no existe normatividad respecto de criterios para el establecimiento de estaciones y redes de monitoreo.

4.4.3 A Nivel Local.

Actualmente no se cuenta ni a nivel estatal ni municipal con criterios o recomendaciones que regulen o sugieran bases para el establecimiento y operación de redes o estaciones de monitoreo atmosférico.

4.5 Programas de Calidad del Aire

Los programas de calidad del aire, surgen como una respuesta a la problemática de contaminación en el aire ambiente de las ciudades, en donde la meta general es implementar acciones dirigidas a abatir las principales fuentes de contaminación atmosférica, acciones que pueden ser cuantificables de tal manera que su efectividad pueda ser evaluada por períodos de tiempo.

4.5.1 A Nivel Internacional.

Entre los programas de calidad del aire más importantes a nivel internacional, se puede citar el establecido por la Comunidad Europea (OJEC, 1996) el cual tiene los siguientes objetivos: Definir y establecer objetivos para la calidad del aire en la comunidad designados a evitar, prevenir o reducir los efectos perjudiciales en la salud humana y el medio ambiente en general, evaluar la calidad del aire ambiente en los estados miembros bajo bases comunes de metodología y criterios, obtener información adecuada de la calidad del aire y asegurar que esté disponible al público, mantener la calidad del aire ambiente donde sea buena y tomar acción en los otros casos. Este programa considera entre otros los siguientes conceptos: **Implementación y responsabilidades** .- Implementación de la Directiva, Evaluación de la Calidad del Aire ambiente, aprobación de los mecanismos de medición (métodos, equipo, redes, laboratorios), aseguramiento de la exactitud de las mediciones mediante la medición de datos y la revisión del mantenimiento de esa exactitud por esos datos, en particular por control de calidad interno llevado a cabo de acuerdo con los requerimientos de los estándares europeos de aseguramiento de la calidad, Análisis de los métodos de evaluación, Coordinación por territorios de programas de aseguramiento de la calidad organizados por la comisión. **Establecimiento de los máximos permisibles y umbrales de alerta para aire ambiente**.- Listado de contaminantes y tiempos de cumplimiento, consideración de investigaciones científicas recientes sobre medio ambiente y epidemiología así como avances en metrología, a fin de

examinar las bases de los máximos permisibles, posterior al establecimiento de los máximos y los umbrales se establecen criterios y técnicas para la localización de los puntos de muestreo, el mínimo número de puntos de muestreo, las técnicas de referencia de medición y muestreo el uso de otras técnicas de evaluación, el establecimiento de márgenes de tolerancia para el cumplimiento con el máximo permisible. **Evaluación preliminar de la calidad del aire ambiente.**- Los estados miembros que no cuentan con mediciones representativas de contaminantes deben iniciar series representativas de medición a fin de contar con datos disponibles en tiempo para la implementación de esta legislación. **Evaluación de la calidad del aire ambiente.**- establecidos los máximos permisibles y los umbrales de alerta se evalúa la calidad del aire a través del territorio de los estados miembro, establecimiento de las áreas de aglomeración, uso combinado de medición y técnicas de modelación, uso de modelación solo cuando se determine estar por debajo de los máximos, uso de mediciones continuas o periódicas. **Mejora de la calidad del aire ambiente.**- Los estados miembros deberán tomar las mediciones necesarias para asegurar el cumplimiento con los máximos permisibles, considerar que las mediciones podrán usarse para integrarse en acciones de protección del aire, agua y suelo, que no contravengan disposiciones de protección, seguridad y salud del trabajador en su trabajo, no tenga efecto negativo significativo en el medio ambiente de otros estados miembros, los estados miembros implementarán acciones en el corto tiempo cuando los máximos permisibles y/o los umbrales sean excedidos.

Otro ejemplo internacional de este tipo de programas, es el derivado del Programa Frontera XXI (Gobierno del Estado de Baja California, 1999), el cual en su organización contempla la problemática en el elemento aire por lo que es creado el grupo de trabajo de calidad del aire frontera XXI, las partes involucradas en este grupo buscan, a través del programa, una mayor colaboración entre las entidades ambientales fronterizas de los diferentes niveles de gobierno. Se crean los siguientes subgrupos de trabajo y proyectos de calidad del aire. Subgrupos: Programas de aire en Tijuana-San Diego, Programas de aire Mexicali-Valle Imperial, Programas de aire en ambos Nogales, Programas de aire en Agua Prieta-Douglas, Programas de aire en Cd. Juárez-El Paso-Sundland Park, Programas de aire en Brownsville-Laredo, Calidad del aire y energía, Congestión vehicular en la frontera, Calidad del aire en Big Bend. Proyectos: Monitoreo de la calidad del aire en Mexicali y Tijuana, Estudio intensivo de monitoreo de calidad del aire en California-Baja California, Programa de desarrollo del inventario de emisiones para México, Proyecto de elaboración del inventario de emisiones de Mexicali, Proyecto de

elaboración del inventario de emisiones de Tijuana, Centro de información sobre contaminación del aire, Programa de entrenamiento de contaminación del aire para México, Técnicas para calcular emisiones de categorías de fuentes únicas en Mexicali, Comité consultivo conjunto para el mejoramiento de la calidad del aire de Ciudad Juárez-El Paso-Condado de Doña Ana.

4.5.2 A Nivel Nacional

El Programa para Mejorar la Calidad del Aire de Mexicali 2000-2005. El programa implementado por el Gobierno del Estado de Baja California (1999), el Gobierno Municipal de Mexicali, la SEMARNAP y la Secretaría de Salud estima que con la aplicación de las medidas propuestas se reducirán en alrededor de un 20% las emisiones de hidrocarburos, de óxidos de nitrógeno y de monóxido de carbono; 30% de las de partículas PM10 y 40% las de bióxido de azufre para el año 2005. Las actividades propuestas a fin de reducir las emisiones de los diferentes contaminantes que rebasan los valores normados son las siguientes. Reducir las emisiones de las empresas mas contaminantes a través de la instalación de equipos de control y de reingeniería de procesos, Implementar un programa de recuperación de vapores en terminales de almacenamiento y estaciones de servicio de combustibles, Fortalecer la inspección y vigilancia de establecimientos industriales, comerciales y de servicios, Convenir con la industria la implementación de un programa de reducción de compuestos orgánicos volátiles, Realizar por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) un estudio de la evaluación de impacto de las emisiones de la geotérmica Cerro Prieto, Realizar auditorias ambientales y acciones de autorregulación en el sector industrial, Integrar un registro de emisiones y transferencia de contaminante (RETC) para Mexicali, Petróleos Mexicanos (PEMEX) evaluará la posibilidad de suministrar gasolina oxigenada y de baja presión de vapor Reid, Diseñar el modelo, consensar y aplicar el programa de verificación vehicular, Condicionar la importación de vehículos a la certificación de verificación vehicular de su país de origen, Impulsar la utilización de gas LP y gas natural en el transporte público, Diseñar e implantar un programa de detención y sanción de vehículos ostensiblemente contaminantes, Aplicación de estabilizadores de suelos para el control de emisiones de PM10 en calles, áreas no pavimentadas y de intenso tránsito, Intensificar un programa de pavimentación de calles y caminos, entre otras.

De acuerdo al informe de la situación del medio ambiente de México, la SEMARNAT (2003) presenta los programas de gestión de la calidad del aire en las principales ciudades de México, los cuales se describen a continuación:

PROAIRE (Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México). Está formado por 94 acciones y proyectos concretos, en cuyas estrategias se incluyen nuevas normas de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV), normas más estrictas para combustibles industriales, uso del hoy no circula y doble no circula, etc. Su objetivo es reducir los niveles de contaminación y reducir el número de contingencias anuales como consecuencia de abatir el 50% de las emisiones de hidrocarburos, el 40% de óxidos de nitrógeno y el 45% de partículas suspendidas de origen antropogénico. **AIRE LIMPIO** (Programa para el Valle de Toluca) su objetivo es proteger la salud de la población de la zona metropolitana mediante la reducción de las emisiones; está formado por seis subprogramas integrados por 45 proyectos y 185 acciones específicas, su meta es abatir el 40% de las emisiones de hidrocarburos, el 50% de óxidos de nitrógeno y 40% de las partículas, con lo cual se reducirá de un 15 a un 10% el número de días que se exceden las normas. Entre las medidas se incluyen actualizar el programa de verificación vehicular, modernización del transporte público, uso de gasolinas mejoradas, entre otras.

Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Este programa cuenta con 32 medidas y pretende reducir el porcentaje de días con problemas de calidad del aire de un 70% a un 50%, se estima una reducción del 50% en las emisiones de partículas y de óxidos de nitrógeno y de alrededor de un 25% en las emisiones de hidrocarburos. Entre las medidas se incluyen actualizar el programa de contingencias ambientales, convenios con la industria para reducir la emisión de precursores de ozono, introducción de combustibles más limpios, entre otras.

PACADAMM (Programa de Administración de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey). Su objetivo es proteger la salud de los habitantes del área metropolitana, incorpora 31 medidas con las que se pretende la reducción del 10% de las emisiones de hidrocarburos, el 30% de las de partículas y de las de óxido de nitrógeno, esperándose una reducción del 18 al 10% en días que se rebasa alguna norma de calidad del aire. Entre las medidas se incluye la realización de estudios de evaluación de contaminación del aire y por ruido, convenios de cooperación con países e instituciones

internacionales, promoción del uso de gas natural por camiones de carga y transporte público, mecanismos de agilización de tráfico vehicular, entre otras.

Programa de Gestión de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez. Este programa incorpora 40 medidas con las que se pretende cumplirse con las normas de la calidad del aire y determina responsabilidades tanto del gobierno norteamericano como del mexicano en sus diferentes instancias. Entre las principales estrategias se encuentran el programa de verificación vehicular, mejora de la red vehicular y tráfico vial, establecimiento de la red de monitoreo ambiental, programa de industria limpia mediante auditorías ambientales, promoción de actividades de investigación científica y tecnológica de medidas de control, entrenamiento, capacitación y educación ambiental, etc.

Programa para Mejorar la Calidad del Aire en Tijuana- Rosarito. Su objetivo es señalar las acciones para proteger la salud de la población y prevenir y controlar la contaminación del aire. Su meta es reducir las emisiones generadas hasta conseguir el cumplimiento con las normas de calidad del aire y plantea 5 áreas de trabajo con acciones específicas, entre ellas, la regulación de emisiones a empresas, inspección y vigilancia de establecimientos industriales y de servicios, establecer un programa de verificación vehicular, alternativas para el transporte masivo y renovación del parque vehicular, impulsar el cambio de combustible con la CFE, convenir con PEMEX el suministro de gasolina oxigenada, programas de reforestación y de pavimentación, operación local de la red de monitoreo atmosférico, crear un programa de vigilancia epidemiológica asociada a la contaminación, etc.

4.5.3 A Nivel Local

En la Ciudad de Hermosillo, Sonora, existe el Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire o PEMCA (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 1998) aprobado su protocolo en forma coordinada por los tres niveles de gobierno: SEMARNAP (por la federación), la Secretaría de Infraestructura Urbana y Ecología (SIUE) por el Gobierno del Estado y el H. Ayuntamiento de Hermosillo a través de la Dirección General de Desarrollo Urbano y Obras Públicas. Este programa pretende establecer un diagnóstico confiable del estado que guarda la calidad del aire en Hermosillo y fomentar y desarrollar actividades tendientes a prevenir, controlar y restaurar la calidad del aire. A la fecha el Ayuntamiento de Hermosillo cuenta con dos reportes técnicos anuales (febrero-diciembre 2001 y enero-diciembre 2002), en los que se consideran los parámetros de PST

y PM10 para tres estaciones de monitoreo, los cuales no han sido publicados oficialmente en el inventario nacional de calidad del aire.

Por otro lado, la SEMARNAP (DOF, 2000) publicó el acuerdo de coordinación específico que celebran la SEMARNAP y el Estado de Sonora, con el objeto de llevar a cabo el *Programa de gestión y evaluación de la calidad del aire, relativo a la operación de equipo de monitoreo atmosférico en los municipios de Agua Prieta, Cajeme, Cananea, Hermosillo, Naco, Nacozari de García, Navojoa, Nogales y San Luis Río Colorado, Sonora*. En este acuerdo se establece que la SEMARNAP descentralizará a los municipios las actividades relativas a la operación del equipo de monitoreo atmosférico, transferir a los ayuntamientos para su operación, resguardo y custodia el equipo de monitoreo atmosférico, apoyará a los municipios a localizar, evaluar y seleccionar los sitios para la ubicación de estaciones y diseño de red, proporcionar asistencia técnica para instalar y configurar las estaciones, participar en la capacitación del personal que los municipios designen, efectuar actividades de supervisión y auditoría, revisión periódica de la información generada por el sistema, recibir y revisar con fines de evaluación y validación los datos generados por la red e incorporarlos al Banco Aerométrico del Sistema Nacional de Información Ambiental. Por otra parte el Estado se compromete a apoyar a los municipios para localizar, evaluar y seleccionar los sitios para instalación de estaciones de monitoreo, brindar a lo municipios asesoría técnica, participar en la capacitación del personal que designen los municipios, revisar periódicamente la información generada por el sistema, recibir y revisar la información con fines de evaluación y validación de los datos generados por la red e incorporarlos a su sistema de información ambiental, responder por el manejo, presentación, distribución y difusión que en el ámbito estatal se haga respecto de la información de la calidad del aire producida. Los municipios se comprometen a recibir los equipos y operarlos por el tiempo que dure el acuerdo, llevar a cabo las actividades operativas de descentralización e informar sobre los avances de la misma, garantizar que los equipos permanecerán en los sitios aprobados por las tres instancias, aportar recursos financieros, humanos y logísticos necesarios para la operación, mantenimiento y calibración y en caso necesario las partes buscarán esquemas alternos de financiamiento, solicitar a la SEMARNAP y el Estado la asesoría técnica para el desarrollo de las actividades de descentralización, seleccionar y designar al personal técnico que operará las estaciones y acordar con la SEMARNAP y el Estado la capacitación, someter a opinión de la SEMARNAP los programas operativos, de mantenimiento y calibración, procurar los medios para garantizar la generación de datos

válidos en un nivel del 75% o más del total posible, remitir sistemáticamente a la SEMARNAP y al Estado un reporte con la información generada en periodos no mayores de un mes, autoriza a la SEMARNAP a integrar los datos al Sistema Nacional de Información Ambiental y al Estado para utilizar la información en su Sistema de Información Ambiental, responder por el manejo, presentación, distribución y difusión que localmente se haga de la información de calidad del aire, desarrollar el inventario de emisiones provenientes de fuentes fijas y móviles de jurisdicción local, llevar a cabo las acciones apeándose a las Normas Oficiales Mexicanas, dar facilidades para que personal de SEMARNAP supervise y evalúe el desarrollo de las actividades. Es importante señalar que este acuerdo tiene carácter de duración indefinida.

Al respecto de estos programas mencionados, se solicitó información a la Secretaría de Infraestructura Urbana y Ecología del Gobierno del Estado y en la Delegación de la SEMARNAT en Sonora, no existiendo a la fecha ninguna publicación oficial, ni integración de datos de calidad del aire a los sistemas ambientales estatales o nacionales de información derivada de ambos programas.

5. AREA DE ESTUDIO

5.1 Localización

El presente trabajo fue realizado en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, México, en el municipio de Hermosillo, el cual colinda al Norte con los municipios de Pitiquito, Carbó y San Miguel de Horcasitas; al Este con los municipios de San Miguel de Horcasitas, Ures, Mazatán, La Colorada y Guaymas; al Sur con el municipio de Guaymas y el Golfo de California; y al Oeste con el Golfo de California y municipio de Pitiquito. Este Municipio representa el 8.7% de la superficie del Estado y sus coordenadas geográficas extremas son: Al norte 29°43', al sur 28°14' de latitud norte; al este 110°23' y al oeste 112°15' de Longitud Oeste (figura 3). La Ciudad de Hermosillo, se ubica a los 29°04'23" de Latitud Norte y a los 110°57'33" de longitud oeste y a una altitud de 200 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 1997). La mancha urbana tiene aproximadamente el 85% de terrenos sensiblemente planos, de escasa pendiente orientada principalmente hacia el lecho del Río Sonora, presenta además varias elevaciones como el Cerro de la Campana con 300 msnm y la Sierra El Bachoco con 650 msnm (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003).

5.2 Climatología

El clima identificado para la Ciudad de Hermosillo, corresponde a tipo BW(h') el cual es muy seco muy cálido y predomina en el 48.02% de la superficie municipal. La temperatura media anual es de 24.9 grados centígrados y la precipitación total anual promedio es de 412.8 milímetros (INEGI, 1997).

Para esta ciudad, el mes mas frío es diciembre con una temperatura mínima promedio de 3.5°C y el mes mas caluroso es junio con una temperatura máxima promedio de 45°C, el mes con mayor humedad relativa es diciembre con un máximo promedio de 62% mientras que el mes con menos humedad es abril con un porcentaje mínimo promedio de 24.6%. Los meses con las mayores precipitaciones pluviales son julio, agosto y septiembre registrándose una humedad promedio de 53%, mientras que en marzo, junio y octubre son los meses con presencia mínima de lluvias con una humedad del 30%. Los vientos dominantes se dirigen en sentido suroeste-noreste por la mañana y en sentido contrario por la tarde (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003).

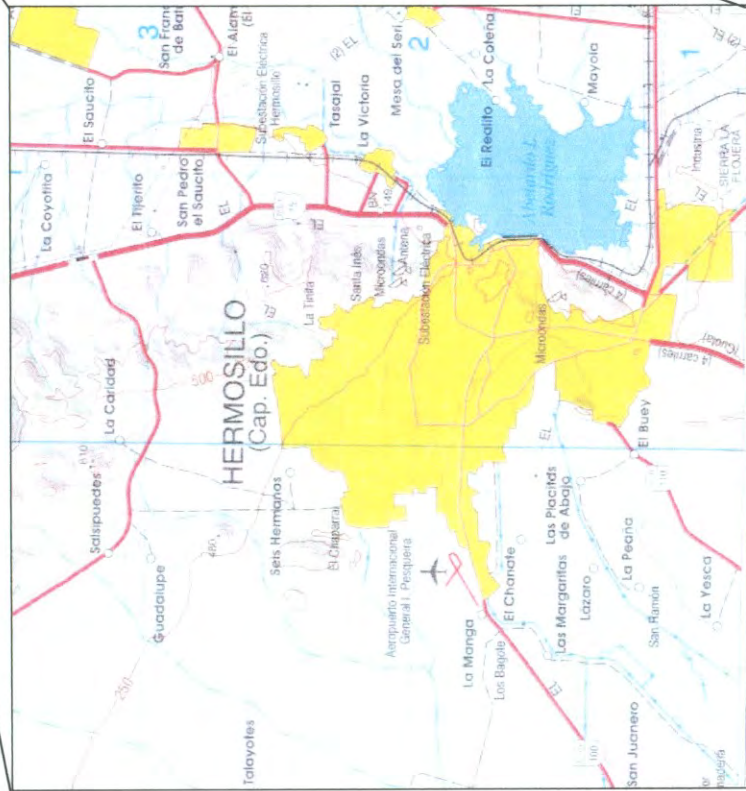


Figura 3. Localización del área de estudio.

5.3 Vegetación

La vegetación predominante para el municipio es la de matorral y representa el 75% de la superficie, seguida de vegetación agrícola con 17%. La ciudad presenta vegetación de ornato y de sombra. En el uso potencial de la tierra, el 73% de la superficie municipal es susceptible de uso agrícola por medios mecanizados, mientras que el 24% no es apta para agricultura (INEGI, 1997).

5.4 Población

La Ciudad de Hermosillo presentó una población de 545,928 habitantes en el año 2000, habiéndose reportado 406,417 habitantes en 1990. Además, actualmente se deben considerar otras localidades rurales y fraccionamientos que se ubican dentro del límite del centro de población, lo que arroja una población de 559,539 habitantes para el centro de población al año 2000, representando aproximadamente el 25.2% de la población del estado (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003).

6. MATERIALES Y METODOS

6.1 Localización y distribución de las estaciones de muestreo

La localización de las estaciones de muestreo corresponden a los sitios considerados en la red de monitoreo establecida por la Dirección de Ecología del H. Ayuntamiento de Hermosillo, que consta de tres estaciones de monitoreo: Estación MAZON (*Centro*): Elías Calles entre Matamoros y Guerrero, 110°57'11.1" de Longitud Oeste y 29°04'40.8" de Latitud Norte ó X:504568, Y:3216629 en UTM; Estación CESUES (*Noreste*): Ley Federal del Trabajo e Israel González, 110°57'40.3" de Longitud Oeste y 29°07'17" de Latitud Norte ó X:503775, Y:3221438 en UTM; y Estación CBTIS 206 (*Noroeste*): Cócorit y República de Panamá, 111°00'25.4" de Longitud Oeste y 29°07'06.6" de Latitud Norte ó X:499314, Y:3221117 en UTM. En la figura 4 se muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo dentro de la ciudad.

6.2 Frecuencia y procedimiento de colecta de muestras de aire

En el PEMCA (Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire) se estableció una frecuencia de muestreo cada 6 días con muestreos simultáneos en las tres estaciones de la red, con el objetivo de analizar y evaluar la calidad del aire respecto de PST. En el presente estudio se utilizó la información y filtros de dichos muestreos realizados durante el período junio de 2001 a mayo de 2002, analizándose metales pesados (Pb, Ca, Ni, Cu y Cr). El método de muestreo utilizado por el H. Ayuntamiento de Hermosillo, fue el de alto volumen (Hi-Vol) establecido en la norma NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993), el cual permite medir la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente por medio de un muestreador que hace pasar a través de un filtro una cantidad determinada de aire ambiente durante un período de muestreo de 24 hrs. La velocidad de flujo del aire ambiente y la geometría del muestreador son tales que favorecen la recolección de partículas hasta de 50 micrómetros (μm) de diámetro aerodinámico, dependiendo de la velocidad del viento y su dirección. Los filtros usados tienen una eficiencia de recolección mínima del 99 % para partículas de 0.3 μm . En la figura 5, se ilustra un muestreador de alto volumen. Los filtros pesados antes y después del muestreo son los utilizados para la determinación de concentración de PST y de metales pesados de acuerdo a la metodología citada mas adelante.

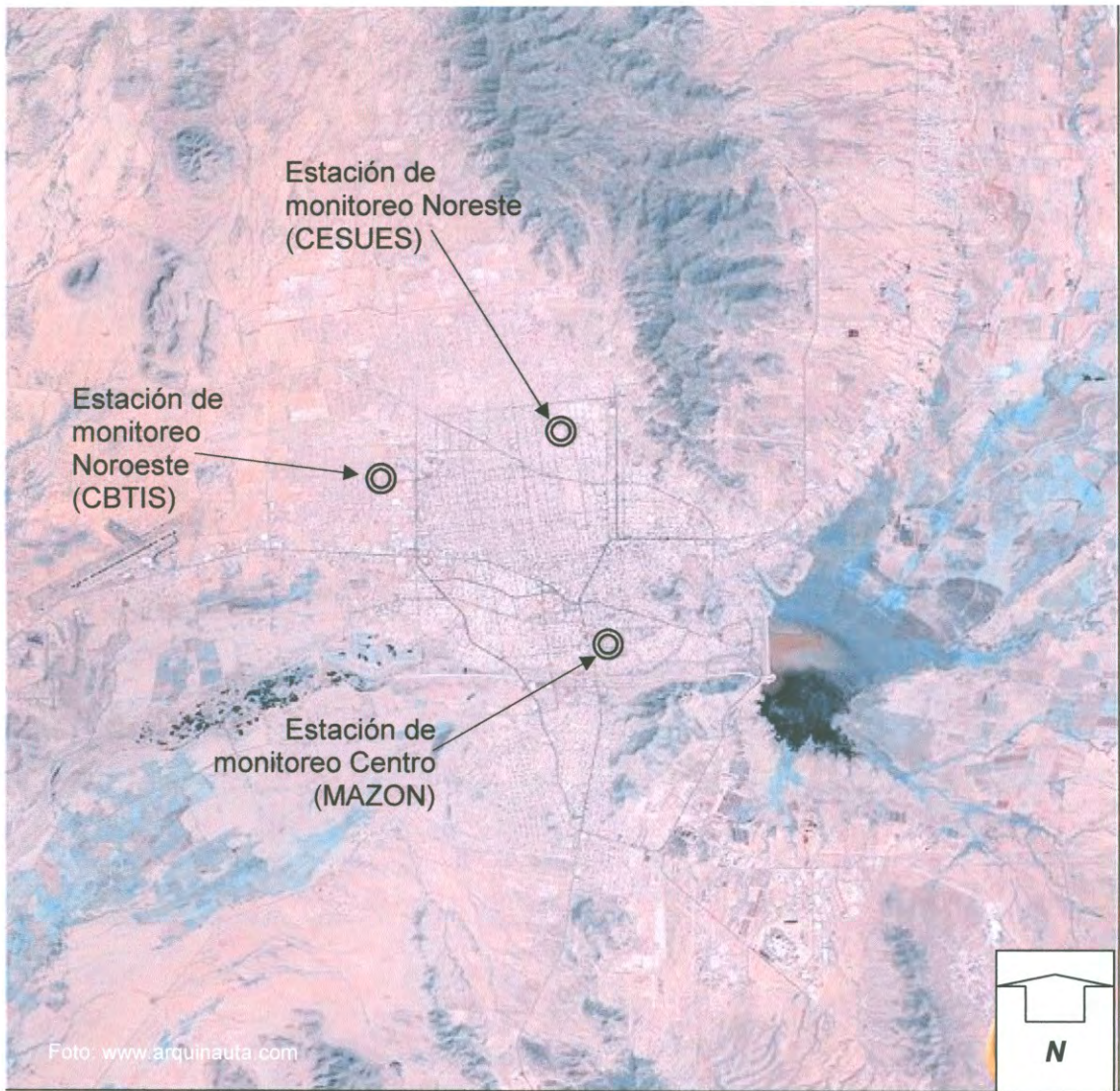


Figura 4. Ubicación de las Estaciones de Monitoreo en la Ciudad de Hermosillo, Sonora.

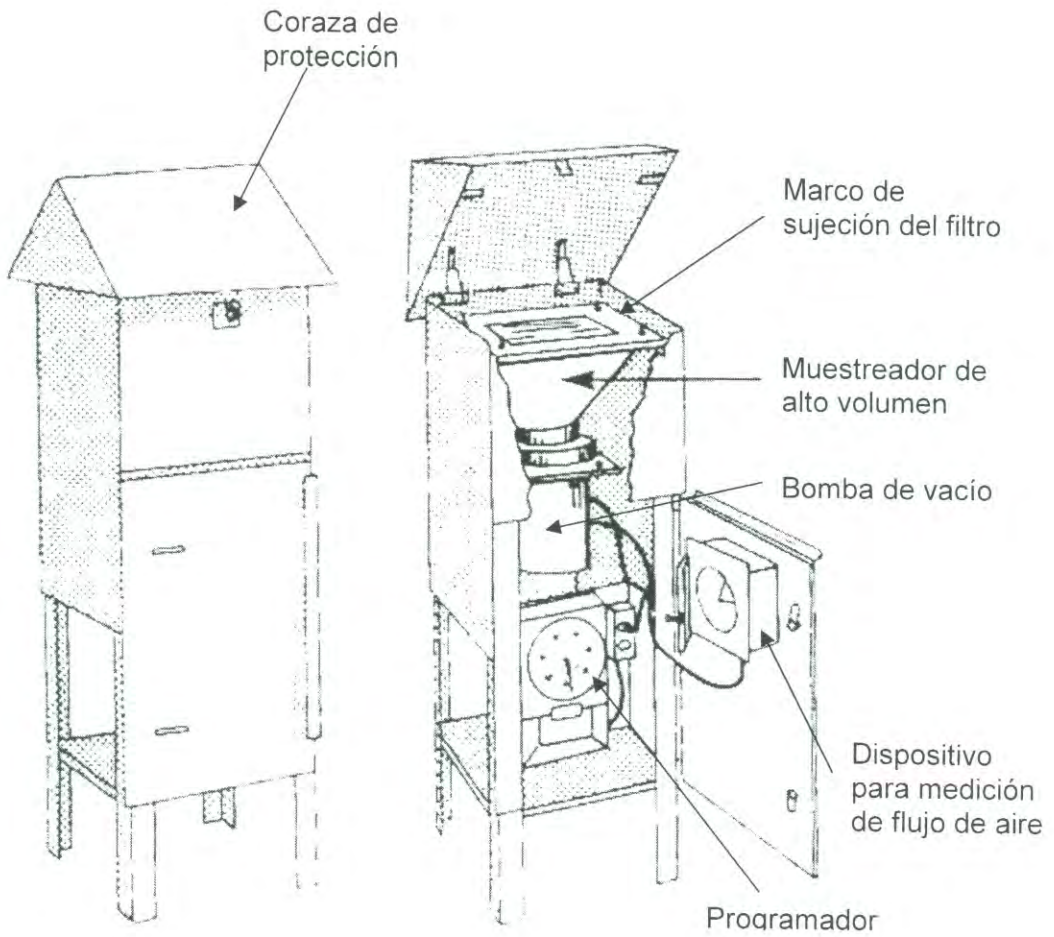


Figura 5. Muestreador de alto volumen (HI-VOL).

6.3 Determinaciones Analíticas

6.3.1 Partículas Suspendidas Totales.

El método utilizado para muestreo y determinación de Partículas Suspendidas Totales (PST) corresponde al procedimiento señalado por la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993), que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición y que coincide con el método establecido en la normatividad de EUA (CFR 40, 1992). En este método, un filtro se pesa en el laboratorio bajo condiciones de humedad y temperatura controladas, antes y después de su uso, para determinar su ganancia neta de peso (masa). El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia, se determina a partir del flujo de aire ambiente medido y del tiempo de muestreo. La concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa de las partículas recolectadas entre el volumen de aire muestreado y se expresa en microgramos por metro cúbico patrón ($\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{ptn}}$), corregidos a las condiciones de referencia.

6.3.2 Metales Pesados Totales (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

La metodología para la determinación de metales pesados (Pb, Ca, Ni, Cu y Cr) en aire ambiente, fue la establecida bajo el procedimiento para la determinación de plomo en partículas suspendidas, establecida en el CFR 40 (1992), cuyo principio se basa en coleccionar las partículas suspendidas en el aire en un filtro de fibra de vidrio, utilizando un muestreador de alto volumen. Los metales del material particulado muestreado fueron solubilizados por extracción con una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico para posteriormente analizarse por espectrometría de absorción atómica por flama, utilizándose un equipo de absorción atómica Perkin-Elmer modelo 3110.

6.4 Control de Calidad

6.4.1 Aseguramiento de calidad para monitoreo en aire.

El aseguramiento de la calidad en los sistemas de monitoreo del aire tiene como fundamento dos distintas e importantes funciones correlacionadas, la primer función es el control de los procedimientos de medición a través de la implementación de políticas, procedimientos y acciones correctivas; la segunda función es la valoración de la calidad

de los datos (producto del proceso de medición) del monitoreo (CFR 40, 1992). Con la finalidad de establecer la calidad de los resultados obtenidos, (de muestreo y analíticos), se realizó una evaluación con base en los criterios señalados por la EPA (1998) en el Manual de Aseguramiento de Calidad para Sistemas de Medición de Contaminación del Aire (Tabla 17).

6.4.2 Otros Elementos de Control de Calidad.

En el proceso de generar datos de concentraciones de contaminantes en el aire, existen elementos que influyen en la calidad de dichos datos desde la planeación, el muestreo, el manejo de muestras y la correcta operación de los equipos, es por eso que adicionalmente a los parámetros de control de calidad revisados según el numeral anterior, también se desarrolló un análisis de las condiciones antes mencionadas de acuerdo a lo siguiente.

6.4.2.1 **Muestreo.** La Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993) no establece criterios o controles de calidad propiamente dichos para las actividades de muestreo, sin embargo en el presente trabajo se analizaron restricciones o acotaciones de uso u operación del método establecido por la norma, que en caso de no cumplirse o cumplirse de manera parcial o desviada pudieran llegar a representar la necesidad de indicar al lector una observación sobre los resultados del muestreo.

6.4.2.2 **Comparativo de consideraciones para redes de monitoreo (normatividad internacional).** En México no existe normatividad para el control de calidad en monitoreo de PST y metales en aire, por lo que con la finalidad de obtener mayor certidumbre sobre los resultados obtenidos, se revisaron las condiciones de operación de la red local conforme a los criterios para instalación y operación de redes de monitoreo según la normatividad de EUA (CFR 40, 1992) y la europea (OJEC, 1999).

Tabla 17. Objetivos de calidad en las mediciones de metales (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

Requerimiento	Frecuencia	Criterio de Aceptación	Información/acción
Chequeo de Filtros Chequeo visual de defectos Eficiencia de colecta Integridad del filtro PH	Todos los filtros Especificación adquisición Especificación adquisición	Sin defectos 99% 2.4 mg de pérdida máxima 6 a 10	Desechar filtro defectuoso ASTM-2988.Rechazar envío
Equipo Muestreador Calibrador	Especificación adquisición Especificación adquisición	Método de referencia o Equivalente 0.02 std. m ³ /min	
Límite de detección LDL		0.07 ug/m ³	Se asume un vol. 2400 m ³ .
Cobertura	Trimestral	75%	
Calibración muestreador Calibrador de orificio Medidor de tiempo Timer On/Off Flujo	Al recibirse y anualmente Al recibirse y cada 6 meses Al recibirse y cada 3 meses Al recibirse, en auditoría desviación >7%, después de mantenimiento	Flujo indicado $\pm 2\%$ del real ± 2 min/24 hrs ± 30 min/24 hrs Todos los puntos dentro de $\pm 5\%$ de la escala total	Adoptar nueva curva de calibración. Calibrador trazable a NIST Ajustar/reemplazar medidor Checar contra medidor de tiempo. Ajustar o reparar Volver a correr los puntos fuera del límite hasta aceptación.
Calibración analítica Prueba de reproducibilidad Estabilidad de Calibración	Al recibirse Antes de la primera muestra, después de cada 10 muestras y después de la última muestra.	5% $\pm 5\%$ de desviación de la curva de calibración	Reproducibilidad=100([respuesta alta-respuesta baja]/promedio de respuestas). Las respuestas deberán ser corregidas por el nivel de blanco. Si el criterio es rebasado, el instrumento debe ser checado para servicio de reparación u operador calificado. Alternar entre dos estándares de control de 1 ug/ml o de 1 a 10 ug/ml. Tomar acciones correctivas y repetir los diez análisis previos
Evaluación desempeño NPAP (Programa Nacional de Auditoría de Desempeño) Auditoría de desempeño del muestreador (flujo)	1 al año 1 cada 3 meses	Diferencia absoluta media de 15% Porcentaje de diferencia de $\pm 7\%$	Usar la información para reportar a la Agencia para acciones correctivas y auditar el sistema técnico Recalibrar antes de cada muestreo adicional
Precisión Analizador Reporte a organismos	1 cada 6 días 1 cada 3 meses	 95%CI \leq $\pm 15\%$	Ambos valores de plomo deben ser >0.15 ug/m ³
Exactitud Analizador Reporte a organismos	25% de los sitios trimestralmente	Porcentaje de diferencia de $\pm 16\%$ 95%CI \leq $\pm 20\%$	Analizar tres muestras de auditoría en cada uno de los dos rangos de concentración. Las muestras de auditoría deberán ser distribuidas tanto como sea posible sobre el total del calendario trimestral

Fuente: EPA (1998).

CI: Intervalo de Confianza

6.5 Análisis de Resultados

6.5.1 Líneas de tendencia de concentraciones según parámetro y datos climáticos.

A fin de identificar una posible relación entre los resultados de concentración de PST y metales pesados obtenidos para cada estación de monitoreo con los parámetros ambientales o climáticos como la temperatura, presión, velocidad de viento y humedad ambiental, se realizó la evaluación del Coeficiente de Determinación (R^2), utilizando las líneas de tendencia lineal y polinomial de segundo a sexto orden utilizando el paquete estadístico JMP versión 4.0.4 (SAS Institute, 2001).

Los datos de información climática fueron obtenidos por personal del H. Ayuntamiento de Hermosillo a través de la estación meteorológica del Departamento de Energía del Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, y proporcionada para este estudio como parte de los datos de campo.

6.5.2 Comportamiento espacial y temporal de los resultados de concentración.

Con los resultados de los valores de concentración de PST y metales pesados, se realizaron análisis estadísticos de comparación entre las tres estaciones de monitoreo a fin de establecer diferencias espaciales de tales concentraciones, así mismo se realizó la prueba entre las diferentes estaciones del año, agrupándose series de resultados por estación del año para cada una de las estaciones de monitoreo con la finalidad de establecer diferencias temporales de las concentraciones de los parámetros de estudio. La determinación de presencia o ausencia de normalidad en los datos fue obtenida a partir de la gráfica de cuantiles, mientras que la herramienta estadística para identificar diferencias espaciales y temporales fue la prueba no paramétrica de Van der Waerden (Conover, 1971), en ambos casos las pruebas fueron realizadas mediante el paquete estadístico JMP.

7. RESULTADOS

7.1 Control de Calidad

7.1.1. Aseguramiento de calidad para monitoreo en aire.

Como se señaló en el capítulo anterior, los criterios de evaluación para el aseguramiento de calidad fueron los establecidos en el Manual de Aseguramiento de Calidad para Sistemas de Medición de Contaminantes del Aire (EPA, 1998). Los resultados del análisis se describen a continuación.

7.1.1.1 Chequeo de filtros. Como primer paso del control de calidad, todos los filtros utilizados fueron checados visualmente a fin de identificar defectos, para que en caso de presentar deficiencias sean descartados. De acuerdo a lo manifestado de forma verbal por los encargados del programa de monitoreo del H. Ayuntamiento de Hermosillo, los filtros fueron checados y descartados aquellos que presentaban orificios, rasgaduras o que les faltaba parte del mismo. No se reportó la cantidad de filtros descartados. Así mismo se manifestó que de acuerdo al proveedor los filtros cumplen con la eficiencia de colecta de 99%, que ninguno de los filtros usados perdió más de 2.4 mg de su peso y que el potencial de Hidrógeno (pH) de los mismos se encontraba entre 6 y 10 unidades.

7.1.1.2 Equipos. Equipos muestreadores.- Como parte del control de calidad, se verificó el cumplimiento con las especificaciones de diseño y operación de los equipos de muestreo de acuerdo a lo establecido en el método de la Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993) y que coincide totalmente con el método descrito en el CFR 40 (1992). Se realizó un recorrido por las estaciones de monitoreo a fin de revisar los equipos muestreadores, observándose que cumplen con las especificaciones marcadas en los puntos 8.2, 8.3 y 8.4 de la norma mexicana mencionada. *Calibrador.-* En cuanto al equipo de calibración, se revisó el calibrador usado por el personal del H. Ayuntamiento de Hermosillo, siendo éste el indicado por la NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993).

7.1.1.3 Límite de detección. El criterio de aceptación para los límites de detección de los métodos utilizados son los siguientes: Para PST la norma NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993) establece un rango de aceptación de 2 a 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para

Plomo el método utilizado establece un límite de detección de $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De acuerdo a los resultados proporcionados por el personal del H. Ayuntamiento de Hermosillo (ver Anexo 1, columna PST), ningún valor de concentración de PST se encuentra fuera del rango de 2 a $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ cumpliéndose con el criterio de calidad. Respecto a metales pesados, solamente se tiene el criterio para límite de detección para plomo de acuerdo al método utilizado siendo de $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio el valor de límite de detección logrado para concentración absoluta de plomo fue de $0.067 \text{ mg}/\text{l}$, con este dato y considerando un volumen de muestreo de $2,400 \text{ m}^3$, se obtiene un límite de detección en aire ambiente de $0.034 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Es pertinente señalar que para cada metal analizado se obtuvo su límite de detección considerado como la cantidad de concentración de analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco (Y_B), más tres veces la desviación estándar del blanco (S_B) (Miller y Miller, 1993). Al igual que para el plomo, se calculó para los demás metales la concentración que dicho límite de detección representaría en el aire ambiente (Tabla 18).

Tabla 18. Valores de límite de detección de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

Parámetro	Límite de Detección	Límite de Detección
	Analítico (mg/l)	en Aire Ambiente ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Plomo	0.067	0.034
Cadmio	0.071	0.036
Níquel	0.029	0.015
Cobre	0.048	0.024
Cromo	0.047	0.024

7.1.1.4 **Cobertura.** Este criterio de calidad establece el porcentaje mínimo aceptable de muestreos exitosos en relación al total de muestreos planeados en un periodo de tiempo dado. En el caso de plomo el tiempo base es de tres meses y el criterio de aceptación de cobertura debe ser del 75% (EPA, 1998). En la Tabla 19, se presentan los días de muestreos exitosos por trimestre para el período de estudio y el porcentaje que representan por trimestre.

Tabla 19. Porcentaje de muestreos exitosos – cobertura.

Trimestre	No. De Muestreos programados	% de Muestreos Exitosos		
		Estación Centro (MAZON)	Estación Noreste (CESUES)	Estación Noroeste (CBTIS)
Ene-Mar	15	100%	100%	93%
Abr-Jun	15	93%	100%	67%
Jul-Sep	15	73%	73%	87%
Oct-Dic	16	63%	94%	94%
Promedio de Cobertura Trimestral		82.25%	91.75%	85.25%

De acuerdo a la tabla 19, para la estación Centro (Mazón) dos de los cuatro trimestres presentan porcentajes de cobertura menores al 75%, mientras que para las estaciones Noreste (CESUES) y Noroeste (CBTIS 206) solamente uno de los cuatro trimestres presenta porcentaje de cobertura menor al 75%. Es importante señalar que para el período de estudio el promedio de cobertura trimestral en cada una de las estaciones es superior al 75%.

7.1.1.5 Calibración de muestreadores. Los requerimientos para asegurar la calidad en la calibración de los muestreadores fueron los siguientes (EPA, 1998):

Calibrador de orificio.- Este instrumento debe estar certificado al adquirirse y posteriormente certificarse anualmente, siendo el criterio de aceptación de $\pm 2\%$ de diferencia entre el flujo indicado y el real y que en caso de no ser así, se debe adoptar una nueva curva de calibración trazable a NIST (National Institute of Standards and Technology) y ajustar o reemplazar el medidor. Al respecto, se identificó según las hojas de calibración proporcionadas por el H. Ayuntamiento de Hermosillo, que el estándar de transferencia o calibrador usado para las calibraciones de los tres muestreadores, presentó una sola fecha de certificación desde septiembre de 1999 y que fue la que se utilizó para todo el período de estudio.

Medidor de tiempo.- Este accesorio del muestreador debe verificarse al adquirirse y posteriormente cada seis meses, siendo el criterio de aceptación de ± 2 min/24 hrs. Al respecto, no se cuenta con registro de las verificaciones, por lo que no es posible identificar si se cumplió con este requisito durante el período de estudio.

Programador Encendido/Apagado.- Este accesorio del muestreador debe verificarse al adquirirse y posteriormente cada tres meses, siendo el criterio de aceptación de ± 30 min/24 hrs, y en caso de no cumplir se debe ajustar o reparar. No se cuenta con el registro de dichas verificaciones, por lo que no es posible determinar el cumplimiento de este dato de calidad durante el período de estudio.

Flujo.- Este parámetro debe verificarse al adquirirse el equipo, durante las auditorias y después de cada mantenimiento, siendo el criterio de calidad del 5% de la escala total, y en caso de no cumplirse de deben volver a correr los puntos fuera del límite de aceptación. Es oportuno señalar que las verificaciones de flujo son ejecutadas a través de la comparación de los resultados obtenidos mediante dos calibradores, los cuales deben ser trazables al mismo patrón primario. A este respecto, se identificó que el programa de monitoreo no cuenta con un segundo calibrador, por lo que no fue posible

verificar o auditar el flujo de los muestreadores durante el período de estudio, por tal motivo no fue posible establecer el cumplimiento de este parámetro de calidad.

7.1.1.6 Calibración analítica.- Este parámetro de calidad, se establece a partir de los dos siguientes elementos.

Prueba de reproducibilidad.- Este dato de calidad establece un criterio de aceptación (precisión) del 5%, calculado mediante la siguiente ecuación: $P = (a - b) / (a + b) / 2 \times 100$; donde: P: Reproducibilidad, a: concentración alta y b: concentración baja. A fin de establecer el cumplimiento de este criterio, en el presente trabajo se realizaron análisis de estándares certificados para cada metal de interés al inicio y al final de cada batch o corrida presentándose en el Anexo 2 (anexo 2a) los resultados obtenidos. Los estándares fueron los siguientes: 1 ppm para plomo, 0.2 ppm para cadmio, 1 ppm para níquel, 3 ppm para cobre y 0.4 ppm para cromo. Como puede apreciarse en el anexo citado, ninguno de los valores de reproducibilidad obtenidos rebasa el criterio del 5%.

Estabilidad de calibración.- Este criterio de calidad establece la necesidad de verificar la estabilidad de la calibración del equipo analítico durante el uso del mismo; para ello se utilizan las soluciones estándar preparadas para la elaboración de la curva de calibración, a fin de verificar con ellos el equipo antes de la primera muestra, después de cada 10 muestras y después de la última muestra, alternando con dos niveles de concentración (1 µg/ml y otro entre 1 y 10 µg/ml), en caso de no cumplir con el criterio, se deben tomar acciones correctivas y repetir los diez análisis previos. El criterio de aceptación es del $\pm 5\%$ de desviación de la curva de calibración. En virtud de que se esperaba que las concentraciones de metales pesados en aire fueran bajas, las concentraciones utilizadas para la verificación de la estabilidad fueron de 1 y 2 ppm. En el Anexo 2b se presentan los resultados de la estabilidad de la calibración. Considerando que el criterio de aceptación es del $\pm 5\%$, los valores de concentración aceptables fueron de 0.95 y 1.05 ppm para el estándar de 1 ppm y de 1.9 y 2.1 ppm para el estándar de 2 ppm, encontrándose que para los cuatro batch de análisis realizados, los valores de verificación se mantuvieron dentro del rango de dichos criterios, siendo posible asegurar la estabilidad de la calibración del equipo al no rebasarse los mínimos y máximos establecidos.

7.1.1.7 **Evaluación del desempeño.**- La evaluación del desempeño se determina a partir de dos auditorías, la primera es relacionada a estadísticas de resultados y la segunda es una auditoría periódica al medidor de flujo de los equipos, A continuación se describen los resultados de la investigación sobre la posibilidad de esta evaluación.

Programa Nacional de Auditoría Anual. Este criterio de calidad establecido en la normatividad de EUA (CFR 40, 1992), consistente en auditar los resúmenes de las estadísticas obtenidas a partir de los resultados de monitoreo, el criterio de aceptación es del $\pm 15\%$ de diferencia absoluta media. Este tipo de estadísticas, así como este tipo de auditorías no son realizadas en el programa de monitoreo local en Hermosillo, y tampoco existen evidencias de que se ejecuten en otros programas de monitoreo de calidad del aire en México.

Auditoría de desempeño del muestreador (flujo).- Este parámetro de aseguramiento de calidad, establece que se deben llevar a cabo auditorías al sistema de medición de flujo de los muestreadores una vez cada tres meses, siendo el criterio de aceptación de $\pm 7\%$ para el porcentaje de diferencia a obtenerse. Debido a que la auditoría de flujo se realiza mediante un segundo calibrador (adicional al usado para calibrar la operación del muestreador, pero ambos calibradores certificados con el mismo patrón de referencia) y debido a que el programa de monitoreo no cuenta con dos calibradores, no fué posible determinar este parámetro de calidad.

7.1.1.8 **Precisión.**- El criterio de aceptación para este parámetro de calidad debe ser calculado trimestralmente a partir de determinaciones de la precisión del sistema muestreo-análisis obtenidas cada seis días mediante el uso de muestreadores duplicados (en pares). En el caso del plomo, dicha determinación solamente es válida si los resultados de ambos valores de concentración de plomo son mayores a $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y el criterio es: $< \pm 15\%$ con un intervalo de confianza del 95%. En el caso de PST la determinación de precisión sólo puede llevarse a cabo si ambas concentraciones detectadas rebasan $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La determinación de precisión es obtenida mediante la siguiente ecuación: $DI = ((Y_i - X_i) / (Y_i + X_i) / 2) \times 100$ donde: DI: Precisión, Y_i : es la concentración determinada en el muestreador duplicado, X_i : es la concentración determinada en el muestreador primario, designado para reportar la calidad del aire del sitio. En este caso, la red de monitoreo local no contaba durante el período analizado con equipos adicionales de muestreo que permitieran realizar muestreos en pares o

muestreos duplicados, por lo cual no fué posible determinar el cumplimiento de este parámetro de calidad.

7.1.1.9 Exactitud.- Este parámetro de calidad se debe determinar cada trimestre al menos para el 25% de los equipos muestreadores y/o equipo analítico, utilizando tres muestras de auditoria (concentraciones conocidas del parámetro de interés) para cada rango de concentración y distribuyéndose sobre el calendario trimestral. El criterio de aceptación es de $\pm 16\%$ como porcentaje de diferencia. En el caso de reportes a organismos, el criterio de aceptación es del 20% para un intervalo de confianza del 95%. Debido a que se esperaban valores bajos de concentración de metales pesados en aire, solamente se llevaron a cabo determinaciones de tres muestras de auditoria, siendo de 0.5, 1.0 y 2.0 ppm, analizándose al principio, en medio y al final de batch o corrida de análisis debido a que los filtros muestra ya se encontraban en almacenaje. El criterio de aceptación utilizado fue el establecido por EPA (1998) calculado de acuerdo a la siguiente ecuación $d_i = ((Y_i - X_i) / X_i) \times 100$ Donde: d_i : Exactitud del análisis, X_i : es la concentración conocida de la muestra de auditoria, Y_i : es la concentración indicada por el analizador.

De acuerdo a lo anterior y considerando que el rango aceptable de recuperación sería del 84 al 116%, entonces para la recuperación de la concentración conocida de 0.5 ppm el rango aceptable fue de 0.42 a 0.58 ppm; así mismo para la concentración conocida de recuperación de 1.0 ppm el rango aceptable fue de 0.84 a 1.16 ppm, mientras que para la concentración de recuperación conocida de 2.0 ppm el rango de aceptación fue de 1.68 a 2.32 ppm. Con base en estos criterios de aceptación y los valores de concentración de recuperación presentados en la tabla del Anexo 2c se establece que en ninguna de las pruebas de recuperación se rebasó el criterio de calidad aceptable para exactitud.

7.1.2 Otros Elementos de Control de Calidad.

7.1.2.1 Muestreo. La norma NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993) establece que para determinar la concentración de partículas suspendidas totales conforme al método de referencia, se deben observar las siguientes condiciones.

a). *El rango de las concentraciones para aplicar este método es de 2 a 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$*

.- De acuerdo a los datos de muestreo proporcionados por la Dirección de Ecología del H.

Ayuntamiento de Hermosillo para el período junio 2001 a mayo 2002, se identifica que de los muestreos realizados ninguno se encuentra fuera del rango de 2 a 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecidos como condición aceptable de concentración en un muestreo de PST (Anexo 1, ver columna de PST).

b). *El rango aceptable de velocidad de flujo del muestreador debe estar entre 1.1 y 1.7 m^3/min .*- Considerando la información proporcionada de los muestreos (Anexo 1, columna Qptn), se determinó que para la estación de monitoreo Centro (Mazón) de los 49 muestreos realizados, 14 presentan un flujo promedio de muestreo mayor a 1.7 m^3/min lo que representa un 28.6% de muestreos fuera del rango aceptable. Para la estación de monitoreo Noreste (CESUES) se determinó que de los 55 muestreos realizados, 48 presentan un flujo mayor a 1.7 m^3/min , representando el 87.3%; mientras que para la estación de monitoreo Noroeste (CBTIS) de los 56 muestreos realizados, 26 días presentan un flujo promedio de muestreo mayor a 1.7 m^3/min , representando el 46.4% de muestreos fuera del rango. En ninguna de las estaciones se reportan flujos menores a 1.1 m^3/min .

c). *El tiempo de muestreo aceptable del método es de 24+1 hrs.*- De los muestreos realizados durante el período de estudio, en ninguna de las estaciones se reportaron valores de tiempo menores a 23 horas o mayores a 25 horas de muestreo.

d). *Los filtros utilizados en los muestreos deben ser acondicionados por 24 hrs y pesados a una precisión mínima de miligramo.*- De acuerdo a la información proporcionada por personal encargado del programa de monitoreo, se establece que los filtros generados en los muestreos realizados fueron acondicionados y pesados en una balanza analítica Sartorius del Departamento de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad de Sonora calibrada mediante set de pesas Troemner, cumpliendo con las condiciones establecidas en la norma de referencia NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993). Es pertinente señalar que como parte del presente trabajo, los filtros fueron acondicionados de nuevo y vueltos a pesar en APPISA Ingeniería Ambiental en una balanza analítica Ohaus modelo AS200 calibrada mediante set de pesas Ohaus certificadas. Con la finalidad de establecer si los filtros tuvieron cambios de peso o pérdida de material en su almacenaje y manejo, se determinó mediante un análisis de prueba pareada (Mendenhall et al., 1994) con una confianza del 95%, si ambos pesos son estadísticamente iguales; este dato es relevante ya que se define de esta manera que las concentraciones a determinar de metales pesados no requieren de correcciones por pérdida de material en los filtros almacenados.

e). *Que en los muestreos realizados, las calibraciones de los equipos hayan cubierto los criterios de aceptación.*- En relación al estándar de transferencia o calibrador usado para las calibraciones de los muestreadores, la norma recomienda una certificación anual o como lo requiera el procedimiento de control de calidad aplicable. En el caso particular se identificó según las hojas de calibración proporcionadas, que el estándar de transferencia presentó una fecha de certificación de septiembre de 1999. De acuerdo a información proporcionada por personal del H. Ayuntamiento de Hermosillo encargado del programa de monitoreo, básicamente las calibraciones de los equipos fueron realizadas debido a cambios de motor o reparaciones en dichos equipos. Con base en las hojas de calibración, se establece que para la estación de monitoreo Centro (Mazón) se llevaron a cabo cuatro calibraciones durante el período estudiado, en las que el valor de correlación de la calibración se encontró una sola vez por arriba de 0.99 y tres veces ligeramente por debajo de dicho valor. En cuanto a la estación de monitoreo Noreste (CESUES), se identificaron solamente dos calibraciones del equipo a lo largo del período anual, en las cuales ambos valores de correlación se encontraban por arriba de 0.99. Respecto a la estación de monitoreo Noroeste (CBTIS), se identificaron cuatro calibraciones de las cuales dos presentan valores por debajo de dicho valor.

f). *Que los muestreos se hayan realizado con una frecuencia de cada seis días o cada tres días.*- Considerando los datos del anexo 1 aportados por el H. Ayuntamiento de Hermosillo y asumiendo que los muestreos de PST se programaron con una frecuencia de cada seis días, el total de muestreos programados para ese período corresponden a 61. Para la estación Centro (Mazón) se muestrearon 49 días lo que corresponde al 80.3% de lo programado; para la estación Noreste (CESUES) se muestrearon 55 días equivalentes al 90.1% de lo programado y finalmente en la estación Noroeste (CBTIS) se realizaron 56 muestreos que representan el 91.8% del programa.

7.1.2.2 Comparativo de consideraciones para redes de monitoreo (normatividad internacional).- Como se señaló en el capítulo de Materiales y Métodos, en México se carece de criterios para el control de calidad de los datos obtenidos por redes de monitoreo, sin embargo y a fin de evaluar las condiciones operativas de la red local y de proponer recomendaciones en este sentido. En la Tabla 20, se presenta una comparación entre las consideraciones de operación establecidas por la Comunidad Europea (OJCE, 1999), para estaciones de monitoreo y las condiciones operativas de la red local.

Tabla 20. Comparativo de consideraciones para redes de monitoreo según la normatividad de la Comunidad Europea.

Condición establecida por la Directiva de la Comunidad Europea.	Condiciones de la red local en Hermosillo, Sonora
El flujo alrededor de la entrada del muestreador no deberá estar restringido (normalmente algunos metros desde edificios, balcones, árboles y otros obstáculos en al menos 0.5 metros de la construcción más cercana en el caso de puntos de muestreo que representen la calidad del aire en zonas de edificios.	En las tres estaciones se cumple con esta condición al encontrarse los muestreadores sobre el techo de edificios.
La entrada al muestreador deberá estar entre 1.5 mts. (zona de respiración) y 4 mts. sobre el suelo. Ubicaciones más altas (hasta 8 mts.) pueden ser necesarias en algunas circunstancias.	En las tres estaciones la altura del muestreador fué mayor a 8 metros sobre el nivel del piso.
La entrada al muestreador no deberá ser posicionada muy cercana a fuentes de emisión, a fin de evitar la toma directa de emisiones no mezcladas con el aire ambiente.	En las tres estaciones se cumple con esta condición al no existir fuentes de generación cercanas.
La salida del muestreador deberá ser posicionada de tal manera que se evite la recirculación del aire emitido por el muestreador..	En las tres estaciones se cumple con esta condición debido al diseño de los muestreadores utilizados.
Para ubicar muestreadores orientados a áreas de tráfico, cada punto de muestreo deberá estar al menos a 25 mts. de la avenida más importante y al menos a 4 mts. del centro de la línea más cercana de tráfico.	Los muestreadores de la red local no tienen este objetivo.
En el muestreo de partículas y plomo la entrada al muestreador deberá estar situado de tal manera que sea representativa de la calidad del aire cercana a la línea de edificios.	Los muestreadores están ubicados en el techo de edificios y a mas de 8 metros de altura.
El número mínimo de puntos de muestreo para una población entre 500 mil y 749 mil habitantes, debe ser de 2 estaciones si la concentración excede el umbral superior (70% del valor límite).	Para el centro de población de Hermosillo en el año 2000 se tenía una población de 560,000 habitantes, por lo que con tres estaciones de monitoreo cumple con esta condición.
Número mínimo de puntos de muestreo para cumplimiento con los máximos de protección de ecosistemas o vegetación. Si la concentración máxima excede el umbral superior: Una estación cada 20,000 km ² . Si la concentración máxima está entre los umbrales superior e inferior: Una estación cada 40,000 km ² .	La red local de monitoreo no tiene este objetivo.
Exactitud: Para mediciones continuas se requiere una exactitud del 25%, para mediciones indicativas se requiere de una exactitud del 50%.	No es posible determinar la exactitud debido a que no se cuenta con un segundo patrón de transferencia o calibrador.
Datos de captura: Para mediciones continuas se requiere de un mínimo de datos de captura del 90%, así como para mediciones indicativas.	La estación Centro (Mazón) presenta un 80.3% cobertura de los muestreos programados; la estación Noreste (CESUES) reporta 90.1% de lo programado y la estación Noroeste (CBTIS) presenta un 91.8% de cobertura de las fechas del programa.

En Estados Unidos de América, se cuenta con la normatividad establecida por el CFR 40 (1992) para aseguramiento de la calidad para estaciones de monitoreo del aire que establece la vigilancia de la calidad del aire ambiente. En esta normativa se definen claramente especificaciones, condiciones y requisitos para la instalación y operación de estaciones y redes de monitoreo. En la Tabla 21, se presenta un comparativo entre las condiciones operativas de la red local de Hermosillo, Sonora y las especificaciones de dicha normativa.

Tabla 21. Comparativo de consideraciones para redes de monitoreo según la normatividad de los Estados Unidos de América (EUA).

Condición establecida por la normatividad en EUA	Condiciones de la red local en Hermosillo
Para los métodos manuales (exceptuando PM10), al menos obtener una muestra de 24 hrs cada seis días.	El programa de monitoreo considera muestreos de 24hrs cada seis días, cumpliéndose con este requisito.
Exactitud de muestreo: Trimestralmente auditar la tasa de flujo de al menos el 25% de los muestreadores, usando un patrón de transferencia de flujo estándar. Este estándar no debe ser el mismo usado en la calibración del muestreador, sin embargo ambos estándares deben ser referenciados a el mismo patrón primario. El porcentaje de diferencias entre las tasas de flujo son usados para calcular la exactitud. En caso de ser menos de 4 muestreadores, reauditar una de las estaciones.	El programa de monitoreo local no considera la determinación de la exactitud del muestreo. No se cuenta con un segundo patrón de transferencia.
En el análisis de plomo, cada trimestre se debe auditar el método de análisis de plomo.	Durante el análisis de metales pesados contenidos en los filtros proporcionados por el H. Ayuntamiento de Hermosillo (junio 2001-Mayo 2002), se realizaron auditorias (o ensayos de recuperación) en cada fecha de análisis de filtros.
Exactitud analítica: Analizar tres muestras de auditoria usando tiras de filtros de fibra de vidrio conteniendo una cantidad conocida de plomo. En esta auditoria se usan tiras de filtro utilizando baches de reactivos diferentes de aquellos usados para calibrar el instrumento analítico en cada uno de los dos rangos de muestras que son analizadas cada trimestre, el porcentaje de diferencias entre las concentraciones son usadas para calcular la exactitud analítica.	En el anexo 2c se presentan los valores de recuperación obtenidos durante la fase analítica desarrollada, cumpliéndose con el criterio de aceptación de exactitud.
La precisión para métodos manuales es estimada a partir de los resultados obtenidos de muestreadores colocados en pares. La precisión para cada muestreador solo es calculada cuando ambas mediciones se encuentran por arriba de los siguientes límites, para PST $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y plomo $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para cada par de mediciones seleccionadas, el porcentaje de diferencia es calculado usando la ecuación $d_i = (y_i - x_i) / (y_i + x_i) / 2 \times 100$, donde y_i es la medición de la concentración del contaminante obtenido del muestreador duplicado y x_i es la concentración medida obtenida del muestreador primario designado para reportar la calidad del aire del sitio.	La red de monitoreo local no cuenta con equipo para la realización de muestreos duplicados (pares), por lo cual no es posible calcular la precisión del método de muestreo.

7.2 Partículas Suspendidas Totales (PST).

7.2.1 Concentraciones de PST por estación de monitoreo.

En el Anexo 1, se presentan los resultados de concentraciones de PST determinados para los días muestreados en cada estación de monitoreo, la cual fue determinada por el personal del H. Ayuntamiento de Hermosillo, aplicando las ecuaciones señaladas en el método de referencia y utilizando las variables de calibración, datos de temperatura y presión atmosférica de los días muestreados, flujo promedio de muestreo de cada día y pesaje inicial y final de filtros usados. En la Tabla 22 se presenta un resumen de los valores mínimo, promedio y máximo determinados para cada estación de monitoreo.

Tabla 22. Resumen de concentración de partículas suspendidas totales (PST) en las tres estaciones de monitoreo en la Ciudad de Hermosillo, Sonora para el período junio de 2001 a mayo de 2002.

	Estación Centro (Mazón)	Estación Noreste (CESUES)	Estación Noroeste (CBTIS)
Mínimo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	58.59	17.98	47.52
Promedio $\mu\text{g}/\text{m}^3$	140.11	110.98	244.32
Máximo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	472.87	243.32	610.82

7.2.2 Comparación con los Máximos Permisibles para PST.

Con la finalidad de evaluar la calidad del aire respecto de PST durante el período de estudio se realizó una comparación de los valores de concentración obtenidos para cada estación de monitoreo, contra los valores máximos permisibles para PST establecidos en la norma NOM-024-SSA1-1993, los cuales son de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 hrs en un período de un año y $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual.

Para la estación Centro (Mazón), se determinó que de los 49 días muestreados, en tres ocasiones se rebasó el máximo permisible para 24 hrs., mientras que el promedio anual para esta estación fue de $140.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual es también superior al máximo permisible anual de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la figura 6, se ilustra gráficamente la comparación señalada.

Para la estación Noreste (CESUES), en la cual se muestrearon 55 días durante el período de estudio, se identificó que en ninguno de esos días se rebasó el máximo permisible en 24 Hrs. de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo el promedio anual del período analizado es de $110.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual es muy superior al máximo permisible de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ definido por la norma señalada (figura 6).

Respecto a la estación Noroeste (CBTIS), se identifica que de los 56 días muestreados 23 veces se rebasó el máximo permisible de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 Hrs, obteniéndose además un promedio anual de $244.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual es más del 300% superior al máximo permisible anual establecido como criterio de calidad del aire (figura 6).

7.2.3 Líneas de Tendencia de PST con Datos Climáticos.

Con la finalidad de identificar si el patrón de distribución de concentraciones de PST está relacionado a los elementos atmosféricos, se llevaron a cabo pruebas de líneas de tendencia determinándose para cada caso el valor del Coeficiente de Determinación (R^2), el cual es un indicador con valores de 0 a 1 que revela en que grado se corresponden los valores estimados con los datos reales, de esta forma una línea de tendencia es mas fiable cuando su valor R^2 es o se acerca a 1 (Microsoft excell, 2002).

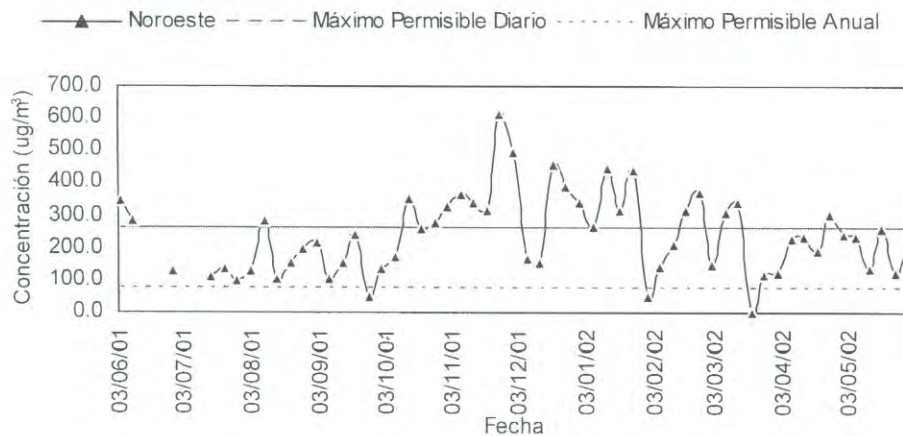
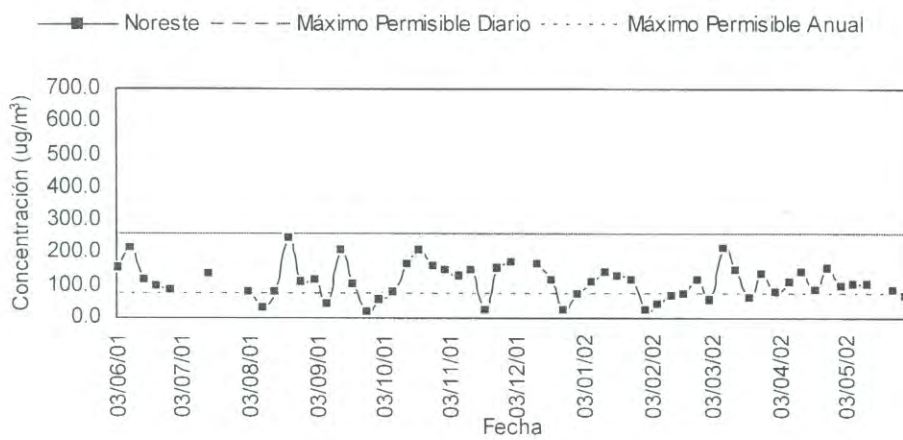
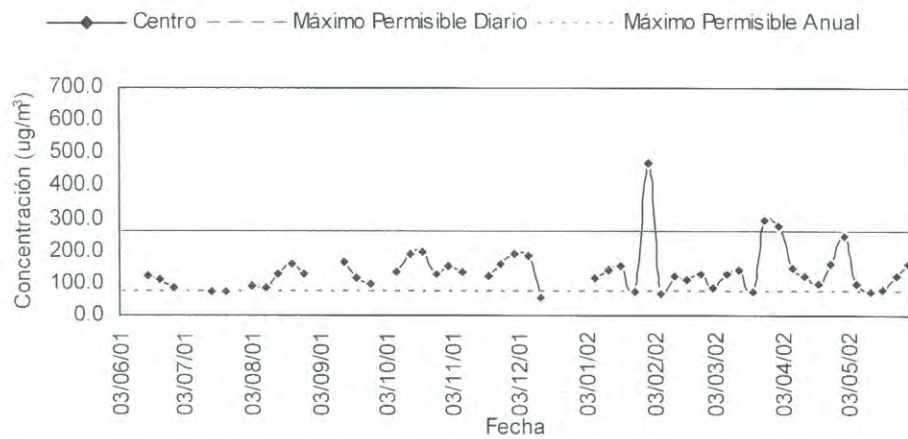


Figura 6. Distribución y comparación de concentraciones de PST con los Máximos Permisibles según la NOM-024-SSA1-1993 en las estaciones Centro, Noreste y Noroeste.

Este valor se obtuvo para las series de valores de PST de cada estación a lo largo del periodo de estudio, utilizándose como variables de correspondencia los siguientes parámetros climáticos: Temperatura diaria promedio ($^{\circ}\text{C}$), Presión (mm Hg), Velocidad de viento (m/s) y Humedad (%); además, se calculó la R^2 entre fecha y concentración de PST para cada estación. Los valores del coeficiente de determinación fueron calculados mediante el programa estadístico JMP (SAS Inst., 2001), utilizando las ecuaciones de ajuste lineal y polinomial de segundo a sexto orden; los resultados obtenidos se presentan en el Anexo 3.

Es pertinente señalar que los valores más altos de R^2 en todos los casos de correspondencia fueron obtenidos mediante la línea de tendencia de tipo polinomial de sexto orden, lo cual significa que dicha correspondencia entre los parámetros graficados solamente es identificada y explicada por ecuaciones polinomiales, alejadas de la ecuación lineal. De los resultados del valor de R^2 más altos por cada estación fueron los siguientes: Para la estación Centro (Mazón) se encontró entre PST y temperatura, siendo de 0.52; en la figura 7 se presenta la gráfica de esta línea de tendencia.

En la estación Noreste (CESUES) el parámetro que presentó el coeficiente más alto con PST fue también la temperatura con un valor de R^2 de 0.20, (figura 7). Respecto a la estación Noroeste (CBTIS) el parámetro que presentó el valor de R^2 más alta con PST fue la fecha con un valor de 0.37 (figura 7).

Los valores del coeficiente de determinación R^2 pueden interpretarse como la proporción de la varianza de y que puede atribuirse a la varianza de x ; o como se mencionó anteriormente la correspondencia entre las variables x e y que pueden ser explicadas por la línea de tendencia calculada. En el caso de elementos ambientales como los analizados es posible asumir que cuando el valor de R^2 es mayor 0.5, exista una correspondencia real entre los parámetros participantes y dicha correspondencia puede ser usada para la toma de decisiones (comunicación personal Dr. Fco, Jaque Rechea, Feb. 2004 *). De acuerdo a esta consideración, en el caso de PST, solamente es posible asumir correspondencia entre la distribución de las concentraciones de PST y la distribución de un parámetro ambiental o climático como la temperatura para la Estación Centro (Mazón).

* Departamento de Física Aplicada. Universidad Autónoma de Madrid. Curso Contaminación Atmosférica y su Influencia en la Salud (Febrero de 2004).

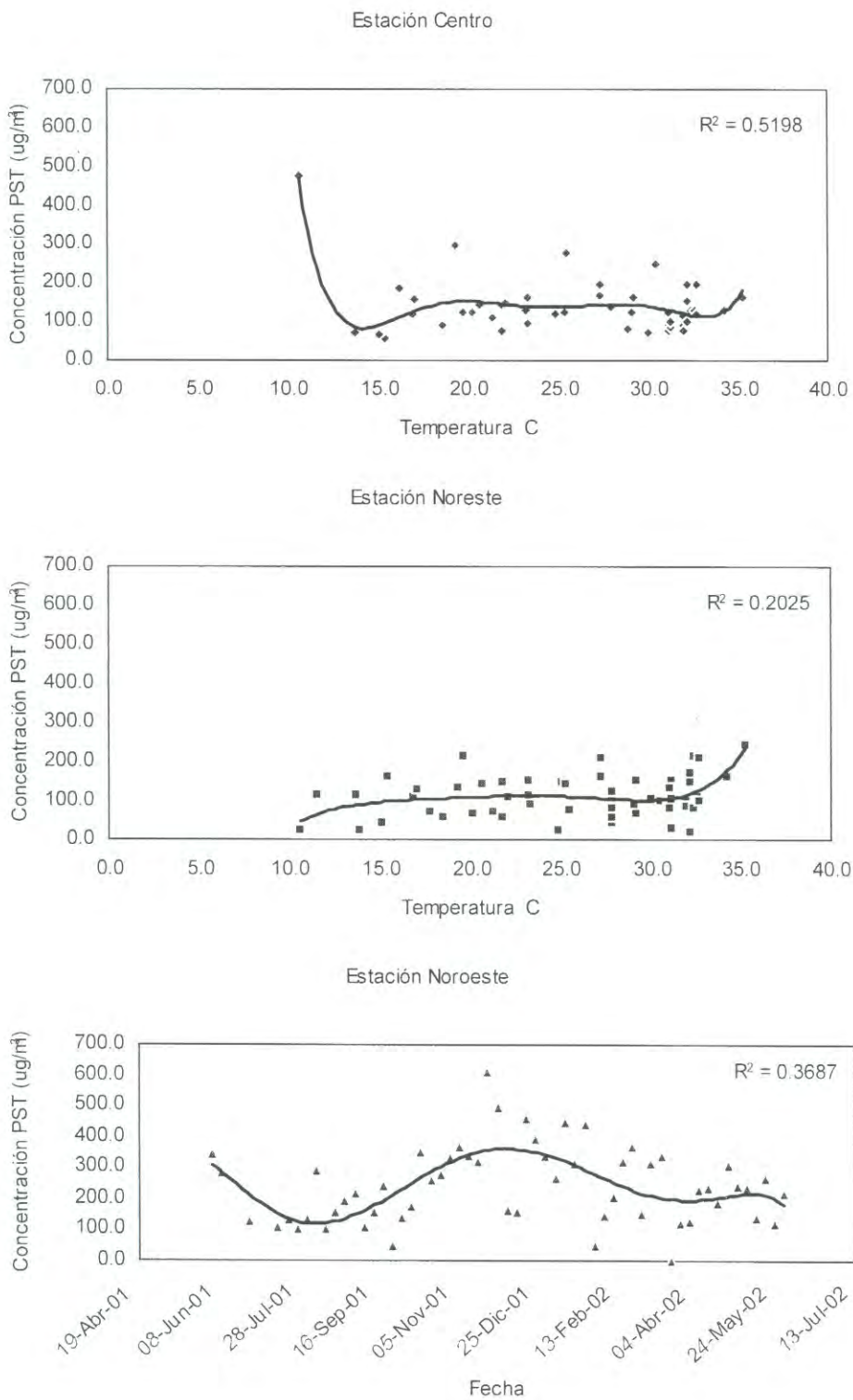


Figura 7. Líneas de Tendencia con mayor valor de correspondencia (R^2) para partículas suspendidas totales (PST) en las estaciones Centro, Noreste y Noroeste.

7.2.4 Comportamiento espacial y temporal de partículas suspendidas totales (PST).

7.2.4.1 Comportamiento espacial. En esta sección del análisis de los resultados, se pretende definir si las concentraciones de PST detectadas en cada ubicación geográfica de monitoreo son iguales o diferentes a fin de priorizar por áreas la calidad del aire respecto de este parámetro. Con la finalidad de identificar si la distribución de los valores detectados de PST presenta normalidad, se realizaron gráficas de normalidad por cuantiles utilizando el programa estadístico JMP (SAS Inst., 2001); así mismo, se graficaron las concentraciones por ubicación y se obtuvieron los valores promedio y desviación estándar para cada una. En la figura 8 se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de PST por cada ubicación, ilustrándose mediante líneas el promedio y la desviación estándar así como la gráfica de normalidad por cuantiles; en esta última se puede apreciar que la distribución de los valores de concentración no siguen la línea de normalidad calculada para cada estación de monitoreo, asumiéndose bajo este criterio, que los valores de concentración obtenidos no se distribuyen normalmente.

Una vez que se determinó que la distribución de las concentraciones de PST no presentaban normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Van der Waerden (Conover, 1971), a fin de identificar si existe diferencia en los niveles de concentración entre cada estación de monitoreo; para ello se recurrió al programa estadístico JMP (SAS, 2001). En el Anexo 4, se presentan los resultados obtenidos en esta prueba, lo cuales se analizan a continuación. Los elementos considerados para definir si las concentraciones en las tres ubicaciones son iguales o diferentes, fueron las siguientes:

Hipótesis: H_0 : Centro=Noreste=Noroeste
 H_1 : alguna estación es diferente

Nivel de significancia: $\alpha=5\%$

Estadístico de prueba: Van der Waerden (Aproximación χ^2).

El resultado del estadístico de prueba para χ^2 fue de 47.91, mientras que el valor en tablas de χ^2 para indicar el valor de aceptación de H_0 es de 5.9915, por lo que claramente se determina que el valor del estadístico de prueba se encuentra en la región de rechazo, dando como conclusión la aceptación de H_1 , o sea que al menos una de las tres estaciones monitoreadas es diferente en cuanto a su distribución de concentración de PST.

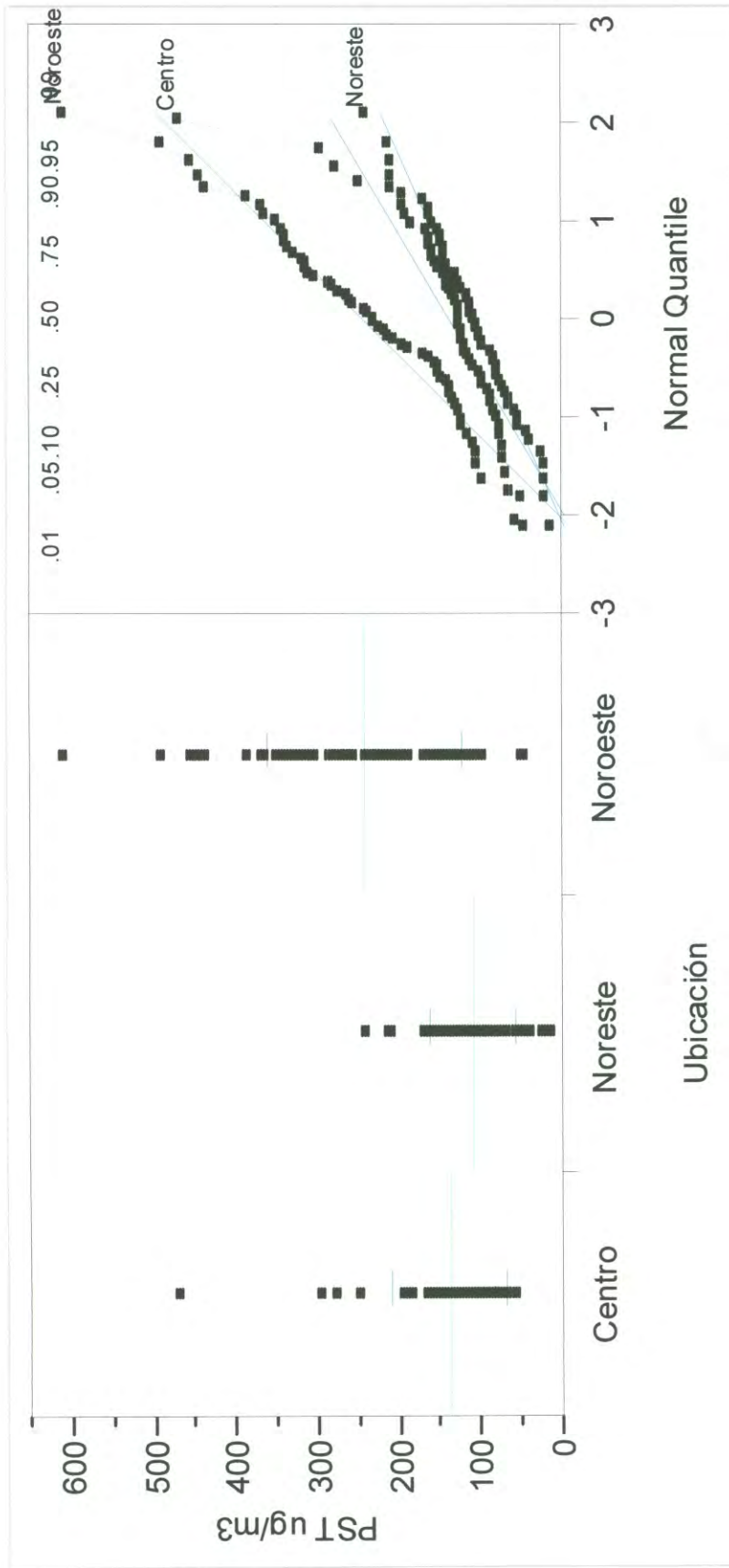


Figura 8. Distribución de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en las tres estaciones de monitoreo

Para definir la diferencia entre las concentraciones de PST de las estaciones de monitoreo, se aplicó la prueba a posteriori de Van der Waerden, a través de la cual se identifica la diferencia entre las estaciones de monitoreo. En el Anexo 5, se presentan los resultados del estadístico de prueba; en donde se identifica que la distribución de concentraciones de PST detectadas en las tres estaciones de monitoreo, son estadísticamente diferentes entre sí a un nivel de confianza del 95%. Con esta aseveración y utilizando los valores promedio de concentración de PST de cada ubicación se puede concluir que la Estación de monitoreo Noroeste (CBTIS) es la que presenta mayor concentración de partículas en el aire ambiente, seguida de la ubicación de monitoreo Centro (Mazón) y finalmente la Noreste (CESUES) (Tabla 22).

7.2.4.2 Comportamiento temporal. Es importante definir también si las concentraciones de PST son iguales o diferentes a lo largo del año. Para este análisis, los resultados de concentraciones fueron agrupados por las estaciones del año a fin de poder priorizar por períodos del año acciones correctivas o preventivas en caso de identificar una mala calidad del aire respecto de este parámetro. Al igual que en el análisis espacial, con la finalidad de identificar si la distribución de los valores detectados de PST presenta normalidad se realizaron las gráficas de normalidad por cuantiles utilizando el programa estadístico JMP (SAS Inst., 2001), graficándose las concentraciones por estación del año y obteniéndose los valores promedio y desviación estándar para cada estación del año (ver Anexo 4).

En la figura 9 se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de PST por cada estación del año, ilustrándose el promedio y la desviación estándar mediante líneas, así como la gráfica de normalidad por cuantiles; en esta última se puede apreciar que la distribución de los valores de concentración no siguen la línea de normalidad calculada para cada estación del año, asumiéndose que los valores de concentración no se distribuyen normalmente.

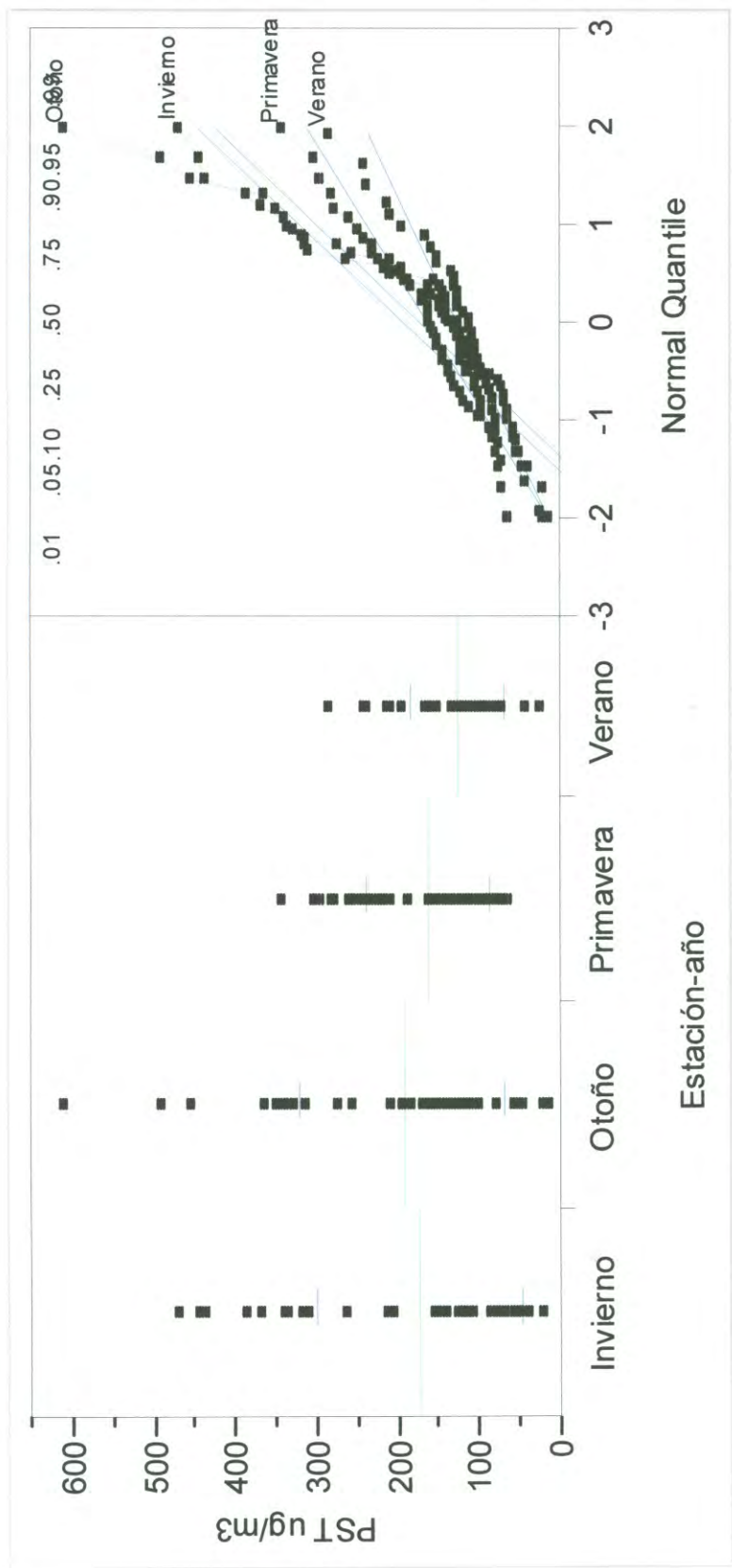


Figura 9. Distribución de concentraciones de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) según estación del año.

Debido a que las distribuciones de las concentraciones de PST no presentan normalidad en la escala temporal dada, se llevó a cabo la prueba no paramétrica de Van der Waerden a fin de identificar si existe diferencia entre las concentraciones detectadas para cada estación del año, utilizándose para ello el programa estadístico JMP (2001). En el Anexo 4 se presentan los resultados obtenidos. Los elementos considerados para definir si las concentraciones en las diferentes estaciones del año son iguales o diferentes, fueron las siguientes:

Hipótesis:	H_0 : primavera=verano=otoño=invierno H_1 : alguna estación del año es diferente
Nivel de significancia:	$\alpha = 5\%$
Estadístico de prueba:	Van der Waerden (Aproximación χ^2)

El resultado del estadístico de prueba para χ^2 fue de 6.7397, mientras que el valor en tablas de χ^2 para indicar el rango de aceptación de H_0 es de 7.8147, por lo que se determina que el valor del estadístico de prueba se encuentra en la región de aceptación, dando como resultado la aceptación de H_0 , o sea que se puede decir con un 95% de confianza que no existe diferencia significativa entre las concentraciones detectadas de PST a lo largo del año en las tres estaciones de monitoreo. Es pertinente señalar que el valor obtenido del estadístico de prueba se encuentra muy cercano al valor de aceptación dado a este nivel de significancia, por lo que muy probablemente en el siguiente nivel mayor de significancia (10%), H_0 sea rechazado y pueda asumirse que existe diferencia en los valores de concentración de PST entre las estaciones del año. Esta observación sería relevante en el caso de tener que definir prioridades de acción ya sean preventivas o correctivas en épocas críticas, ya que obviamente tendrían que iniciarse o enfatizarse dichas acciones en las temporadas de mayor concentración de PST.

Sin duda que el comportamiento de las concentraciones de contaminantes en el aire pueden ser evaluados a partir de diferentes rangos de temporalidad, por ejemplo, diario, mensual, trimestral, semestral o anual; sin embargo, los resultados a obtenerse deberán ser congruentes con los objetivos de cada estudio, en este caso, desde el inicio el objetivo del presente trabajo es obtener información de las concentraciones diarias y promedio anual a fin de compararse con los valores máximos permisibles establecidos en la normatividad de calidad del aire, pero además aportar información básica de los parámetros analizados para subsecuentes investigaciones.

7.3 Metales Pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

7.3.1 Concentraciones de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) por estación de monitoreo.

En el Anexo 6, se presentan los valores de concentración de metales pesados (plomo, cadmio, níquel, cobre y cromo) detectados en aire ambiente para los días muestreados en cada estación de monitoreo. Los resultados fueron obtenidos mediante el análisis de los metales de interés en los filtros proporcionados por el H. Ayuntamiento de Hermosillo y utilizando el volumen total de aire muestreado (m^3) de cada día (Anexo 1). En la Tabla 23 se presenta el resumen de valores de concentración considerando mínimo, promedio y máximo para cada metal analizado en el periodo de estudio por estación de monitoreo.

Respecto de los resultados obtenidos y de acuerdo a la Tabla 18 en la que se presentan los valores de límite de detección obtenidos para cada metal, es importante señalar que aunque fue posible identificar bajas concentraciones de metales, un porcentaje importante de dichos valores de concentración se encuentran por debajo de esos límites de detección, como se describe a continuación.

Respecto al plomo, para la estación Centro (Mazón) de los 50 filtros analizados de muestras, se identificaron 32 valores por debajo del límite de detección ($0.034 \mu g/m^3$) representando el 64% del total. Para la estación Noreste (CESUES) se tuvieron 35 concentraciones de las 56 determinadas en esta situación lo que significa un 62.5% y para la estación Noroeste (CBTIS 206) se identificaron 29 valores abajo del límite de detección de las 53 determinaciones correspondiendo al 54.7%.

En relación al cadmio, es importante señalar que no se obtuvo ningún valor de concentración mayor al límite de detección ($0.036 \mu g/m^3$).

En relación al níquel cuyo valor límite de detección fue de $0.015 \mu g/m^3$, para la estación Centro se identificaron 41 valores por debajo del límite de los 50 filtros analizados representando el 82%. Para la estación Noreste (CESUES) se identifican 47 concentraciones por abajo del límite de detección de las 56 determinaciones realizadas, lo que significa un 83.9%; en cuanto a la estación Noroeste (CBTIS) se identificaron 33 concentraciones por debajo del límite de detección de las 53 lecturas totales, correspondiendo al 62.2%.

Tabla 23. Valores de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados detectados en aire ambiente de la Ciudad de Hermosillo, Sonora durante el período junio de 2001 a mayo de 2002.

Metal	Valor	Estación Centro (Mazón)	Estación Noreste (CESUES)	Estación Noroeste (CBTIS)
PLOMO	Mínimo	0.00	0.00	0.00
	Promedio	0.025	0.021	0.031
	Máximo	0.080	0.068	0.081
CADMIO	Mínimo	0.00	0.00	0.00
	Promedio	0.00043	0.00013	0.00051
	Máximo	0.007	0.004	0.009
NIQUEL	Mínimo	0.00	0.00	0.00
	Promedio	0.009	0.008	0.012
	Máximo	0.025	0.021	0.027
COBRE	Mínimo	0.005	0.013	0.013
	Promedio	0.042	0.043	0.045
	Máximo	0.218	0.119	0.112
CROMO	Mínimo	0.00	0.00	0.00
	Promedio	0.008	0.007	0.010
	Máximo	0.028	0.019	0.023

Referente al cobre, para la estación Centro (Mazón) se observó que de las 50 muestras leídas, solamente 7 presentaron una concentración menor al límite de detección ($0.024 \mu\text{g}/\text{m}^3$), representando el 14%; para la estación Noreste (CESUES) se detectaron 9 datos con concentraciones menores al límite de detección, lo que significa un 16% de los 56 datos de esta estación. Para la estación Noroeste (CBTIS) se identificaron solo 5 valores menores al límite de los 53 datos de la estación, representando un 9.4%.

Finalmente en relación al cromo, solamente se identificaron 2 valores mayores al límite de detección ($0.024 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en todos los muestreos realizados en el período de estudio y ambos fueron en la estación centro (Mazón).

7.3.2 Comparación con los Máximos Permisibles para Metales Pesados.

7.3.2.1 Plomo. En México existe un valor normado de máximo permisible para plomo establecido en la NOM-026-SSA1-1993 (DOF, 1993), correspondiendo a un valor de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en un período de tres meses promedio aritmético, siendo idéntico a la normativa establecida en EUA (CFR 40, 1992).

Como puede observarse en la Tabla 23, el valor máximo detectado de este metal es de $0.081 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo cual puede establecerse que la concentración de plomo en el aire ambiente para el período de estudio no rebasó el máximo permisible de la norma mexicana citada.

Existen otros criterios de calidad del aire mas estrictos como el de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2000a), que establece para plomo un máximo permisible de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio anual, así como el de la Comisión de la Comunidad Europea (2003) que establece un valor $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor límite anual para la protección de la salud humana, pero además establece concentraciones umbrales: superior del 70% del máximo permisible ($0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el umbral inferior del 50% del máximo permisible ($0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) concentraciones a las cuales se deberán implementar acciones de control en caso de rebasarse.

Sin embargo los valores detectados de plomo en el aire ambiente de Hermosillo, siguen estando por debajo de dichos criterios. En la figura 10 se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de Plomo detectadas para las tres estaciones de monitoreo a lo largo del período de estudio.

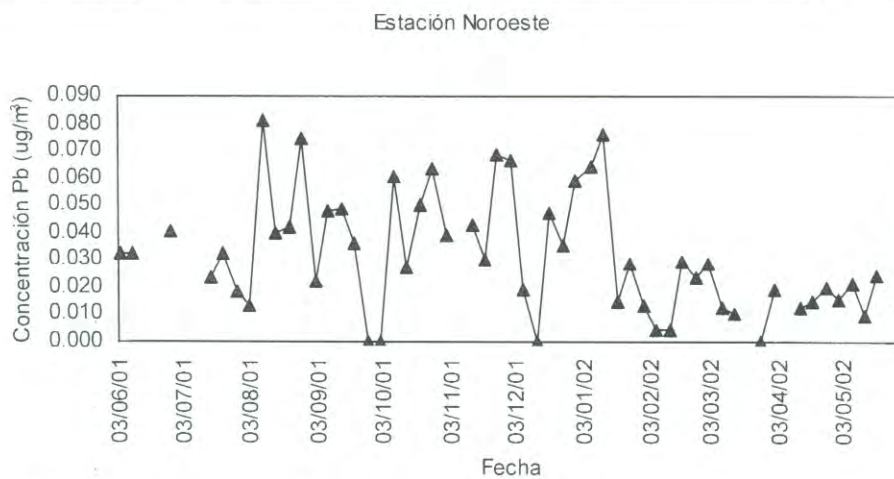
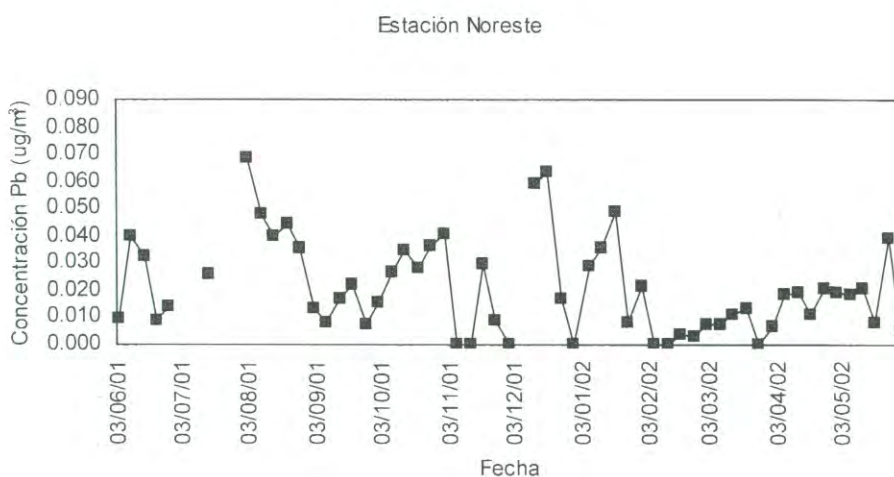
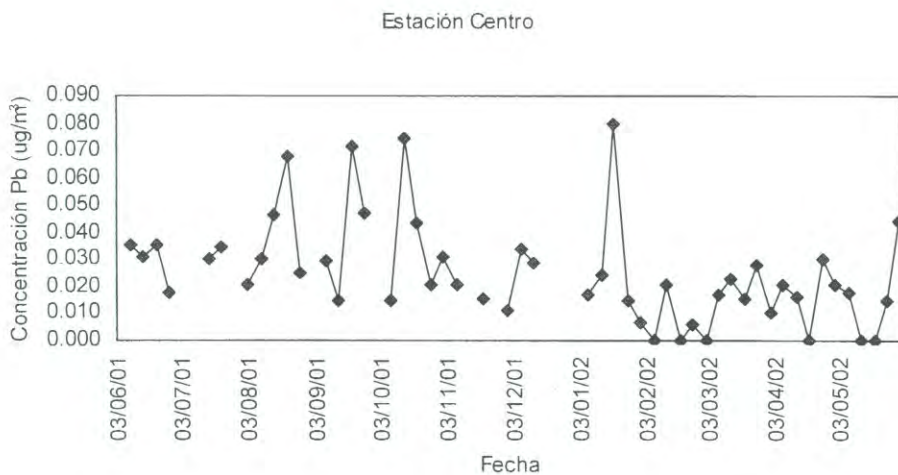


Figura 10. Concentraciones detectadas de Plomo por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.

7.3.2.2 **Cadmio.** En México no existe normatividad sobre este metal, sin embargo a nivel internacional existen criterios como el de la WHO (2000a), que establece un valor de $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual, similar al propuesto por la Comisión de Comunidades Europeas (2003) a cumplirse a más tardar en el año 2008. Es importante señalar que en muy pocas muestras se detectaron trazas de cadmio; por ejemplo, para la estación Centro (Mazón) solamente en cuatro días se detectaron trazas de este metal, para la estación Noreste (CESUES) solo en dos días, mientras que para la estación Noroeste (CBTIS) fueron cinco días en el total del período de estudio (anexo 6, tabla 6b).

Es importante señalar que los valores de concentración de cadmio presentados en la tabla 6b del anexo 6 se encuentran muy por debajo del límite de detección ($0.036 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por lo que para fines de calidad del aire puede señalarse que solo se detectaron trazas de este metal en el aire, mientras que para fines de tener un comparativo aproximado con los criterios señalados, podría decirse que los promedios de concentración anual de cadmio en las tres estaciones (0.00043 , 0.00013 y $0.00051 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se encuentran muy por debajo del criterio señalado ($0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En la figura 11 se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de cadmio detectadas para las tres estaciones de monitoreo a lo largo del año.

7.3.2.3 **Níquel.** En México no existen normas respecto de valores máximos permisibles de este metal en aire. Sin embargo para fines de establecer la calidad del aire basado en las concentraciones detectadas de este metal, en el presente trabajo se señalan los criterios establecidos por la Comisión de las Comunidades Europeas (2003), que fijan un valor umbral para níquel de $20 \text{ ng}/\text{m}^3$ en promedio anual a cumplirse para diciembre de 2008. De acuerdo a la Tabla 23, los promedios obtenidos de concentración de níquel en el período anual analizado fueron de 0.009 , 0.008 y $0.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para las estaciones Centro (Mazón), Noreste (CESUES) y Noroeste (CBTIS) respectivamente. De acuerdo a la referencia de calidad del aire citada, dichos valores se encontrarían cumpliendo con dicho criterio. Otros criterios de calidad del aire son más laxos en cuanto a concentración permisible, como por ejemplo el del Ministerio de Salud de Rusia (EEA, 2004) que establece un valor límite de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. En la figura 12, se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de níquel detectadas para las tres estaciones de monitoreo a lo largo del año.

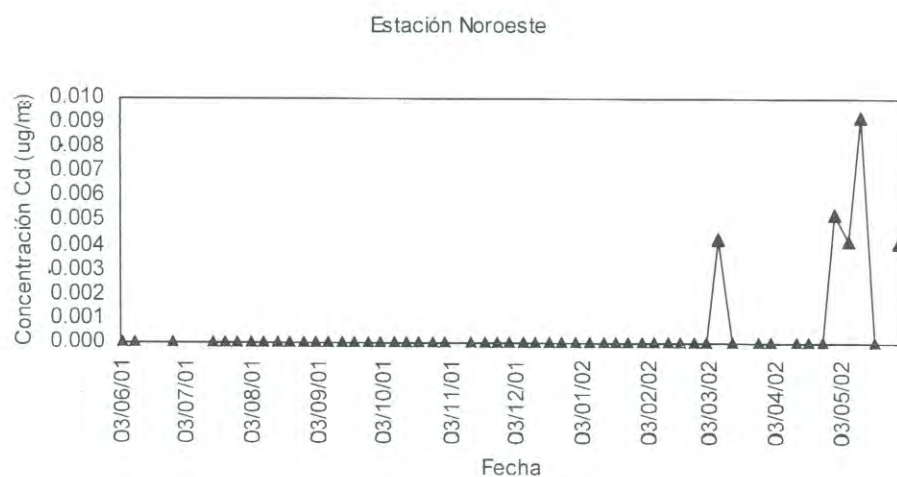
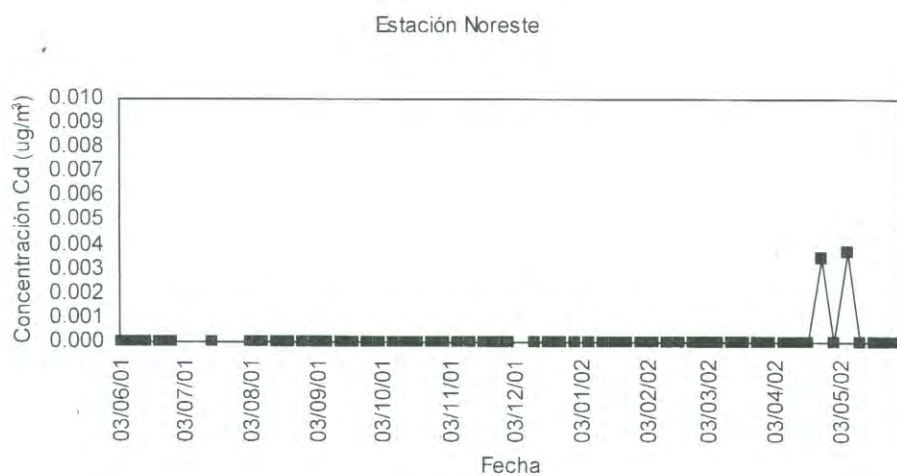
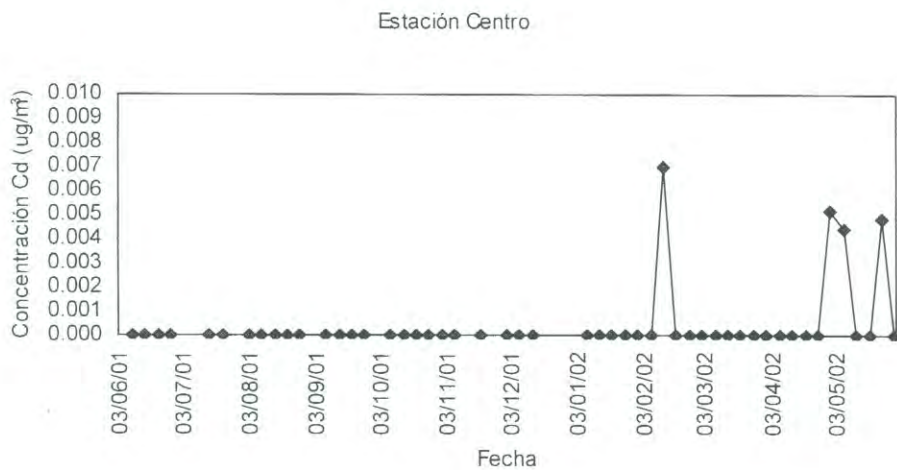


Figura 11. Concentraciones detectadas de Cadmio por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.

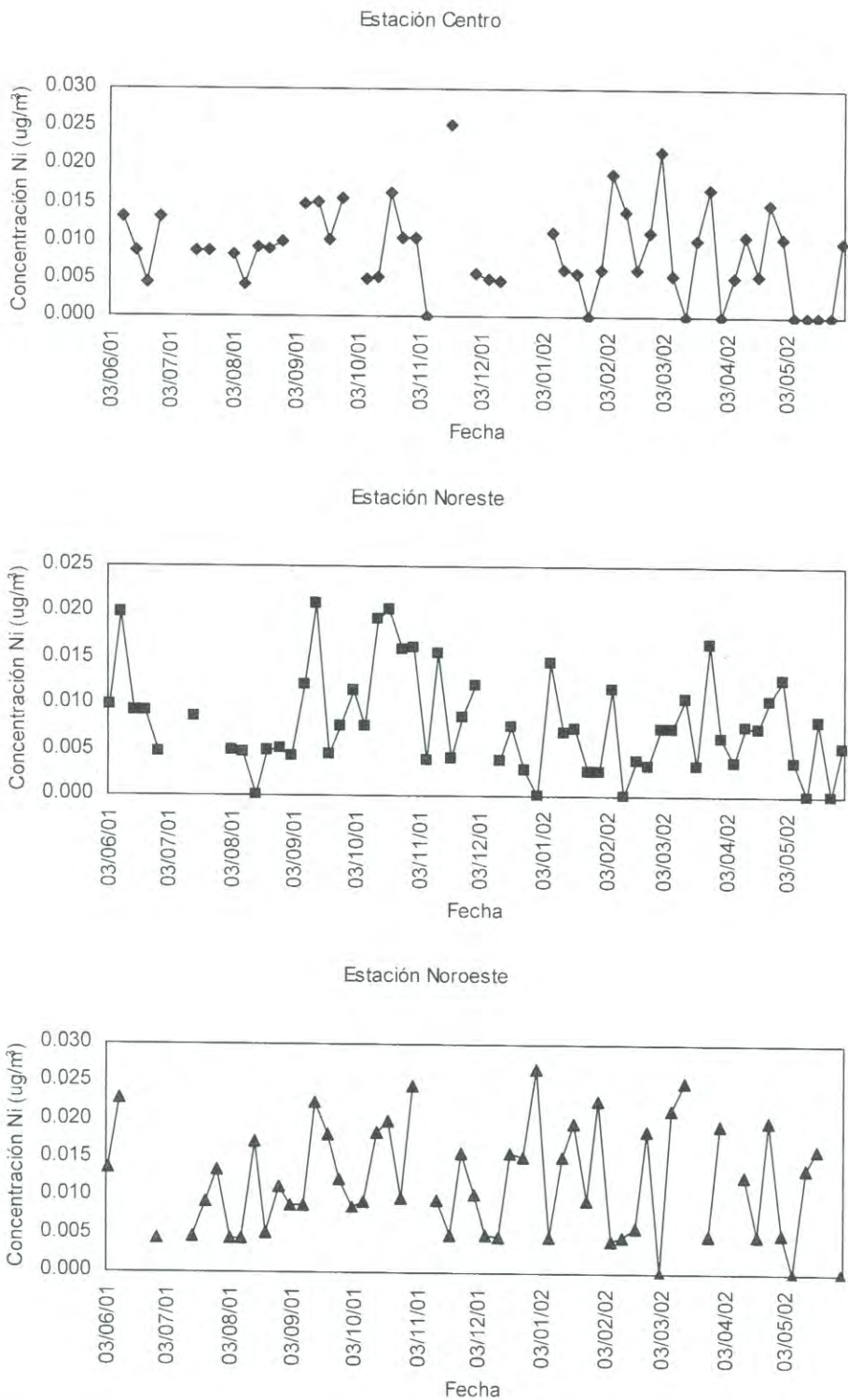


Figura 12. Concentraciones detectadas de Níquel por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.

7.3.2.4 **Cobre.**- Al igual que para los dos metales anteriores, en México no existen máximos permisibles de calidad del aire para cobre, por lo que para fines de comparar los resultados de este metal con criterios de calidad se tomaron referencias internacionales, por ejemplo el criterio establecido en la base de datos STAR de la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2004), que tiene registrado un estándar de calidad de aire ambiente para cobre con un valor límite de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para control de calidad del aire para áreas pobladas.

De acuerdo a los resultados de concentración de este metal presentados en la Tabla 23, se observa que los valores máximos detectados fueron 0.218, 0.119 y $0.112 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las estaciones Centro (Mazón), Noreste (CESUES) y Noroeste (CBTIS) respectivamente, encontrándose dentro del criterio de calidad del aire citado.

En la figura 13 se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de cobre detectadas para las tres ubicaciones de monitoreo a lo largo del año.

7.3.2.5 **Cromo.** Actualmente en México no existe regulación respecto a este metal en el aire ambiente. A fin de tener elementos de comparación para los resultados obtenidos se utilizó el criterio considerado en la base de datos de la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2004) en la que aparece registrado el estándar de calidad de aire ambiente para niveles de cromo con un valor límite de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio diario, según la guía establecida por el gobierno de Lituania para la concentración máxima permisible en el aire en áreas residenciales.

De acuerdo a los resultados de la tabla 23, los valores máximos detectados por día fueron de 0.028, 0.019 y $0.023 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las tres estaciones de monitoreo, los cuales se encuentran por debajo del valor de referencia citado como criterio de calidad diario. En la figura 14, se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de cromo detectadas para las tres estaciones de monitoreo a lo largo del año.

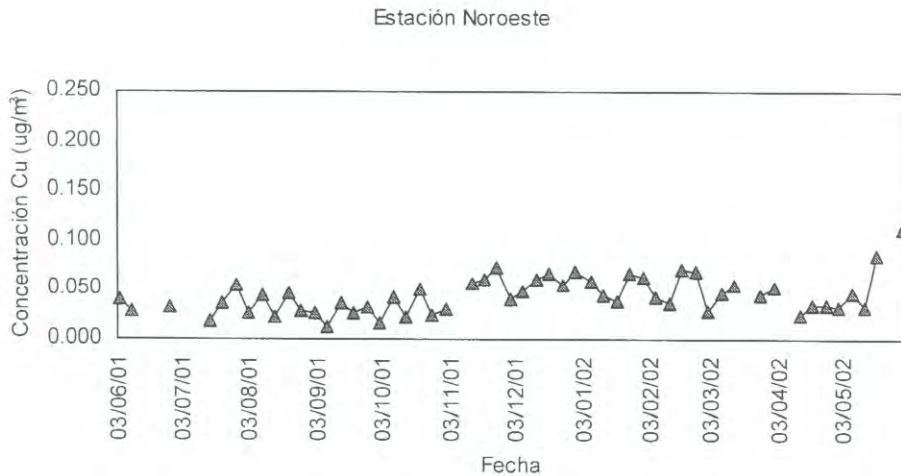
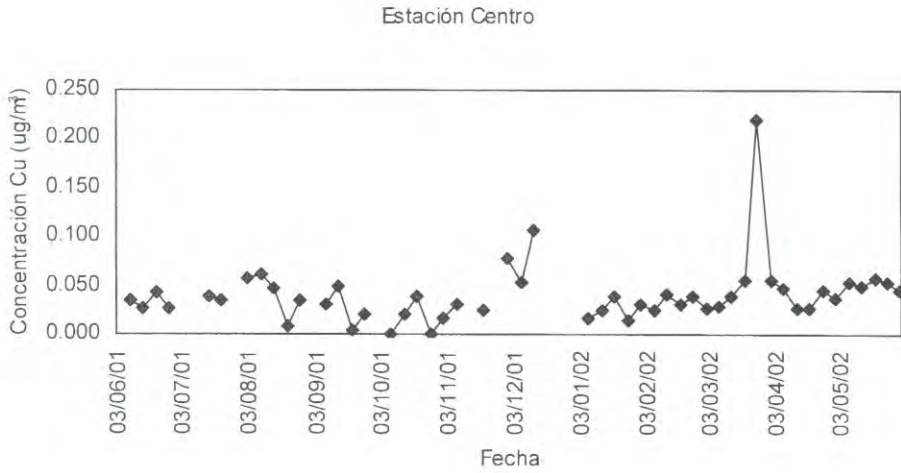


Figura 13. Concentraciones detectadas de Cobre por estación de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.

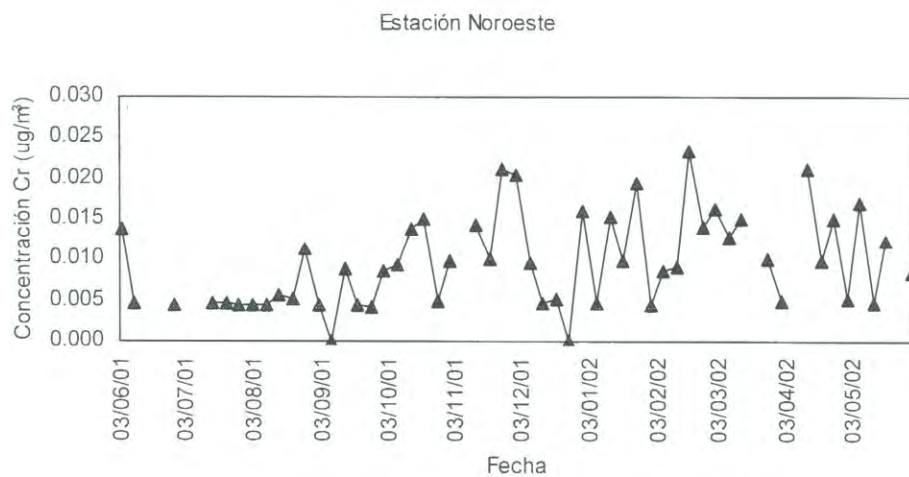
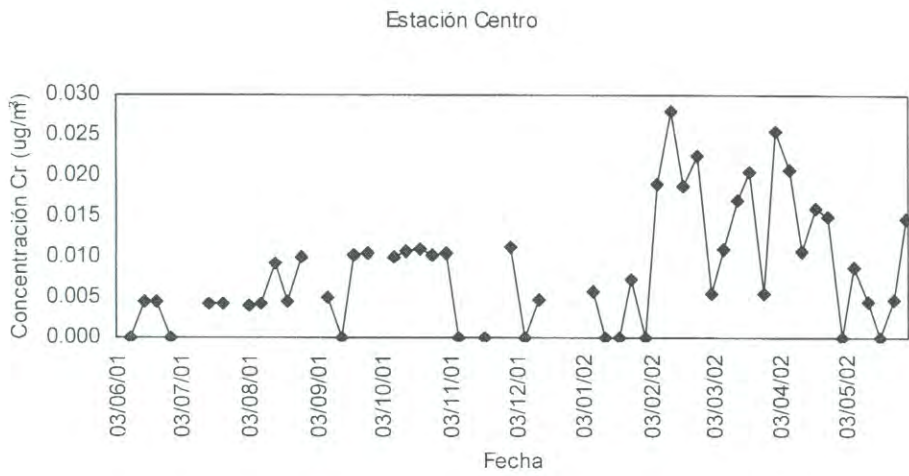


Figura 14. Concentraciones detectadas de Cromo por estación de monitoreo, durante el periodo de junio de 2001 a mayo de 2002.

7.3.3 Líneas de Tendencia de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) con datos climáticos.

Al igual que con PST, y con la finalidad de identificar si la distribución de concentración de metales pesados está relacionada a los elementos atmosféricos, se llevaron a cabo pruebas de líneas de tendencia entre las series de valores de concentración de metales en aire ambiente de cada estación de monitoreo a lo largo del periodo de estudio. Se obtuvo el Coeficiente de Determinación (R^2), tratando de buscar la mayor correspondencia entre los siguientes parámetros climáticos: Temperatura diaria promedio ($^{\circ}\text{C}$), Presión (mmHg), Velocidad de viento (m/s) y Humedad (%); además se calculó la R^2 para cada estación involucrando la fecha y las concentraciones detectadas, asumiendo que la fecha implica el conjunto de variables climáticas a lo largo del tiempo. Los valores de R^2 fueron calculados mediante el programa estadístico JMP (SAS Inst., 2001) utilizando las ecuaciones de tendencia lineal y polinomial de segundo a sexto orden, los resultados se presentan en el Anexo 7. Es importante señalar que en todos los casos, los valores de R^2 , siempre fueron mayores para la línea de tendencia tipo polinomial de sexto orden, por lo que todos los valores de tal coeficiente que se señalan a continuación para cada estación de monitoreo, corresponden a este tipo de línea de tendencia.

En relación al plomo y para la estación Centro (Mazón) la R^2 mas alta se encontró entre este metal y la fecha con un valor de 0.27; en la estación Noreste (CESUES) el parámetro que presentó el coeficiente más alto con el plomo fue la presión barométrica con un valor de 0.29 y en la estación Noroeste (CBTIS) el parámetro que presentó la R^2 mas alta fue la fecha con un valor de 0.25 (figura 15).

Respecto a los resultados de correspondencia obtenidos para el cadmio los valores más altos por estación fueron: para la estación Centro (Mazón) la R^2 mas alta se encontró entre el cadmio y la humedad con un valor de 0.49; para la estación Noreste (CESUES) el parámetro que presentó el valor más alto fue la fecha con un valor de R^2 de 0.23 y respecto a la estación Noroeste (CBTIS) la correspondencia más alta con este metal fue igualmente la fecha con un valor de 0.43 (figura 16).

Referente al níquel, los resultados de Coeficiente de Determinación más altos obtenidos por cada estación fueron: Para la estación Centro se encontró con la velocidad de viento con un valor de 0.35. En la estación Noreste el parámetro que presentó el valor de R^2 más alta fue la fecha con un valor de 0.26; y para la estación Noroeste fue la humedad con un valor de R^2 de 0.15. En la figura 17 se presentan las gráficas de línea de tendencia.

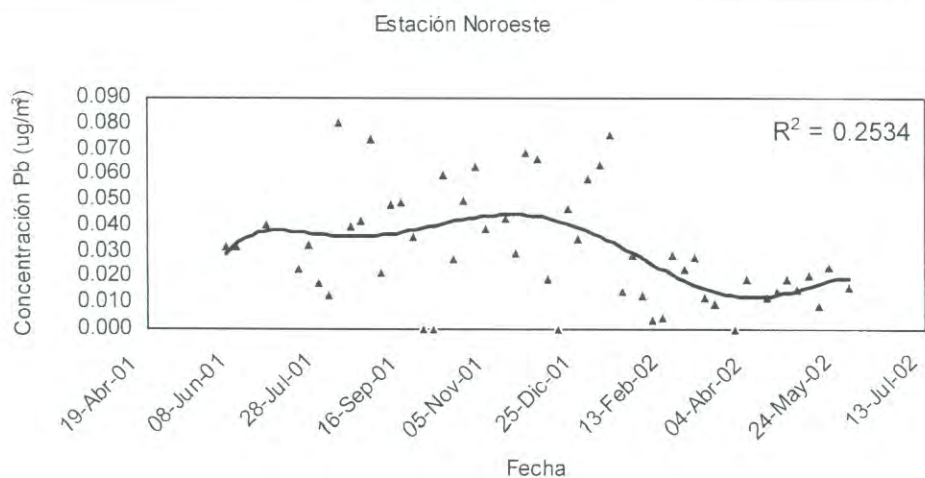
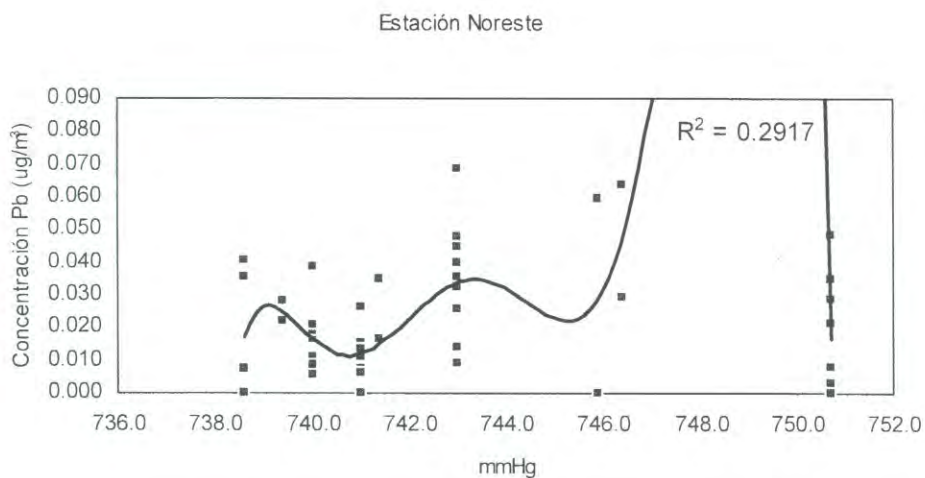
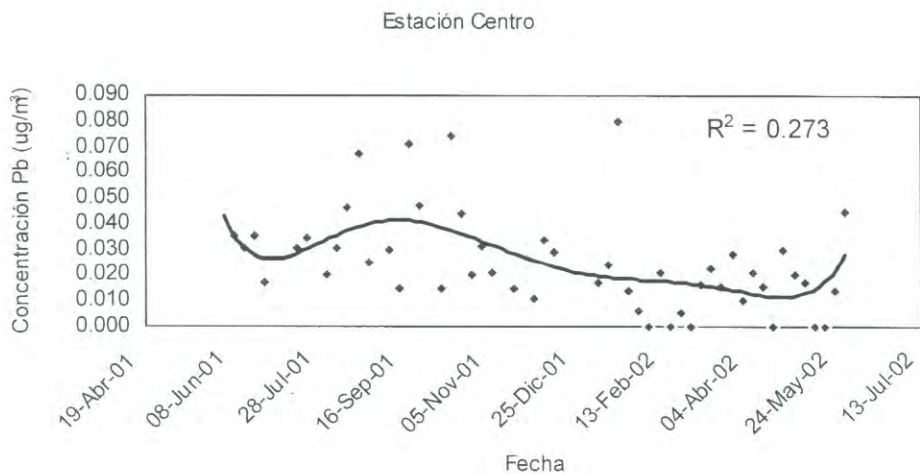


Figura 15. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el plomo en cada estación de monitoreo.

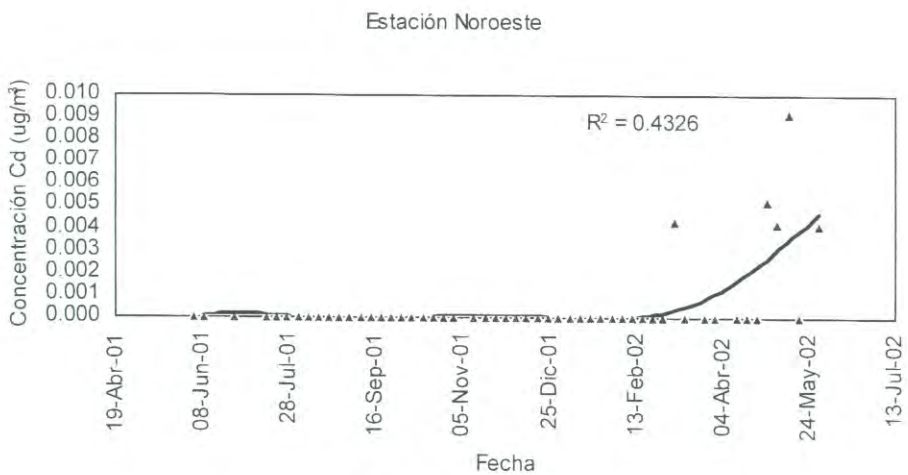
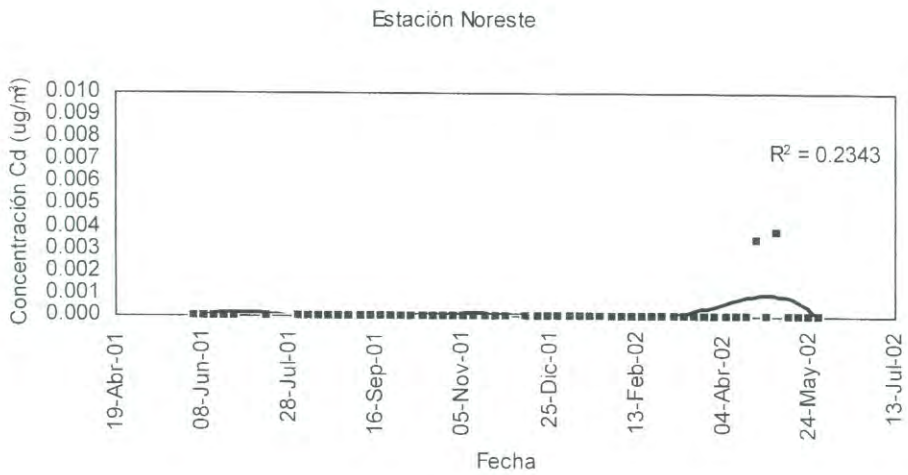
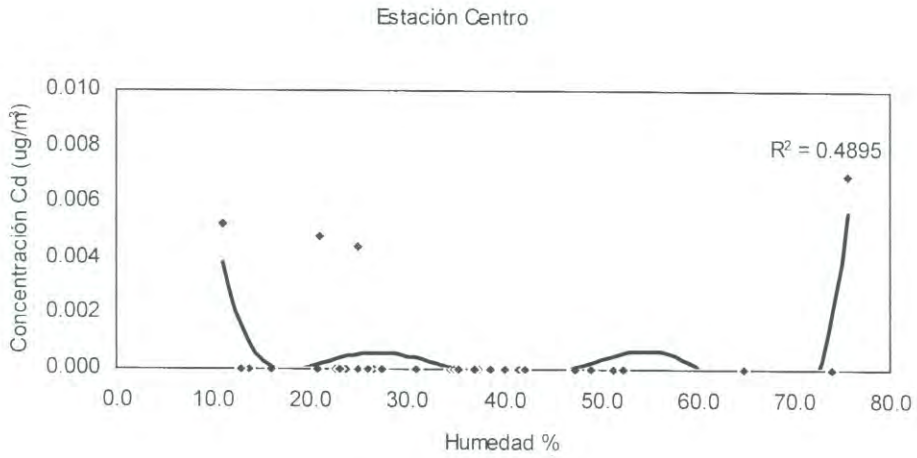


Figura 16. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el cadmio en cada estación de monitoreo

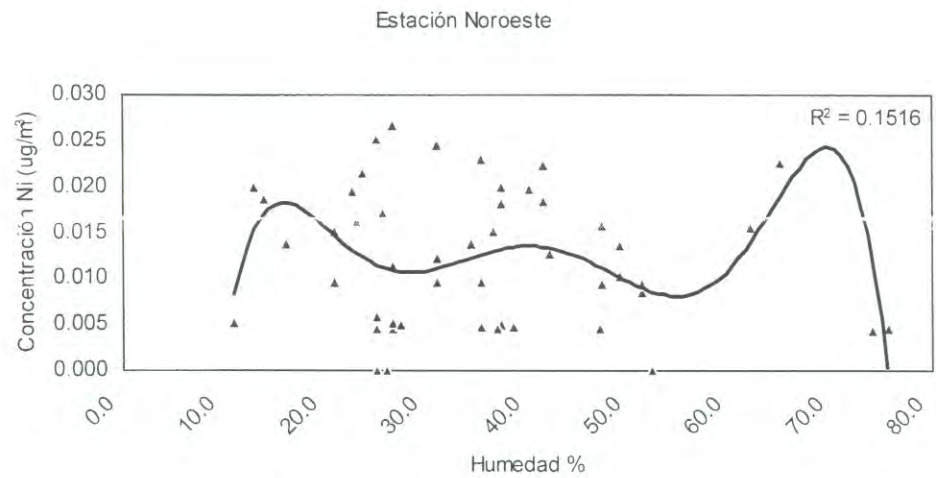
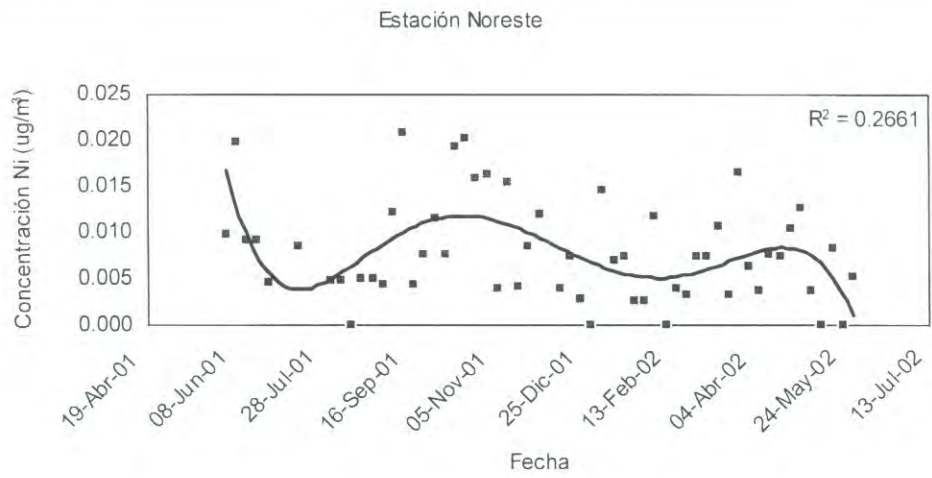
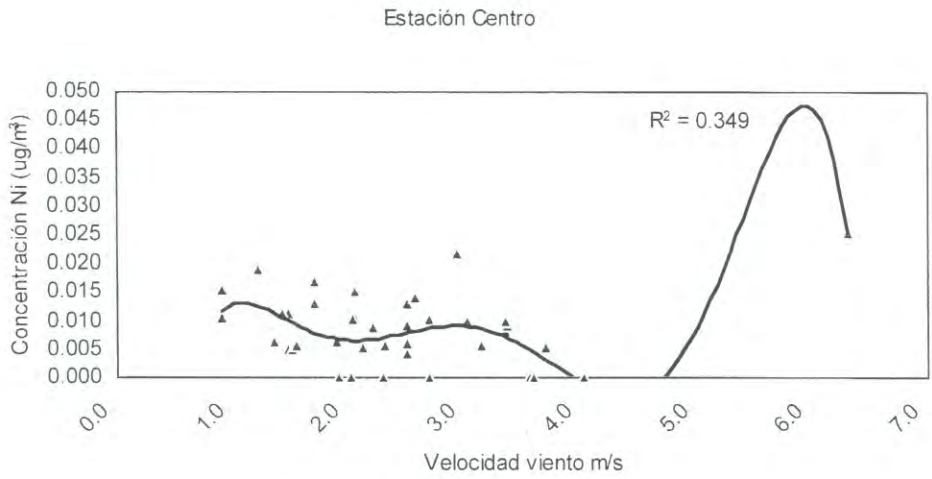


Figura 17. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el níquel en cada estación de monitoreo.

Los valores mas altos del Coeficiente de Determinación obtenidos para el cobre, fueron: para la estación Centro se encontró entre este metal y la temperatura un valor de R^2 de 0.15. Para la estación Noreste el parámetro que presentó el valor de correspondencia más alto con el cobre fue la fecha con un valor de R^2 de 0.33 y para la estación Noroeste la variable que presentó el Coeficiente de Determinación mayor con el Cobre también fue la fecha con un valor de R^2 de 0.58 (figura 18).

Finalmente y referente a los resultados de correspondencia obtenidos para Cromo, los valores de R^2 mas altos por cada estación fueron los siguientes: Para la estación Centro la línea de tendencia con correspondencia mas alta se encontró entre el Cromo y la fecha con un valor de R^2 de 0.38, en la estación Noreste el parámetro que presentó el valor más alto con el cromo fue la temperatura con un valor de R^2 de 0.34, y para la estación Noroeste la variable que presentó la R^2 más alta con el cromo fue la temperatura con un valor de 0.26. En la Figura 19 se presentan las gráficas de estas tendencias.

Como se estableció anteriormente, y para fines de identificar correspondencia entre los elementos ambientales señalados y las concentraciones detectadas de metales pesados en las estaciones de monitoreo, solamente pueden ser consideradas aquellas correspondencias cuyo valor de coeficiente de determinación (R^2) sea mayor a 0.50, por lo que solamente se puede asumir que durante el período de estudio existió correspondencia entre la distribución de las concentraciones de Cobre y la distribución de las fechas (o sea, el tiempo a lo largo del año) para la estación Noroeste (CBTIS). Es importante remarcar que no se tiene la intención de definir patrones o ecuaciones de comportamiento de los parámetros del estudio (PST y Metales Pesados) con fines de predicción si no que únicamente se pretende identificar de manera preliminar los posibles elementos que inciden en las concentraciones de los parámetros contaminantes estudiados a fin de aportar información para futuras investigaciones en las que se pueda determinar la correspondencia de varios elementos ambientales a la vez mediante ecuaciones mas complejas o especializadas.

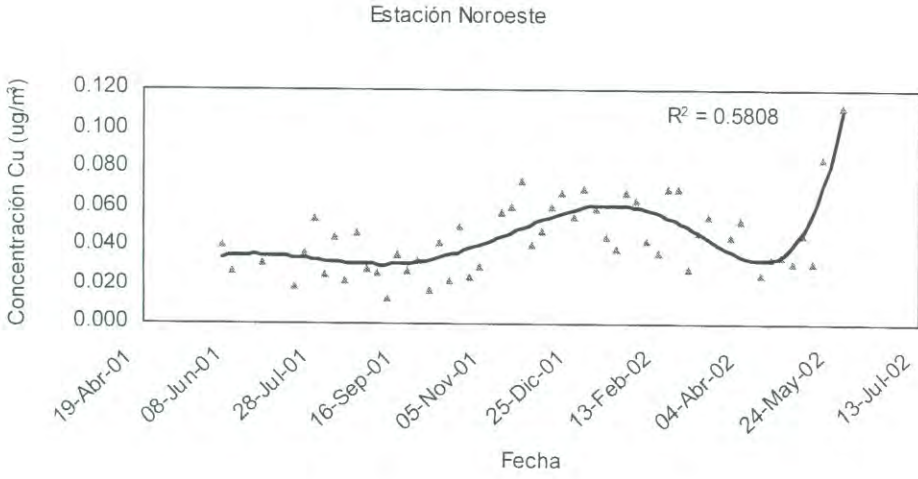
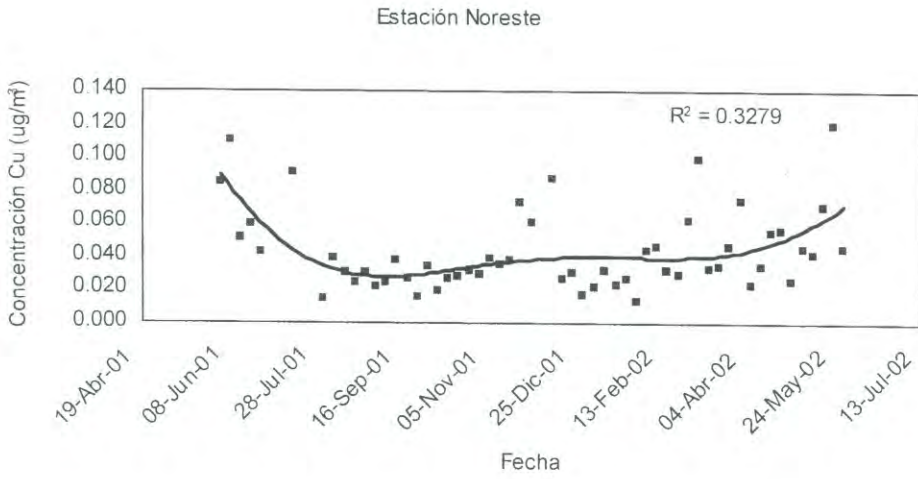
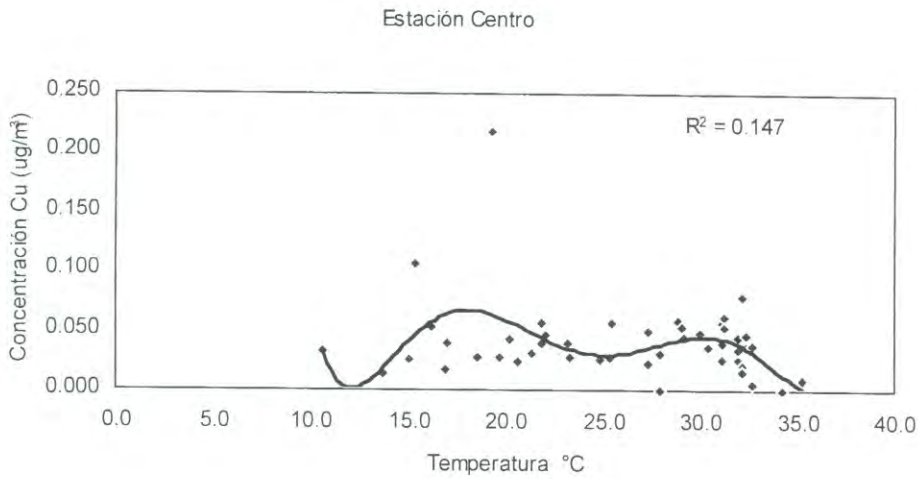


Figura 18. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el cobre en cada estación de monitoreo.

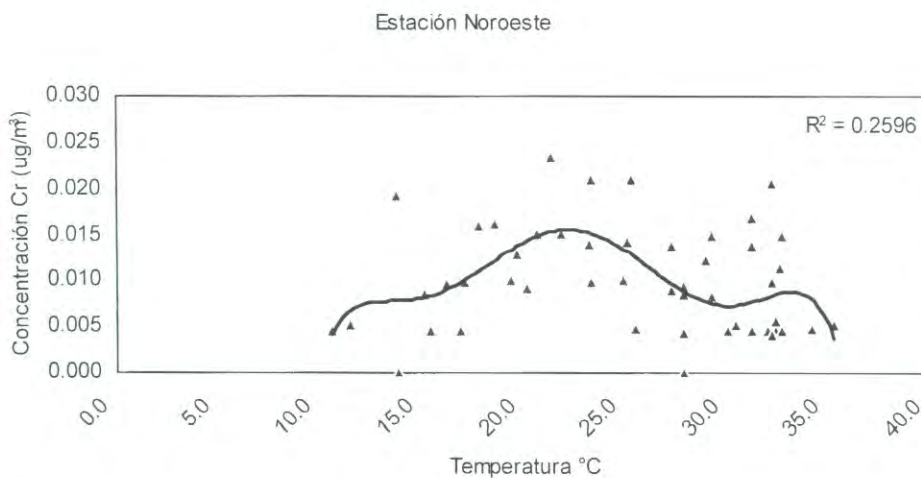
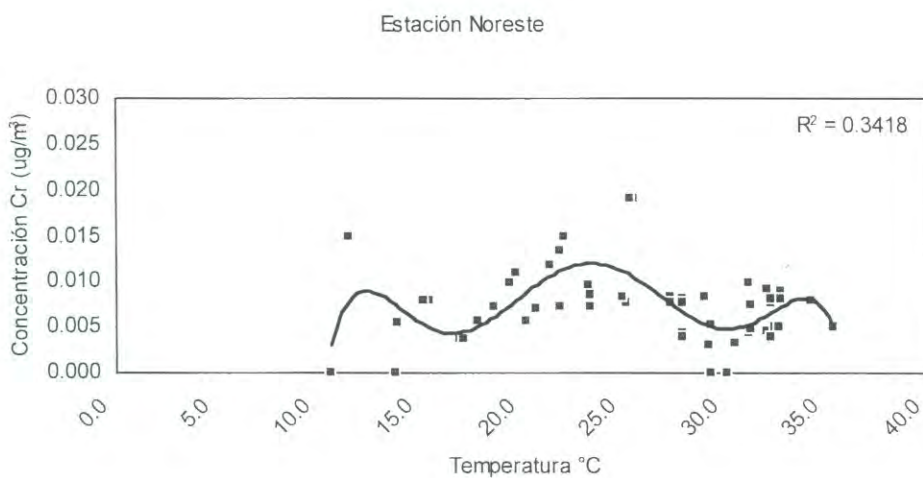
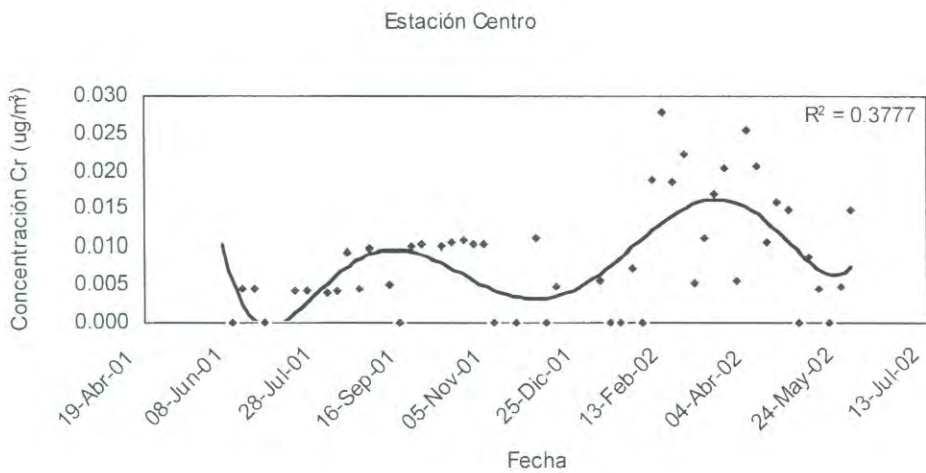


Figura 19. Líneas de tendencia con mayor valor de Coeficiente de Determinación (R^2) para el cromo en cada estación de monitoreo.

7.3.4 Comportamiento Espacial y Temporal de Metales Pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

7.3.4.1 Comportamiento espacial.- Como parte de los resultados se pretende definir si las concentraciones de Metales Pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) detectadas en cada ubicación de monitoreo son iguales o diferentes, esto con la finalidad de priorizar por ubicación la calidad del aire respecto a éstos.

Al igual que con PST, con la finalidad de identificar si la distribución de los valores detectados de Metales Pesados presenta normalidad, se realizaron las gráficas de normalidad por cuantiles utilizando el programa estadístico JMP (SAS Inst., 2001), así mismo se graficaron los valores de concentración de cada metal por ubicación y se obtuvieron los valores promedio y desviación estándar para cada ubicación.

En la figura 20, se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de cada metal por ubicación de monitoreo, ilustrándose mediante líneas el promedio y la desviación estándar en cada caso así como la gráfica de normalidad por cuantiles; en esta última, se puede apreciar para cada metal que la distribución de los valores de concentración no siguen la línea de normalidad calculada para cada ubicación de estación de monitoreo, asumiéndose bajo este criterio, que los resultados obtenidos no se distribuyen normalmente.

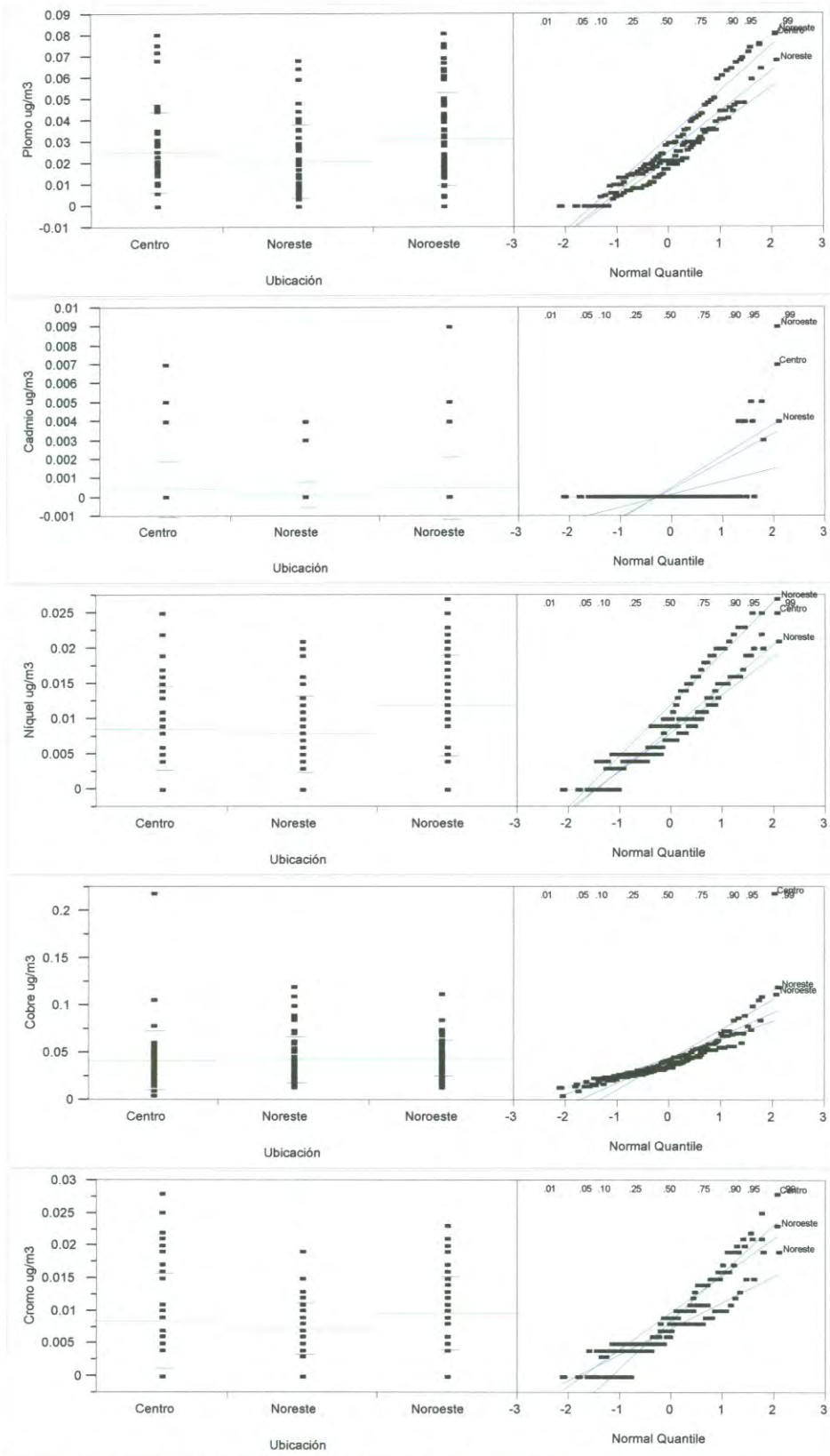


Figura 20. Distribución de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) en las estaciones de monitoreo Centro, Noreste y Noroeste.

Debido a que la distribución de concentraciones de los metales analizados no presentan normalidad, se llevó a cabo la prueba no paramétrica de Van der Waerden a fin de identificar si existe diferencia entre las concentraciones detectadas para cada ubicación de muestreo. En el Anexo 8 se presentan los resultados obtenidos por dicha prueba, lo cuales se analizan a continuación. En el caso de los metales, los elementos considerados para definir si las concentraciones en las tres ubicaciones son iguales o diferentes, fueron las siguientes:

Hipótesis:	H_0 : Centro=Noreste=Noroeste
	H_1 : alguna ubicación es diferente
Nivel de significancia:	$\alpha=5\%$
Estadístico de prueba:	Van der Waerden (Aproximación χ^2)

Los resultados del estadístico de prueba (aproximación χ^2) fueron los siguientes: 7.4069 para plomo, 1.9925 para cadmio, 10.7962 para níquel, 2.2360 para cobre y 4.7606 para cromo, mientras que el valor en tablas de χ^2 para indicar el valor de aceptación de H_0 es de 7.8147, por lo que se determina que para plomo, cadmio, cobre y cromo el valor del estadístico de prueba se encuentra en la región de aceptación de H_0 , dando como conclusión que las tres estaciones de monitoreo no son significativamente diferentes en cuanto a su distribución de concentraciones de los metales de estudio. Por otro lado, solamente para el níquel se determinó que con un nivel de confianza del 95% se puede decir que al menos una de las ubicaciones presenta una distribución de concentraciones estadísticamente diferente a las demás para este metal.

Para definir la diferencia entre la distribución de las concentraciones de níquel en las tres estaciones de monitoreo, se llevó a cabo la prueba a posteriori correspondiente a Van der Waerden mediante la cual se realizan comparaciones múltiples por pares de ubicaciones. En el Anexo 9 se presentan los resultados del estadístico de prueba, en donde se identifica que las ubicaciones Centro y Noreste son iguales en cuanto a su distribución de concentración; mientras que la ubicación Noroeste es diferente a las otras dos. De acuerdo a lo anterior, y analizando los promedios de concentraciones de este metal las cuales fueron: 0.009, 0.008 y 0.012 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para las ubicaciones Centro, Noreste y Noroeste respectivamente. Es posible asumir que la estación noroeste es estadísticamente diferente a las demás, siendo sus valores de concentración superiores.

7.3.4.2 Comportamiento temporal. Para definir si las concentraciones detectadas de los metales pesados analizados son iguales o diferentes a lo largo del año, los resultados de concentraciones fueron agrupados por las estaciones del año a fin de poder priorizar por períodos del año acciones correctivas o preventivas en caso de identificar una mala calidad del aire respecto de este parámetro. Posteriormente y con la finalidad de identificar si la distribución de los valores detectados de metales pesados presentan normalidad, se realizaron las gráficas de normalidad por cuantiles utilizando el programa estadístico JMP (SAS Inst., 2001), graficándose además las distribuciones de concentraciones por estación del año y sus valores promedio y desviación estándar para cada estación.

A continuación en la figura 21 se presentan la gráfica de distribución de concentraciones de los metales analizados por cada estación del año ilustrándose el promedio y la desviación estándar mediante líneas, así como la gráfica de normalidad por cuantiles. En esta última se puede apreciar que la distribución de los valores de concentración no sigue la línea de normalidad calculada para cada estación del año, asumiéndose bajo este criterio, que los resultados obtenidos tampoco se distribuyen normalmente.

A partir de que las distribuciones de las concentraciones de Metales Pesados no presentan normalidad en la escala temporal dada, se realizó la prueba no paramétrica de Van der Waerden a fin de identificar si existe diferencia entre las concentraciones detectadas para cada estación del año. En el Anexo 8, se presentan los resultados obtenidos. Los criterios considerados para definir si las concentraciones en las diferentes estaciones del año son iguales o diferentes, fueron las siguientes:

Hipótesis:	H_0 : primavera=verano=otoño=invierno
	H_1 : alguna estación es diferente
Nivel de confianza:	$\alpha = 5\%$
Estadístico de prueba:	Van der Waerden (Aproximación χ^2)

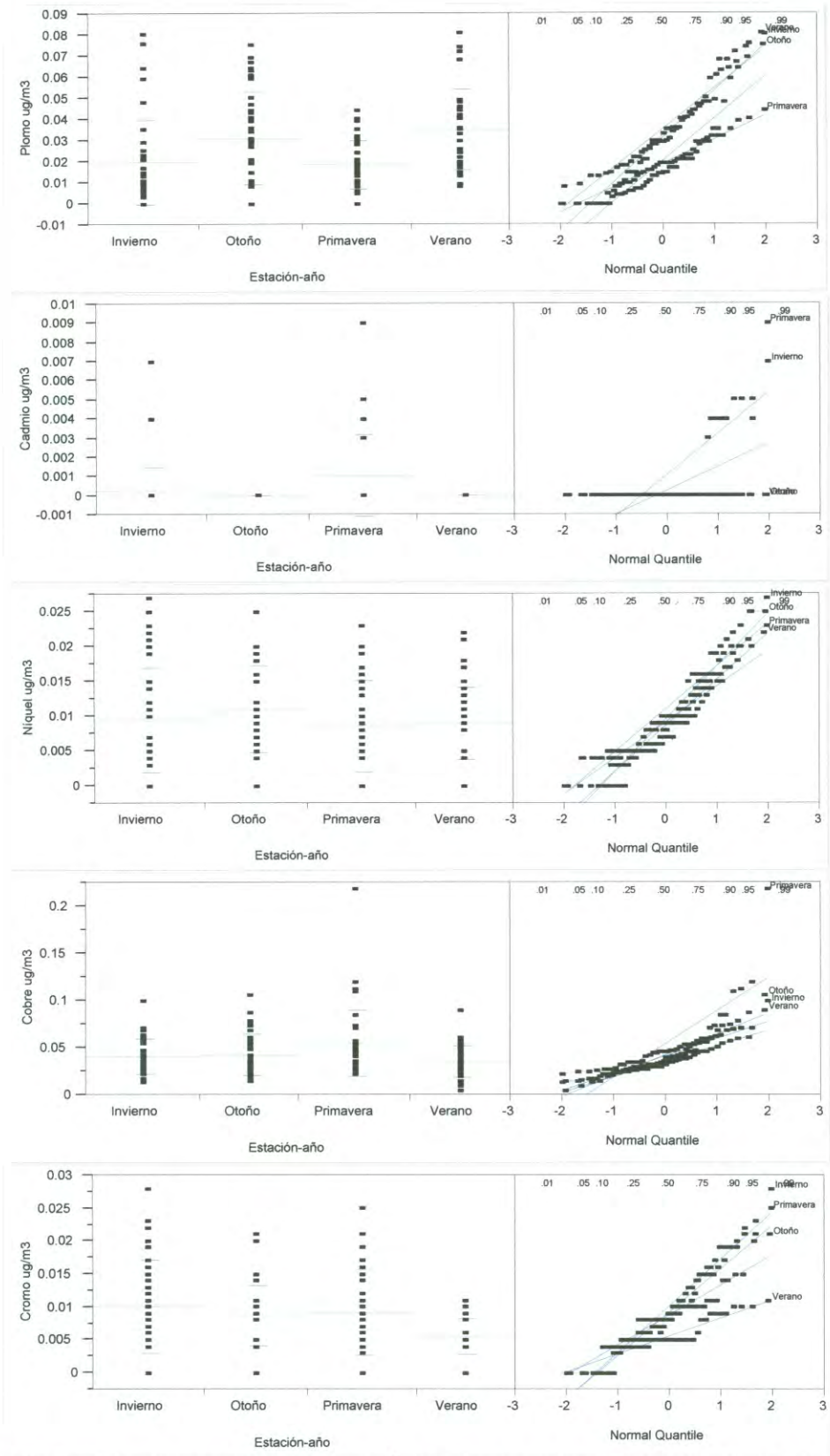


Figura 21. Distribución de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) según estación del año.

Los resultados del estadístico de prueba (Aproximación χ^2) para cada metal fueron: 20.5293 para el plomo, 19.2729 para el cadmio, 3.9107 para el níquel, 12.2206 para el cobre y 12.3704 para el cromo, mientras que el valor en tablas de χ^2 para indicar el rango de aceptación de H_0 es de 7.8147, por lo que se determina que únicamente para el níquel el valor del estadístico de prueba se encuentra en la región de aceptación de H_0 , o sea que no existe diferencia significativa entre las concentraciones detectadas de níquel a lo largo del año. Sin embargo para los demás metales (plomo, cadmio, cobre y cromo) se establece que al menos una de las estaciones del año presenta una distribución de concentraciones diferente a las demás.

Con la finalidad de establecer la diferencia de distribución de las concentraciones de plomo, cadmio, cobre y cromo entre las estaciones del año, se realizó de nuevo la prueba a posteriori correspondiente a Van der Waerden mediante la cual se realizan comparaciones múltiples por pares de ubicaciones. En el Anexo 9 se presentan los resultados del estadístico de prueba.

De acuerdo a la Tabla 2 del Anexo 9, se identifica que respecto al plomo, las estaciones primavera y otoño son iguales, así como las estaciones verano e invierno también son estadísticamente iguales en cuanto a las concentraciones detectadas de este metal, sin embargo primavera es diferente a verano y a invierno, así como otoño es diferente a verano y a invierno.

Según la Tabla 3 del Anexo 9, en la que se presentan los resultados del análisis a posteriori para el cadmio, se observa que las concentraciones de este metal en el aire ambiente para primavera son estadísticamente iguales a verano y a invierno. Sin embargo, las concentraciones detectadas de cadmio para otoño son diferentes a las otras tres estaciones del año. Es importante señalar que en muy pocos días se detectaron valores de cadmio, siendo siempre concentraciones por debajo del límite de detección, por lo que se consideran como trazas de este metal. De acuerdo a la figura 21 presentada con anterioridad, se puede determinar que existe presencia de cadmio en el aire ambiente solo en la mitad de año, o sea en las estaciones de invierno y primavera.

En la Tabla 4 del Anexo 9, se muestra el resultado de la prueba a posteriori para el cobre, donde se establece que las concentraciones detectadas de este metal en el aire ambiente para primavera son estadísticamente iguales con respecto a las estaciones de verano e invierno; así mismo se establece que las concentraciones de otoño son diferentes a las otras tres estaciones del año.

En cuanto a las concentraciones de cromo detectadas en el aire ambiente, en la Tabla 5 del Anexo 9 se presentan los resultados de la prueba a posteriori correspondiente a Van der Waerden, y en la que se determina que las concentraciones de este metal detectadas para primavera, son estadísticamente iguales a las detectadas en verano y en otoño, mientras que las detectadas en invierno son diferentes a las otras tres estaciones del año. De acuerdo a la figura 21, se observa que la estación que presenta mayor concentración promedio de cromo en aire ambiente corresponde a invierno.

8. DISCUSIÓN

8.1 Programa de Monitoreo de Calidad del Aire en Hermosillo, Sonora.

Los datos de monitoreo y filtros muestra utilizados para el análisis de metales pesados y PST en el presente estudio, se enmarcan dentro de las actividades del Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire (PEMCA) de la Ciudad de Hermosillo, Sonora. Este programa se inicia en febrero de 1998 mediante la presentación de su protocolo y tiene su fundamento en lo establecido por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (DOF, 1988) en los artículos 110 y 112 que establecen que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamiento humanos y que los ayuntamientos operarán y remitirán los reportes locales al Sistema Nacional Ambiental, así como en la Ley 217 del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente para el Estado de Sonora (Gobierno del Estado de Sonora, 1991), la cual, en sus artículos 72 y 73, ratifica tales disposiciones e incluye que las emisiones deberán ser reducidas o controladas para asegurar una calidad del aire satisfactoria. Originalmente el programa contemplaba implementarse sólo por los tres años de la administración municipal en turno. Este programa fue presentado a la Delegación de SEMARNAT en Sonora en marzo del mismo año con la finalidad de llegar a un acuerdo de apoyo. Sin embargo en las comunicaciones posteriores se estableció que tal convenio debería ser signado por SEMARNAT, el estado y el municipio, a través de un acuerdo de coordinación. Posteriormente, en julio del mismo año, la SEMARNAT envía al ayuntamiento de Hermosillo misiva en la que aprueba el protocolo y propone un acuerdo de coordinación específico, el cual es aceptado por el ayuntamiento. La SEMARNAP (DOF, 2000), publicó el Acuerdo de coordinación específico para llevar a cabo el Programa de Gestión y Evaluación de la Calidad del Aire, relativo a la operación de equipo de monitoreo atmosférico en 9 municipios del estado, incluido Hermosillo. Este acuerdo descentraliza las actividades relacionadas a la operación del programa hacia los ayuntamientos, pero involucra al estado y a la federación en la capacitación, supervisión, evaluación, seguimiento y publicación de los resultados.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se señalan las siguientes dos observaciones. Primero, que a partir de la publicación del acuerdo citado, debió asumirse que el programa desde el punto de vista institucional cambió de nombre, sin embargo se ha seguido denominando PEMCA hasta el año 2003, lo cual podría generar confusión y

asumirse que existen dos programas paralelos o duplicidad de trabajo ya que los equipos de monitoreo a los que se refieren ambos programas son los mismo; y segundo, que habiendo quedado establecido en los instrumentos normativos citados que los resultados del programa deberán integrarse al Sistema Nacional Ambiental, o al Banco Aerométrico del Sistema Nacional de Información Ambiental, o utilizarse para reportes de calidad ambiental por el estado y/o la federación, dichos resultados, de acuerdo a indagaciones tanto en las oficinas de ecología del estado, como en la delegación de SEMARNAT en el estado, no han sido presentados ni publicados.

Las actividades desarrolladas por el programa a la fecha del presente trabajo han consistido en el desarrollo de monitoreos de las concentraciones de PST y PM10, sin embargo no se han derivado conclusiones de los resultados obtenidos (posiblemente por no haberse revisado, validado y publicado por las diferentes instancias involucradas) y por lo mismo, tampoco acciones que conlleven a la definición primero, de la calidad satisfactoria del aire y segundo de políticas y acciones de control en caso de no ser dicha calidad satisfactoria. El protocolo del programa original (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 1998) consideraba tres objetivos particulares, a) Elaborar un programa ejecutivo para la correcta implementación del PEMCA, b) implementar y operar una red de monitoreo de la calidad del aire para Hermosillo y c) Divulgar los resultados a los diferentes sectores de la sociedad. En este sentido se puede comentar que, si bien es cierto no existe un documento denominado programa ejecutivo, si se ha realizado un calendario de monitoreo de PST y PM10 permanente a partir del año 2000, se ha dado mantenimiento a los equipos existentes y se han designado recursos para la operación de dichos equipos por parte del H. Ayuntamiento de Hermosillo, si embargo y a fin de que el programa cuente con los elementos suficientes para su correcta implementación, es pertinente desarrollar tal documento ejecutivo y en el que se deberá incluir entre otros puntos, el aseguramiento de la calidad de los resultados, la selección y ubicación de las estaciones de monitoreo, el calendario de operación, mantenimiento y auditorias, así como el procedimiento de reporte o de información a la sociedad sobre la calidad del aire determinada. En cuanto a la implementación y operación de la red de monitoreo, es de gran valor lo realizado por el H. Ayuntamiento de Hermosillo a partir de 1998, al haber mantenido en operación varias estaciones de monitoreo de PST y PM10 de manera permanente y contar actualmente con información estadística sobre estos parámetros de calidad del aire, así como con filtros con muestra de todos éstos años, sobre los cuales se pueden realizar una gran cantidad de análisis ambientales. Es oportuno señalar que los

resultados y datos que arrojan los equipos en operación deberán ser validados garantizándose el cumplimiento de los criterios de calibración que marcan los procedimientos normados, así mismo se deberán establecer los parámetros-criterios del aseguramiento de la calidad para la red de monitoreo en el propuesto programa ejecutivo mencionado anteriormente. En cuanto a la divulgación de los resultados, ésta puede realizarse de varias formas y para diferentes instancias de tal forma que es recomendable adoptar como parte del mismo programa un capítulo que aborde la depuración y simplificación de los resultados crudos y los transforme en indicadores fáciles de reportar y de entender por la población, así como su asociación a la realización de acciones de protección de la salud en su caso, como ejemplos se tiene al IMECA y al Índice de Calidad de Aire (Air Quality Index, o AQI por sus siglas en inglés), los cuales presentan de forma sencilla información sobre el área de reporte, el período de reporte, el contaminante crítico y el valor del índice, además se apoyan con el uso de colores asociados a los valores de dichos índices. No se debe olvidar además, que los resultados deberán reportarse al Estado y a SEMARNAT, para lo cual se deberá establecer con dichas instancias la forma de reporte, ya que por ejemplo en el Acuerdo de Coordinación Específica del 5 de septiembre de 2000 en el Diario Oficial, se establece el compromiso del Ayuntamiento de remitir sistemáticamente un reporte con la información generada en períodos no mayores de un mes, a la instancias estatal y federal mencionadas.

Todas estas observaciones ya se veían reflejadas en el Plan Municipal de Desarrollo 2001-2003 del Gobierno Municipal de Hermosillo (2001), que citaba en su capítulo de preservación ambiental, que las condiciones vigentes eran: falta de un programa de ordenamiento ecológico del territorio municipal, falta de estudios ecológicos de zonas con características naturales originales en el municipio, necesario mejorar el equipo de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, falta de personal y mas equipamiento, oficialización del reglamento de ecología y protección al ambiente para el municipio y, poca difusión de información ambiental hacia la ciudadanía. Entre las acciones específicas a desarrollar estaban: la capacitación del personal en materia ambiental por medio de despachos externos, gobierno estatal o federal y universidades, y realizar estudio de zonas idóneas para establecer estaciones de monitoreo entre otras; al respecto es pertinente señalar que se han desarrollado algunas acciones como mantenimiento de equipos de monitoreo, asignación de personal y cursos de capacitación relacionados al programa de calidad del aire.

8.2 Muestreo

Es pertinente señalar que para los muestreos (al menos, los realizados de junio de 2001 a mayo de 2002) del programa de calidad del aire de la Ciudad de Hermosillo, en donde se consideró la calibración de los equipos muestreadores con la finalidad de obtener los datos necesarios para los cálculos de flujo y concentración de los parámetros monitoreados, se tienen las siguientes observaciones: El patrón de transferencia o calibrador usado durante el período de estudio se amparaba bajo una certificación de 1999, siendo el criterio válido el de una certificación anual para el calibrador. Por otro lado, es importante también que los resultados de la calibración alcancen los criterios de aceptación como es el caso de una correlación final mayor a 0.99 en la regresión lineal de la calibración, habiéndose identificado que entre las calibraciones realizadas durante el periodo de estudio, este criterio no se cumplió en algunas de ellas.

Los accesorios del muestreador tales como el medidor de tiempo corrido (elapsed time) y el controlador de encendido-apagado (timer) deben verificarse, el primero cada 6 meses y el segundo cada 3 meses, debiendo cumplir con los criterios de aceptación (± 2 min/24 horas y ± 30 min/24 horas respectivamente), no habiéndose identificado que estas verificaciones se hayan realizado durante el período de estudio. La importancia de estas verificaciones reside en identificar las posibles variaciones de los medidores de tiempo del aparato las cuales repercuten, al multiplicarse por el flujo, en el volumen total muestreado y éste en la concentración final determinada, pero de haber variaciones y conociéndose éstas, se pueden hacer las correcciones pertinentes antes de hacer los cálculos finales.

El medidor de flujo (graficador) también debe ser verificado después de cada actividad de mantenimiento o durante las auditorías, en este caso es necesario utilizar dos patrones de referencia o calibradores, pero ambos deben ser trazables a un mismo patrón primario, cuyo criterio de aceptación es del 5% de la escala total. Esta verificación tampoco se identificó durante el período de estudio; para poder realizarla será necesario adquirir otro calibrador ya que el H. Ayuntamiento de Hermosillo solo cuenta con uno. La importancia de este dato es poder determinar si la gráfica de flujo que se obtiene de cada muestreo es correcta o si presenta desviación, en este caso, la importancia se traslada a la determinación de la necesidad de una corrección o reparación del equipo; posiblemente esta circunstancia sea la razón de que el 54% de los muestreos presenten un flujo promedio mayor a $1.7 \text{ m}^3/\text{min}$, el cual es el límite superior aceptable.

Finalmente, otro elemento que garantiza la calidad de los datos de los muestreos, es la precisión del método de muestreo, la cual se debe calcular al menos cada tres meses y se obtiene a partir de operar durante un día dos muestreadores en el mismo sitio de muestreo. El criterio de aceptación es de $\pm 15\%$ con un intervalo del 95% de confianza. Sin embargo, no se identificó que este parámetro fuera determinado durante el período del estudio, y básicamente se debe a que el calendario de muestreos considera que las tres estaciones de monitoreo operen los equipos el mismo día de la semana (simultáneos), por lo que no es posible trasladar un equipo hacia otra estación para determinar la precisión.

8.3 Concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) para el Periodo Junio de 2001 a Mayo de 2002.

Los habitantes de la Ciudad de Hermosillo han manifestado desde hace años su inquietud respecto de la calidad del aire que se respira, principalmente por la visible capa de polvo que cubre gran parte de la ciudad durante la mañanas y muy marcadamente durante los períodos de otoño e invierno. Esta situación ha podido ser llevada a términos de mala calidad del aire al identificarse que un número considerable de días se rebasa la concentración máxima permisible de partículas suspendidas totales establecida por la normatividad mexicana, tal como lo señaló la Delegación Sonora de la SEMARNAP (SEMARNAP, 1996), que reporta que para el período 1990 a 1995, todos los años se rebasó el máximo permisible anual, así mismo en los datos presentados en el Programa Municipal de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Hermosillo, Sonora (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003) se observó la misma situación para el período 2000 al 2003. Además existen otros indicadores de este problema ambiental como los de salud que se manifiestan por infecciones respiratorias agudas (IRAS), que ocupan el primer lugar de atención en el servicio de urgencias pediátricas y de hospitalización en ginecopediatría del IMSS en Hermosillo, durante los meses que comprende las temporadas de otoño e invierno, donde la primera causa es rinofaringitis, la segunda infecciones de la vía respiratoria alta y la tercera laringitis aguda, mientras que la quinta fue bronquitis y bronquiolitis. Así mismo, se menciona que este tipo de enfermedades no puede evitarse por el cambio climático y por la contaminación ambiental, pero si prevenirlas y evitar las complicaciones, como no exponer al enfermo a aglomeraciones, exposición y a humos generados por leña o calentón (Cambio Sonora, 2003).

Otro hecho significativo lo reporta la Secretaría de Salud Pública (Gobierno del Estado de Sonora, 2002), en la sección de casos nuevos de enfermedad por grupos de edad, municipio e institución, en donde se establece que para el Municipio de Hermosillo los casos de infecciones respiratorias agudas, fueron 248,104 casos, que representan para este Municipio 3,761.9 casos por cada 10,000 habitantes. Del total señalado, el grupo de edad que reporta mayor número de casos es el de 1 a 4 años, con 63,238 casos, seguido del grupo de 25 a 44 años con 44,929 casos. Es importante señalar que los siguientes 2 grupos de edad con mayor índice de casos son el grupo de menos de 1 año con 35,701 y el de 5 a 9 años con 34,961 casos; de esta manera en el rango de edad de 0 a 9 años de edad, se suman 133,900 casos que representan el 53.96% de los casos de enfermedades respiratorias agudas para este municipio.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación para el período junio de 2001 a mayo de 2002, las concentraciones promedio de partículas suspendidas totales para las estaciones Centro (Mazón), Noreste (CESUES) y Noroeste (CBTIS) fueron: 140.11, 110.98 y 244.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. De acuerdo a los máximos permisibles establecidos en la NOM-024-SSA1-1993 (DOF, 1994), se rebasa en cada caso en 86%, 47.9% y 225.7% la concentración máxima permisible anual de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y en cuanto al máximo permisible diario de 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, éste fue rebasado en la estación Centro (Mazón) en tres ocasiones y en la estación Noroeste (CBTIS) en 23 ocasiones. Estos resultados de nuevo dan pauta para clasificar de mala la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo en cuanto a partículas suspendidas totales. Por otro lado, se encontró que para el período de estudio y para la estación Centro, se obtuvo un Coeficiente de Determinación (R^2) de 0.52 al aplicar una línea de tendencia polinomial de sexto orden entre las concentraciones de PST y la temperatura ambiente; éste valor indica que para esa ubicación existe una correspondencia real entre las variaciones de las concentraciones de PST y las variaciones de la temperatura ambiental, lo cual pudiera ser usado como dato preventivo para eventos de contingencia.

Con la finalidad de evaluar la contaminación del aire por PST en la Ciudad de Hermosillo, Sonora a partir de índices comúnmente utilizados, a continuación se presenta un ejercicio del cálculo del Índice Uniforme de Calidad del Aire (CFR 40, 1992). Esta metodología es la utilizada por el Índice Estándar de Contaminantes (Pollutants Standards Index, PSI) en EUA y por el IMECA en México y cuyo principio y algoritmo fue explicado con anterioridad en el capítulo cuatro de antecedentes. En este ejercicio se utilizarán los

valores de niveles IMECA y el valor promedio de PST solo de los días que se rebasó el máximo permisible en la estación Noroeste (CBTIS) y que fue de $357 \mu\text{g}/\text{m}^3$:

$$\text{Subíndice PST} = ((200-100)/(546-260)) \times (357 - 260) + 100 = 133.9$$

Este valor del índice, se encuentra en el rango de 101 a 200 (niveles IMECA) considerándose una calidad No Satisfactoria (INEGI, 2000), además se ubica en el rango de 101 a 250 en el cual los posibles efectos a la salud son los siguientes: Se presenta irritación conjuntival o dolor de cabeza en cualquier grupo de la población, los enfermos del corazón o de los pulmones reactivan los síntomas de sus padecimientos, los niños lactantes, los ancianos y los fumadores presentan trastornos funcionales del aparato respiratorio y cardiovascular como aumento de su frecuencia respiratoria, sensación de falta de aire y palpitaciones; la población general sana presenta molestias como ardor de ojos, dolor de cabeza, aumento de frecuencia respiratoria, sensación de falta de aire y palpitaciones, sobre todo al realizar alguna actividad intensa. Las medidas de tipo preventivo en este rango de IMECA son: Deben adoptarse conductas generales que disminuyan la exposición a la atmósfera contaminada, especialmente por parte de la población que presenta características de riesgo o mayor susceptibilidad, como los niños, ancianos, embarazadas y los enfermos crónicos del corazón o los pulmones. Es recomendable para toda la población la adopción de las siguientes recomendaciones: evitar la exposición a la atmósfera contaminada, no realizar ejercicio o actividad física intensa al aire libre, permanecer en ambientes cerrados mientras dure el episodio de contaminación elevada (SEMARNAT, 1997). En el caso de que se monitorearan otros parámetros como PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO y O_3 , se debe obtener el subíndice para cada uno y determinarse como índice de la calidad del aire el que resulte más crítico.

La contaminación por material particulado presenta efectos evidentes como los problemas de visibilidad e irritación a los ojos; pero existen otros efectos resultado de la interacción con otros contaminantes que son menos obvios, por ejemplo, los efectos adversos de los óxidos de azufre son incrementados con la presencia de material particulado y los problemas respiratorios se verán acelerados para aquellos contaminantes asociados con la inhalación de partículas (Corbitt, 1989).

Las altas concentraciones de partículas detectadas en el aire ambiente en la ciudad de Hermosillo, podrían ser resultado de un posible sinergismo dado entre dos factores que se conjugan en la ciudad, siendo el primero el aporte de partículas a la atmósfera derivado del tráfico vehicular en calles sin pavimentar y de los terrenos baldíos y el segundo, un evento de encapsulamiento de las masas de aire sobre la mancha urbana por motivos topográficos. Respecto al primer factor se tienen los siguientes datos (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003): De las 14,744 hectáreas del área urbana ocupada por Hermosillo 11,298 hectáreas (76.6%) corresponden a lotes, el resto corresponde a vías públicas y zonas de cerros, y del área de lotes 3,582 hectáreas (31.7%) se encuentran baldíos, o sea casi una cuarta parte del total del área ocupada por los lotes de la ciudad son lotes baldíos que potencialmente generan polvos al ambiente, otra circunstancia es la falta de pavimentación en zonas críticas, la cobertura de pavimento en la ciudad es del 74.76% de la superficie de rodamiento, lo que significa que de los 17,909,663 m² de superficie de rodamiento 4,520,515 m² son de terracerías que aportan polvos a la atmósfera, además, en adición al problema se asume que en la ciudad existe un alto tráfico vehicular ya que se estima que en Hermosillo existe un vehículo por cada tres habitantes, mientras que en Latinoamérica el índice es de 10 habitantes por vehículo, y que además en el 69% de los casos son autos con más de 10 años de antigüedad (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003). En cuanto al segundo factor, el Programa Municipal de Desarrollo Urbano para Hermosillo 2003 (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003), ya prevé esta situación y cita: "La ciudad pese a su configuración plana, presenta una serie de elevaciones cerriles ordenadas en dos líneas que corren en el sentido norte-sur, formando una serie de espacios autocontenidos al interior de la ciudad", y además establece que: "Para la ciudad se ha determinado que los problemas más fuertes en cuanto a calidad del aire se presentan en el norte de la ciudad en donde las partículas generadas por el viento más las generadas por el tráfico vehicular son impactadas en la barrera que en forma perpendicular a su trayectoria presenta la Sierra del Bachoco, regresado ese aire contaminado y formando una cubierta de polvo".

En cuanto a políticas o acciones de mitigación de dicha calidad del aire, es pertinente señalar que existen elementos importantes encaminados a controlar esta problemática, como lo establecido en el proyecto del Reglamento de Ecología y Protección al Ambiente del Municipio de Hermosillo, Sonora (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2000), que establece en su artículo 50 que las emisiones de gases, vapores, humos u olores, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera que se generen

por fuentes fijas y fuentes móviles no deben exceder los límites máximos permisibles de emisión que se establezcan en las normas oficiales mexicanas. Así mismo en el artículo 51 se establece que para el establecimiento y operación de las fuentes fijas de jurisdicción municipal se requerirá autorización del H. Ayuntamiento por conducto de la Dirección de Ecología, la cual deberá estar incluida en el resolutivo de impacto o riesgo ambiental que se emita y que en un plazo no mayor de 45 días posteriores al inicio de la operación deberá presentar los resultados de los muestreos realizados en sus emisiones que comprueben el cumplimiento con las normas. En el artículo 56 se establece que los propietarios de vehículos deberán obtener anualmente la autorización ambiental de cada vehículo que circule en el municipio a través de una verificación; según el artículo 57 si en dicha verificación se exceden los límites permisibles de la norma oficial, quedará prohibida la circulación del vehículo debiéndose efectuar las reparaciones necesarias, hasta que mediante una nueva verificación se demuestre encontrarse dentro de norma, la omisión de dicha verificación será objeto de sanción. En el artículo 59 del reglamento citado se establece que el Ayuntamiento en coordinación con Protección Civil, tomará las medidas necesarias para prevenir y controlar contingencias ambientales por contaminación atmosférica para un sector o población en general, cuando se excedan en más del 50 % los parámetros de calidad del aire que establezcan las normas oficiales mexicanas. En el artículo 60 se prohíbe la quema de cualquier residuo peligroso y no peligroso, en estado sólido, líquido o gaseoso, al aire libre en el Municipio; y en los artículos 61 y 62 se menciona que sólo se dará autorización para prácticas de simulacros de incendios. Sin duda que la implementación de todas estas disposiciones representan un reto difícil y costoso ya que se tendrán que instrumentar procedimientos, formatos, criterios de evaluación, vigilancia, etc. en los que la participación de la sociedad a través del cumplimiento será determinante en el éxito del reglamento, una vez logrado esto, es seguro un impacto positivo muy significativo sobre la calidad del aire al reducirse y/o controlarse algunas de las fuentes emisoras de contaminación en la mancha urbana, sin embargo este reglamento se deberá de aprobar, oficializarse e instrumentarse primeramente ante las instancias correspondientes.

En lo referente al comportamiento espacial de los valores obtenidos para el período de estudio de las concentraciones de PST en cada estación de muestreo, se observó que la distribución de concentraciones es estadísticamente diferente para las estaciones de monitoreo con un nivel de confianza del 95%, definiéndose que en orden de mayor a menor concentración quedarían de la manera siguiente: Noroeste (CBTIS) con

244.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Centro (Mazón) con 140.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y Noreste (CESUES) con 110.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta situación es explicada por el hecho de que las zonas norte y oeste son las que presentan menos cobertura de pavimentación sobre las vialidades (ver figura 4).

Respecto al comportamiento temporal, se agruparon los resultados en series según las estaciones del año. Los resultados indican que con un 95% de confianza los valores de concentración en las tres ubicaciones monitoreadas, no presentan diferencia significativa en las estaciones del año. Lo cual es preocupante ya que si anteriormente se determinó que el promedio anual de partículas en el aire rebasa el máximo permisible, entonces se esperaría de acuerdo al resultado del análisis estadístico temporal, que en todo el año se estuviera presentando este evento de contaminación del aire y no solo en una temporada en particular como la invernal. Sin embargo, es importante mencionar, que en el caso de que la prueba estadística se hubiera realizado con un nivel de confianza del 90%, dicho análisis hubiera arrojado como resultado que las concentraciones a lo largo del año si presentan diferencias significativas.

8.4 Concentración de Metales Pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) para el Periodo Junio de 2001 a Mayo de 2002

Al inicio del presente trabajo, se consideraba analizar zinc, además de plomo, cadmio, níquel, cobre, y cromo, sin embargo durante la determinación de la concentración de estos metales en los filtros blanco a través del análisis de tiras representativas, se detectó una concentración promedio de zinc de 18.658 ppm, con un máximo de 28.653 ppm, un mínimo de 11.453 ppm y una desviación estándar de 5.188 ppm. Una concentración de 5 ppm en una tira de filtro representaría una concentración de aproximadamente 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el aire ambiente, sin embargo las concentraciones en aire ambiente son generalmente menores a 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Barceloux, 1999); por lo que sencillamente la variación que existe entre las concentraciones de los filtros vírgenes, enmascararía las posibles concentraciones de este metal en el aire ambiente. Por otro lado, en los casos en los que los valores de concentración de zinc en los filtros fueran menores al promedio de los filtros blanco (ya que se obtuvo una desviación estándar de 5 ppm), entonces las concentraciones resultarían negativas al hacer la corrección por blanco. Por lo anterior se decidió eliminar del diagnóstico de calidad del aire este metal, siendo pertinente advertir sobre esta situación para posteriores investigaciones.

En cuanto a los resultados obtenidos de los análisis de plomo, cadmio, níquel, cobre y cromo en las muestras de 24 hrs de PST en aire ambiente proporcionados por el Ayuntamiento de Hermosillo, correspondientes al período: junio de 2001 a mayo de 2002, se puede señalar lo siguiente:

En el caso del plomo, los valores promedio detectados fueron 0.025, 0.021 y 0.031 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para las ubicaciones Centro (Mazón), Noreste (CESUES) y Noroeste (CBTIS) respectivamente. Es pertinente señalar que el valor mas alto detectado fue de 0.081 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Noroeste, el cual se ubica muy por debajo del valor máximo permisible de 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, establecido en la norma NOM-026-SSA1-1993 (DOF, 1994) para un promedio trimestral.

Como dato comparativo, se puede señalar que la Delegación Estatal de la SEDESOL (1993), reportó concentraciones de plomo en aire ambiente para el período enero a septiembre de 1992, para las ubicaciones Mazón (Centro), Cesues (Noreste) y Semeson (Noroeste). En el presente trabajo, se consideraron esos valores reportados y se calcularon los promedios de concentración resultando: 0.373, 0.283 y 0.349 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente para cada estación de monitoreo. Comparando esos promedios con los promedios anuales obtenidos en este trabajo para el periodo junio de 2001 a mayo de 2002 se observa una disminución promedio en un 92% de la concentración de plomo en el aire ambiente.

Esta situación ha sido identificada a nivel mundial estableciéndose que la reducción de la presencia de plomo en el ambiente ha significado uno de los mayores logros en la protección de la salud pública y es atribuible a la mejora de la calidad de los combustibles como las gasolinas, ya que por ejemplo en México en 1986 el contenido de tetraetilo de plomo en la gasolina era de 3.5 ml/gal, para 1991 la proporción de este químico era de 0.54 ml/gal, en 1994 se redujo a 0.2 ml/gal y en 1996 se inicia la distribución de gasolinas sin plomo. Según datos para la Zona Metropolitana del Valle de México, en 1992 la concentración de plomo en aire promediaba alrededor de 0.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el año 2000 tal concentración promedio fue de aproximadamente 0.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gobierno del Estado de México, 2002), lo que representa una disminución aproximada mayor al 80%. Lo anterior es coherente con los valores de reducción de concentración de plomo en aire manifestados anteriormente para la ciudad de Hermosillo para un período de tiempo similar.

De acuerdo a criterios internacionales, como la normatividad de la Comunidad Europea (OJEC, 1999) o las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2000a), el máximo permisible en México para la concentración de plomo en aire ambiente podría haber quedado obsoleto, debido a que se han establecido nuevos valores límite o criterios de calidad del aire más estrictos, los cuales están basados en resultados y/o estudios de salud y medio ambiente, e inclusive han ido mas allá, al establecer umbrales de concentración por abajo del máximo permisible, los cuales sirven para detonar aquellas actividades o políticas de control, antes de rebasar el máximo permisible en el cual prácticamente ya se tendrían problemas de calidad del aire y por ende de salud. Esta observación toma especial importancia debido a que una vez rebasado el máximo permisible, el daño a la salud o al ambiente es exponencial respecto al incremento del contaminante en el aire (Dr. Francisco Jaque Rechea, 2003. comunicación personal).

Por otra parte, el análisis estadístico de correspondencia (Coeficiente de Determinación R^2) entre las concentraciones de plomo en las distintas estaciones de monitoreo y algunos elementos climáticos como temperatura, humedad, velocidad de viento y la fecha como elemento aglutinador de las diferentes condiciones ambientales a lo largo del período de tiempo, se observó que los valores mas altos de R^2 obtenidos por estación fueron de 0.27 (con la fecha), 0.29 (con la presión) y 0.25 (con la fecha) para las estaciones Centro (Mazón), Noreste (CESUES) y Noroeste (CBTIS) respectivamente. Estos valores no representan correspondencia significativa entre las variaciones de los elementos climáticos señalados y la variación de las concentraciones detectadas de plomo.

En cuanto a la distribución espacial de este metal, el análisis estadístico de la prueba de Van der Warden (a un 95% de confianza) detectó que la distribución de las concentraciones de plomo en las tres estaciones es estadísticamente igual; sin embargo, es importante señalar que esta aceptación de igualdad fue identificada por muy poco margen, por lo que posiblemente en el siguiente nivel de significancia (10%) pudiera identificarse que tales niveles de concentración de plomo son diferentes entre las ubicaciones de las estaciones de monitoreo. Respecto a la distribución temporal, el análisis estadístico de la prueba de Van der Waerden determinó que los niveles de concentración de plomo agrupados por estación del año son diferentes a un 95% de confianza, identificándose la siguiente distribución de mayor a menor concentración

promedio por estación del año: verano ($0.034 \mu\text{g}/\text{m}^3$), otoño ($0.031 \mu\text{g}/\text{m}^3$), invierno ($0.019 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y primavera ($0.018 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Respecto al cadmio, es importante señalar que en promedio (de las tres estaciones de monitoreo) solo en el 7% de los filtros analizados se detectaron trazas de este metal en el aire. Los valores detectados se encuentran muy por debajo del límite de detección ($0.035 \mu\text{g}/\text{m}^3$); por ejemplo el valor mas alto detectado fue de $0.009 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de monitoreo Noroeste (CBTIS), siendo los valores promedio para el período anual estudiado de 0.0004 , 0.0001 y $0.0005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Estaciones Centro, Noreste y Noroeste) respectivamente. Sin embargo, es posible señalar que dichas concentraciones son típicas en el aire ambiente según datos del Gobierno de Chile (2002), que reporta promedios mensuales que van desde 0.0005 hasta $0.0045 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de cadmio en zonas de la ciudad de Santiago de Chile. Respecto a la calidad del aire y según el criterio establecido por la WHO (2000a) de $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio anual, es posible asumir que el cadmio en el aire ambiente no representó un riesgo de salud para el período estudiado.

En el análisis del Coeficiente de Determinación (R^2), la correspondencia mas alta para el cadmio, se detectó al elaborar la línea de tendencia tipo polinomial de sexto orden con respecto a la humedad en el aire, obteniéndose un valor de R^2 de 0.49 , el cual queda ligeramente por debajo del criterio de 0.5 considerado para una correspondencia real entre los dos elementos estudiados. Respecto al comportamiento espacial de la concentración de cadmio, se pudo determinar con un 95% de confianza que la distribución de este metal es la misma en las tres estaciones de monitoreo. En lo que respecta al comportamiento temporal se observó que sí existe diferencia significativa en la distribución de concentración de cadmio a lo largo del año, identificándose que solo en invierno y primavera se presentan trazas de cadmio en el aire. A la fecha no se encontró información relacionada a concentración de cadmio en el aire ambiente de Hermosillo, Sonora, por lo que no es posible hacer comparaciones temporales fuera del período estudiado en la presente investigación.

En relación al níquel, los valores promedio detectados para las estaciones de monitoreo Centro, Noreste y Noroeste en el período junio de 2001 a mayo de 2002, fueron 0.009 , 0.008 y $0.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Cabe señalar que aunque el 76% de los valores de concentración determinada se encuentran por debajo del límite de detección, es posible asumir que las concentraciones detectadas son típicas en el aire ambiente de una ciudad ya que por ejemplo para la ciudad de Santiago de Chile, se reportan

promedios anuales de 0.005 a 0.025 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gobierno de Chile, 2002). En cuanto al nivel de calidad del aire respecto de las concentraciones detectadas de níquel para la ciudad de Hermosillo, se estima que fue satisfactoria para el período estudiado al compararse con el criterio de calidad del aire establecido por la Comisión de las Comunidades Europeas (2003), el cual es de 20 ng/m^3 promedio anual.

El análisis estadístico de correspondencia (coeficiente de determinación R^2) realizado entre la concentración de níquel en las distintas estaciones de monitoreo y algunos elementos climáticos así como con la fecha como elemento aglutinador de las diferentes condiciones ambientales a lo largo del período de tiempo, indican que no existe correspondencia significativa entre tales parámetros, ya que los valores mas altos de R^2 obtenidos por estación fueron de 0.34 (con la velocidad de viento), 0.26 (con la fecha) y 0.15 (con la humedad) para las estaciones Centro, Noreste y Noroeste respectivamente, los cuales se ubican por debajo del valor de 0.5 establecido como criterio real de correspondencia. En cuanto a la distribución espacial, la prueba de Van der Warden demostró que la distribución de las concentraciones de níquel entre las estaciones de monitoreo presenta diferencias significativas, La prueba estadística a posteriori para Van del Waerden determinó que la estación de monitoreo Noroeste es diferente a las otras dos, siendo ésta la que presenta la mayor concentración promedio anual (0.011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Respecto a la distribución temporal, se determinó con un 95% de confianza que los niveles de concentración de níquel agrupados por estación del año no son diferentes.

En lo referente al cobre, las concentraciones promedio determinadas para el período de estudio, fueron las siguientes: 0.042 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la estación Centro (Mazón), 0.043 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la estación Noreste (CESUES) y 0.045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la estación Noroeste (CBTIS). De acuerdo a Barceloux (1999), los valores de cobre en aire ambiente se encuentran entre 5 y 200 ng/m^3 , así mismo el Gobierno de Chile (2002), reporta valores promedio mensual de 0.025 a 0.250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la ciudad de Santiago de Chile, por lo que es posible asumir que las concentraciones detectadas de cobre en el aire ambiente de la ciudad de Hermosillo son típicas de centros urbanos. El límite de detección obtenido para este metal fue de 0.024 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, habiéndose encontrado que en promedio de las tres estaciones el 13% de las concentraciones se ubican por debajo de dicho límite.

En cuanto al nivel de calidad del aire respecto a la concentración detectada de cobre para la ciudad de Hermosillo, se establece que fue satisfactoria para el período estudiado al compararse con uno de los criterios listados en la base de datos de la

Agencia Europea del Medio Ambiente la cual establece un valor de 0.002 mg/m^3 (<http://star.eea.eu.int/default.asp>).

Las determinaciones del Coeficiente de Determinación (R^2) realizado entre la concentración de cobre para las tres estaciones de monitoreo y elementos climáticos así como con la fecha como elemento aglutinador de las diferentes condiciones ambientales a lo largo del período de tiempo, indican que para las estaciones Centro y Noreste no existe correspondencia significativa, ya que los valores de R^2 mas altos fueron de 0.15 (con la temperatura) y 0.33 (con la fecha) respectivamente; sin embargo para la estación Noroeste se identificó un valor de coeficiente de determinación de 0.58 al usar una línea de tendencia con la fecha, lo cual indica que existe una correspondencia real entre la variación de las concentraciones de cobre en el aire ambiente y la fecha (o el tiempo).

En lo que respecta al comportamiento espacial del cobre, la prueba de Van der Warden, no identificó diferencias significativas entre las estaciones de monitoreo, lo cual establece que la concentración de este metal es homogénea para las áreas de la ciudad de Hermosillo en donde se ubican estas estaciones. En relación a la distribución temporal a lo largo del año muestreado, la prueba de Van der Waerden demostró con un 95% de confianza que los niveles de concentración de cobre agrupados por estación del año presentan diferencia significativa. La prueba a posteriori detectó que la concentración de cobre para otoño es diferente a las otras tres estaciones del año.

En lo referente al cromo, los valores de concentración promedio para el año de estudio fueron de $0.008 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ para la estación de monitoreo Centro (Mazón), $0.007 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ para la estación de monitoreo Noreste (CESUES) y $0.010 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ para la estación de monitoreo Noroeste (CBTIS). De acuerdo a WHO (1984), la concentración media en el aire en las ciudades es típicamente de $0.02 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. El Municipio de Praga (2003), reporta una concentración promedio de $0.0037 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ de cromo en aire ambiente. De acuerdo a estos datos, las concentraciones de cromo detectadas en la Ciudad de Hermosillo son congruentes con los niveles de cromo en aire en áreas urbanas.

Unicamente en dos muestras (dos días) en la estación Centro (Mazón) se obtuvieron concentraciones por encima del límite de detección ($0.024 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), lo cual indica que en general el cromo se presenta solo a niveles traza en el aire de la ciudad, por lo que el nivel de calidad del aire respecto a este metal para la ciudad de Hermosillo fue satisfactoria para el período estudiado, ya que se encontró muy por debajo del criterio de referencia de la Agencia Europea del Medio Ambiente (<http://star.eea.eu.int/default.asp>) que es de $1.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, establecido para áreas residenciales.

En lo referente a la posible relación de la distribución de la concentración de cromo en aire y algunos elementos climáticos mediante la determinación del Coeficiente de Determinación (R^2), se identificó que no existe correspondencia significativa, ya que los valores de R^2 mas altos fueron de 0.37 (con la fecha) en la estación de monitoreo Centro (Mazón), de 0.34 (con la temperatura) en la estación Noreste (CESUES) y de 0.026 (con la temperatura) en la estación de monitoreo Noroeste (CBTIS), por lo que no es posible utilizar ninguno de los parámetros climáticos como indicadores preventivos de la distribución de la concentración de cromo en el aire.

En lo que respecta al comportamiento, la prueba de Van der Warden, demostró que la distribución de las concentraciones de cromo en las tres estaciones de monitoreo no presenta diferencias significativas durante el período de estudio (junio de 2001 a mayo de 2002); es decir que la concentración de este metal es homogénea para las áreas de la ciudad en donde se ubican las estaciones de monitoreo. En cuanto a la distribución temporal, al agruparse los datos por estación del año, la prueba de Van der Waerden demostró con un 95% de confianza que los niveles de concentración de cromo es diferente entre las estaciones. La prueba a posteriori determinó que la concentración detectada para invierno es diferente a las otras tres estaciones del año, siendo ésta la de mayor valor de concentración promedio ($0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Debido a que las concentraciones de los metales analizados en el presente trabajo presentaron valores muy por debajo de los máximos permisibles para aire ambiente y/o criterios de salud de referencia, e inclusive con porcentajes importantes de muestras por debajo de los límites de detección analíticos, llegando a ser hasta del 100% como en el caso del cadmio, no se consideró necesario realizar un estudio para definir y ubicar las fuentes generadoras de dichos elementos contaminantes.

Es importante señalar que para esta investigación, los valores de concentración de los metales plomo, cadmio, níquel, cobre y cromo, corresponden a la concentración total del elemento en el filtro de muestreo, y que en este trabajo se consideraron para los fines estadísticos todos los valores de concentración determinados y cuantificables por el método analítico utilizado; sin embargo es pertinente aclarar que en términos de un informe de resultados, deberán ser considerados todos aquellos valores por abajo del límite de detección, como No Detectados (ND). Sin duda que mediante una metodología más fina y sensible se podrán definir las concentraciones más exactas de los metales aquí identificados sólo como trazas en el aire ambiente, sin embargo tales análisis resultarán onerosos debido al costo de la infraestructura necesaria así como por la cantidad de

muestras a analizar, considerándose que a este nivel de investigación de diagnóstico, fue apropiada la metodología aquí usada toda vez que las concentraciones detectadas no representan riesgo a la salud de la población y los costos derivados de esta investigación fueron factibles de apoyo por parte de la Universidad de Sonora.

9. CONCLUSIONES

9.1. Partículas Suspendidas Totales

El criterio de calidad de aire para PST consiste en los máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA1-1993 (DOF, 1994), siendo de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 hrs para un período de un año y $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual. En cuanto al máximo permisible de 24 hrs, fue rebasado 3 veces de los 49 muestreos realizados en la estación Centro (Mazón) y 23 veces de los 56 muestreos reportados en la estación Noroeste (CBTIS), no habiéndose rebasado ningún día de los 55 muestreados en la estación Noreste (CESUES). En cuanto al máximo permisible anual, éste fue rebasado en un 86% en la estación de monitoreo Centro, en un 48% en la estación de monitoreo Noreste y en un 326% en la estación de monitoreo Noroeste. De acuerdo a lo anterior, se establece que la calidad del aire respecto de Partículas Suspendidas Totales se encontraba entre no satisfactoria y mala en la Ciudad para el período de estudio.

Se observó que para el período de estudio en la estación Centro (Mazón) existe una correspondencia o Coeficiente de determinación (R^2) de 0.52 entre PST y la temperatura ambiente (considerando una línea de tendencia de tipo polinomial de sexto orden). Por otro lado, la prueba de Van der Waerden demostró que existe diferencia significativa entre las concentraciones de PST entre las estaciones de monitoreo, siendo la estación de monitoreo Noroeste la que presentó la mayor concentración de partículas en el aire ambiente, seguida de la Centro y finalmente la Noreste. En cuanto a la distribución de los valores de concentración de PST en el tiempo, se observó que estadísticamente no existe diferencia significativa entre las concentraciones de partículas en aire entre las series de datos estacionales.

9.2 Metales Pesados

El criterio de calidad del aire para plomo, es el máximo permisible establecido en la Norma NOM-026-SSA1-1993 (DOF, 1994) siendo de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio aritmético trimestral, considerando que el valor mas alto detectado de plomo en el aire ambiente de Hermosillo, Sonora fue de $0.081 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es posible establecer que la calidad del aire fue satisfactoria para este metal durante el período de estudio.

En cuanto al cadmio, se establece que este metal solo fue detectado a nivel de trazas en el aire ambiente, el criterio de calidad de aire ($0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual) de la WHO (2000a) y la Comunidad Europea (2003), no es rebasado por los valores obtenidos en esta investigación, por lo que se puede concluir que la calidad del aire fue satisfactoria en relación a este metal para el período estudiado.

La calidad del aire para el período de junio de 2001 a mayo de 2002 respecto del níquel, se estableció a partir del criterio propuesto por la Comunidad Europea (EC, 2003) de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual, el cual no fue rebasado en ninguna de las tres estaciones de monitoreo de la ciudad estableciéndose que dicha calidad fue satisfactoria.

La concentración de cobre mas alta detectada en el aire ambiente de la ciudad, fue de $0.218 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual es mucho menor al criterio utilizado en esta investigación como indicador de la calidad del aire ($2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), registrado en la base de datos de la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2004), por lo que es posible establecer que la calidad del aire fue satisfactoria respecto de este metal para el período del estudio.

En relación al cromo, el valor mas alto detectado en el aire de la ciudad fue de $0.028 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de monitoreo centro (Mazón). Esta concentración es menor al criterio de referencia que es de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio diario tomado de la base de datos de la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2004). Por lo que es posible establecer que la calidad del aire fue satisfactoria respecto a este metal durante el período analizado.

Para los valores de concentración detectados de plomo, cadmio, cobre y cromo, en el aire ambiente en las tres estaciones de monitoreo se determinó que estadísticamente no existe diferencia significativa entre las tres ubicaciones donde se localizan dicha estaciones, sin embargo si existe diferencia en los valores de concentración de níquel entre las estaciones de monitoreo, siendo la estación Noroeste la que presenta la concentración mas alta ($0.011 \mu\text{g}/\text{m}^3$) diferenciándose estadísticamente a las otras dos estaciones. En relación al comportamiento temporal de los valores de concentración de los metales, la prueba de Van der Waerden demostró que estadísticamente no existe diferencia significativa entre las concentraciones de níquel en aire entre las estaciones del año; sin embargo para los metales plomo, cadmio, cobre y cromo se identificó que si existe diferencia significativa entre las estaciones del año.

10. RECOMENDACIONES

1.- Se debe señalar la necesidad de elaborar y oficializar un programa ejecutivo de la calidad del aire para la Cd. de Hermosillo, en el cual se deberán desarrollar y establecer al menos los siguientes puntos: Definiciones, propósito, aplicabilidad, capacitación, aseguramiento de la calidad, métodos de monitoreo, diseño de la red de monitoreo, instalación de equipos, calendario de operación, vigilancia de la calidad del aire, índices de reporte diario y reporte anual. Este documento debe garantizar la calidad de los datos que se obtengan del programa, así como que la información sea transferida y comunicada oportunamente a las instancias responsables de tomar acciones respecto de la calidad satisfactoria del aire en la ciudad. El programa deberá considerar acciones específicas factibles de evaluar y tendientes a reducir la concentración de partículas en el aire ambiente en plazos determinados.

2.- Se recomienda que los Programas Municipales de Desarrollo Urbano consideren dentro del capítulo de riesgo y vulnerabilidad las contingencias ambientales por mala calidad del aire dentro de los eventos que inciden en sistemas afectables por agente perturbador de origen sanitario-ecológico a fin de detonar acciones específicas de control en tales casos y no solo se considere al incremento en la contaminación como una amenaza para el desarrollo urbano ordenado y sustentable.

3.- Se recomienda que la red de monitoreo incorpore dentro de su alcance los parámetros normados actualmente en México sobre calidad del aire y que son: PST, PM10, bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono, a fin de poder establecer la aplicación de un índice de calidad del aire basado en el total de la normatividad vigente sobre los contaminantes del aire ambiente.

4.- Asegurar la disponibilidad de recursos tanto humanos como económicos para el programa, ya que éste debe tener carácter de permanente, al catalogarse la calidad del aire como un indicador de la salud y bienestar de la población.

5.- Por otro lado y respecto a las actividades de muestreo de PST y metales pesados, se recomienda que se implemente un programa de control de calidad a fin de garantizar la calidad de los resultados de dichos monitoreos.

6.- Debido a que los resultados de esta investigación concluyen que la calidad del aire respecto de PST en la Ciudad de Hermosillo se ubica entre no satisfactoria y mala, y considerando que la presencia de partículas en el ambiente es generada por la suspensión de polvos en las vías no pavimentadas altamente transitadas, aunado al efecto de la topografía en la dinámica del aire (espacio autoconfinado de la mancha urbana) y finalmente por los elementos climáticos (temperatura y humedad), se recomienda establecer una política urgente de pavimentación, priorizando el área noroeste de la ciudad (en la que se rebasa en un 326% el máximo permisibles anual), a fin de romper el sinergismo de los tres elementos señalados anteriormente y que resulta en un riesgo a la salud de la población, considerando además que tales partículas en el aire podrían representar el riesgo a la salud por otros contaminantes no estudiados actualmente y asociados (transportados) a dichas partículas como los aerobiológicos.

7.- En relación a los metales pesados en el aire ambiente, se recomienda continuar con el monitoreo de éstos, a fin de generar información que sirva de sustento para la modificación o elaboración de nuevos criterios y normas de calidad del aire.

8.- Se recomienda instalar una estación meteorológica en cada estación de monitoreo de calidad del aire, a fin de se establezcan las condiciones climáticas específicas de cada sitio durante los días de monitoreo.

11. LITERATURA CITADA

Alloway B.J. and Ayres, D.C., 1993. Chemical Principles of Environmental Pollution. Blackie Academic & Profesional. London.

Barceloux, D.G. 1999. Journay of Toxicology. Clinical Toxicology. Volume 37. Number 2. Marcel Dekker, Inc

Cambio Sonora, 6 de noviembre de 2003.

Canter, L.W., 1997. Air Pollution Ch. 5 in Environmental Engineers´ Handbook. D.H.F. Liu and B.G. Lipták (Ed.), p. 232-331. Lewis Publishers, Boca Raton, New York.

CEC (Comission of the European Communities), 2003. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and policiclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Brussels, 16.7.2003 COM (2003) 423 Final. 2003/0164. 39 p.

CFR (Code of Federal Regulations), 1992. Title 40, Part 50 - 58. Environmental Protection Agency. US Government.

Conover, W.J. 1971. Practical Nonparametric. John Wiley & Sons, New York, U.S.A. 439p.

Corbitt, R. A. (Ed.) 1989. Air Quality Control. Ch. 4 in Standard Handbook of Environmental Engineering. p. 4.1-4.76. McGraw-Hill, INC., New York.

Dickson, T.R. 1996. Química-Enfoque Ecológico-. Ed. Limusa, México.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 28 de enero de 1988.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1993. Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993, que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. 18 de octubre de 1993.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a partículas suspendidas totales (PST). Valor permisible para la concentración de partículas suspendidas totales (PST) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. 23 de diciembre de 1994.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. 23 de diciembre de 1994.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2000. Acuerdo de coordinación específico que celebran la SEMARNAP y el Estado de Sonora, con el objeto de llevar a cabo el Programa de Gestión y Evaluación de la Calidad del Aire, relativo a la operación de equipo de monitoreo atmosférico en los municipios de Agua Prieta, Cajeme, Cananea, Hermosillo, Naco, Nacozari de García, Navojoa, Nogales y San Luis Río Colorado, Son. 05 de septiembre de 2000.

EC (European Commission). 2001. Economic Evaluation of Air Quality Targets for Heavy Metals. Final Report. Entec UK Limited.

EEA (Environmental European Agency), 2004. Base de datos (STAR) 1993-2002. (<http://star.eea.eu.int/default.asp>)

EPA (Environmental Protection Agency). 1990. National Ambient Air Quality Standards, NAAQS

EPA (Environmental Protection Agency). 1992. Test Methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW-846). Springfield, Virginia, U.S.A. 1049 p.

EPA (Environmental Protection Agency). 1994. Measuring Air Quality. The Pollutants Standards Index. EPA 451/K-94-001. February 1994.

EPA (Environmental Protection Agency). 1998. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. EPA-454/R-98-004. August 1998.

Gobierno de Chile, 2001. Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana. Determinación de niveles de exposición a plomo en el aire en la región Metropolitana entre 1997 y 2000.

Gobierno de Chile, 2002. Estudio Caracterización de elementos inorgánicos presentes en el aire de la región metropolitana 1977-2000. Santiago de Chile.

Gobierno del Estado de Baja California, 1999. Programa para Mejorar la Calidad del Aire de Mexicali 2000-2005. Gobierno Municipal de Mexicali, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Secretaría de Salud, Delegación federal de SEMARNAP Baja California. 243 p.

Gobierno del Estado de México, 2002. Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. Comisión Ambiental Metropolitana. Gobierno del Estado de México-Gobierno del Distrito Federal-SEMARNAT-Secretaría de Salud.

Gobierno del Estado de Sonora, 1991. Ley 217 del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente para el Estado de Sonora. Boletín Oficial del 3 de enero de 1991.

Gobierno del Estado de Sonora, 2002. Secretaría de Salud Pública. Anuario estadístico, edición 2002.

Gobierno Municipal de Hermosillo, 2001. Plan Municipal de Desarrollo 2001 – 2003

Gobierno Municipal de Hermosillo, 2003. Programa Municipal de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Hermosillo, Sonora 2003. (Generación 2025+). Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo. Propuesta - Consulta Pública.

H. Ayuntamiento de Hermosillo, 1998. Protocolo. Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire en la Ciudad de Hermosillo, Sonora.

H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2000. Reglamento de Ecología y Protección al Ambiente del Municipio de Hermosillo, Sonora. Propuesta

Ilyn, I., Ryaboshapko, A., Afinogenova, O., Berg, T., Hjellbrekke, A.G. y Lee, D.S. 2002. MSC-E/CCC Technical Report 5/2002. Lead, Cadmium and Mercury Transboundary Pollution in 2000. Meteorological Synthesizing Centre-East. EMEP. Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1997. Cuaderno Estadístico Municipal. Hermosillo

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) – SEMARNAT, 2000. Estadísticas del Medio Ambiente, México 1999.

IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). 1997. Compendium of Chemical Terminology. 2nd Edition

Mendenhall, W., Wackerly, D., Scheaffer, R. 1994. Estadística Matemática con Aplicaciones. Segunda Edición. Grupo Editorial Iberoamérica.

Miller, J.C. y Miller, J.N. 1993. Estadística para química analítica. Editorial Addison-Wiley Iberoamericana, Wilmington, Delaware, U.S.A. 211 p.

Municipio de Praga (Magistrat hl. m. Prahy), 2003. Prague Environment 2002. 41 p.

OJEC (Official Journal of the European Communities). 31.12.1982. Council Directive 96/62/EC of 3 december 1982 on limit value for lead in the air (82/884/EEC). No. L378/

OJEC (Official Journal of the European Communities). 21.11.1996. Council Directive 96/62/EC of 27 september 1996 on ambient air quality assessment and management. No. L296/55.

OJEC (Official Journal of the European Communities). 29.6.1999. Council Directive 1999/30/EC of 22 april 1999 relating to limit for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. No. L163/41.

SAS Institute. 2001. JMP Program.

SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 1993. Delegación Sonora. Concentración de plomo y partículas suspendidas totales en aire ambiente de la Ciudad de Hermosillo, Sonora durante 1992. Presentación para El Congreso Internacional Ecológico Sonora 93.

Seinfeld, J.H. 1978. Contaminación Atmosférica (Fundamentos físicos y químicos), Instituto de Estudios de Administración Local, Madrid

SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1996. Delegación Federal en el Estado de Sonora. Concentración de partículas en aire ambiente para la ciudad de Hermosillo, Sonora, México durante el período 1990-1995. Reporte

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. Indicadores para la Evaluación del Desempeño Ambiental. Reporte 2000. p. 131-149.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2003. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2002. Compendio de Estadísticas Ambientales.

Shen, T.T. 1995. Industrial Pollution Prevention. Springer-Verlag. Berlin.

Slanina, S. and Zhang Y., Aerosols: connection between regional climatic change and air quality. Pure Appl. Chem., Vol. 76, No. 6, pp 1241-1253. 2004 IUPAC

Straub, C.P. 1989. Practical Handbook of Environmental Control. CRC Press, Inc. Boca Raton Florida.

Swiss Federal Council, 2000. Ordinance on air pollution control 814.318.142.1; 106 p.

Wark, K. 1997. Contaminación del Aire. 4^a. Ed., Editorial Limusa, México.

WHO (World Health Organization), 1984. Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information

WHO (World Health Organization), 2000a. Air Quality Guidelines. Second Edition. Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark

WHO (World Health Organization), 2000b. Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution. Report EUR/01/5026342 E74256

WHO (World Health Organization), 2003. Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Report.

12. ANEXOS

- 1.- Resultados de concentración de partículas suspendidas totales (PST) en aire ambiente en las tres estaciones de monitoreo durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.
- 2.- Resultados de control de calidad (fase analítica)
 - 2a.- Calibración analítica. Reproducibilidad
 - 2b.- Resultados de la estabilidad de la calibración para Pb, Cd, Ni, Cu y Cr.
 - 2c.- Resultados de exactitud: Recuperación de concentraciones fortificadas
- 3.- Resultados del coeficiente de determinación (R^2) para partículas suspendidas totales (PST).
- 4.- Resultados de la prueba de Van der Waerden para partículas suspendidas totales (PST).
- 5.- Resultados de la prueba a posteriori para partículas suspendidas totales (PST).
- 6.- Resultados de concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) en aire ambiente en las tres estaciones de monitoreo durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002.
- 7.- Resultados del coeficiente de determinación (R^2) para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).
- 8.- Resultados de la prueba de Van der Waerden para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).
- 9.- Resultados de las pruebas a posteriori para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

ANEXO 1

Resultados de concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) en aire ambiente en las tres estaciones de monitoreo durante el periodo Junio 2001 a Mayo 2002.

Anexo 1a. Resumen de datos de muestreo y resultado de concentración de PST en estación Centro (MAZON)

Filtro	Fecha	Gi Peso inicial g	Gf Peso final g	Chequeo Peso final g	Peso de tira g	Gf-Gi Peso partículas g	Qptn Flujo Patrón ft ³ /min	Qptn Flujo Patrón M ³ /min	V Volumen total M ³	PST Concen- tración ug/m ³
	03-Jun-01									
405	09-Jun-01		3.1938	3.1882	0.2315		67.1030	1.900	2735.55	
3	15-Jun-01	2.6428	2.9808	2.9803	0.2186	0.3380	67.0570	1.898	2733.67	123.6
5	21-Jun-01	2.6442	2.9516	2.9537	0.2590	0.3074	66.8160	1.892	2723.85	112.9
9	27-Jun-01	2.6629	2.9059	2.8989	0.2128	0.2430	67.1260	1.900	2736.49	88.8
12	03-Jul-01	2.6658	2.6793	2.6793	0.1698	0.0135				
	09-Jul-01									
15	15-Jul-01	2.6473	2.8568	2.8518	0.2108	0.2095	68.0780	1.927	2775.29	75.5
18	21-Jul-01	2.6473	2.8568	2.8996	0.2226	0.2095	67.6350	1.915	2757.24	76.0
21	27-Jul-01	2.6409	2.8287	2.8263	0.2114	0.1878				
27	02-Ago-01	2.6274	2.9001	2.8904	0.2185	0.2727	72.4320	2.051	2952.79	92.4
30	08-Ago-01	2.6308	2.8656	2.8609	0.2120	0.2348	68.0410	1.926	2773.79	84.6
33	14-Ago-01	2.5760	2.9091	2.8996	0.2145	0.3331	63.7140	1.804	2597.39	128.2
36	20-Ago-01	2.6610	3.0908	3.0832	0.2236	0.4298	65.2940	1.848	2661.80	161.5
39	26-Ago-01	2.6591	2.9683	2.9604	0.2163	0.3092	59.3120	1.679	2417.94	127.9
	01-Sep-01	2.6418	2.8667			0.2249	57.9730	1.641	2363.35	
45	07-Sep-01	2.7943	2.8090	2.8081	0.2055	0.0147	59.1200	1.674	2410.11	
48	13-Sep-01	2.6354	3.0360	3.0282	0.2225	0.4006	58.7200	1.662	2393.80	167.3
51	19-Sep-01	2.6159	2.8963	2.8879	0.2129	0.2804	57.6250	1.631	2349.16	119.4
54	25-Sep-01	2.6340	2.8686	2.8630	0.2159	0.2346	56.4290	1.598	2300.41	102.0
	01-Oct-01					0.0000				
60	07-Oct-01	2.6662	2.9906	2.9842	0.2204	0.3244	58.6710	1.661	2391.81	135.6
63	13-Oct-01	2.6639	3.1034	3.0955	0.2294	0.4395	55.2520	1.564	2252.43	195.1
66	19-Oct-01	2.6572	3.0862	3.0778	0.2294	0.4290	53.9100	1.526	2197.72	195.2
69	25-Oct-01	2.6504	2.9570	2.9538	0.2190	0.3066	57.0690	1.616	2326.50	131.8
72	31-Oct-01	2.6465	2.9973	2.9648	0.2175	0.3508	56.4310	1.598	2300.49	152.5
75	06-Nov-01	2.6495	2.9677	2.9667	0.2104	0.3182	56.7000	1.605	2311.45	137.7
78	12-Nov-01		2.9465	2.9464	0.2181					
31	18-Nov-01	4.4367	4.7240	4.7194	0.3488	0.2873	58.0280	1.643	2365.59	121.4
	24-Nov-01	4.4220	4.7890			0.3670	55.3040	1.566	2254.54	162.8
675	30-Nov-01	3.5451	3.9625	3.9659	0.2950	0.4174	52.7030	1.492	2148.51	194.3
665	06-Dic-01	3.5257	3.9842	3.9842	0.2944	0.4585	60.6360	1.717	2471.91	185.5
667	12-Dic-01	3.5488	3.6950	3.7038	0.2705	0.1462	61.2040	1.733	2495.07	58.6
	18-Dic-01						64.5690	1.828	2632.25	
	24-Dic-01									
	30-Dic-01									
643	06-Ene-02	3.5328	3.7858	3.7818	0.2834	0.2530	52.2760	1.480	2131.10	118.7
634	12-Ene-02	3.5492	3.8314	3.8303	0.2824	0.2822	47.9480	1.357	1954.67	144.4
624	18-Ene-02	3.5600	3.8934	3.8873	0.2874	0.3334	51.8010	1.466	2111.74	157.9
618	24-Ene-02	3.5546	3.6732	3.6650	0.2739	0.1186	40.7290	1.153	1660.37	71.4
628	30-Ene-02	3.5546	4.4548	4.4512	0.3361	0.9002	46.6970	1.322	1903.67	472.9
612	05-Feb-02	3.5830	3.7137	3.7224	0.2753	0.1307	46.7670	1.324	1906.52	68.6
921	11-Feb-02	4.3804	4.5979	4.5988	0.3403	0.2175	42.1200	1.192	1717.08	126.7
820	17-Feb-02	2.7970	3.0057	3.0062	0.2241	0.2087	47.1940	1.336	1923.93	108.5
823	23-Feb-02	2.7751	3.0505	3.0487	0.2300	0.2754	52.4890	1.486	2139.79	128.7
826	01-Mar-02	2.7793	2.9765	2.9762	0.2203	0.1972	54.1150	1.532	2206.07	89.4
828	07-Mar-02	2.7668	3.0410	3.0405	0.2247	0.2742	52.9490	1.499	2158.54	127.0
832	13-Mar-02	2.7717	3.0756	3.0748	0.2314	0.3039	52.1470	1.476	2125.85	143.0
835	19-Mar-02	2.7876	2.9654	2.9648	0.2223	0.1778	57.4600	1.627	2342.44	75.9
838	25-Mar-02	2.7881	3.4293	3.4297	0.2577	0.6412	52.5980	1.489	2144.23	299.0
841	31-Mar-02	2.7982	3.4570	3.4569	0.2591	0.6588	57.8510	1.638	2358.38	279.3
844	06-Abr-02	2.7846	3.1237	3.1220	0.2314	0.3391	56.6760	1.604	2310.48	146.8
846	12-Abr-02	2.7965	3.0758	3.8786	0.2298	0.2793	55.1700	1.562	2249.08	124.2
849	18-Abr-02	2.7939	3.0139	3.0174	0.2259	0.2200	55.1600	1.562	2248.67	97.8
850	24-Abr-02	2.7894	3.1813	3.1833	0.2381	0.3919	58.9640	1.669	2403.75	163.0
9006	30-Abr-02	2.7716	3.3490	3.0325	0.2268	0.5774	56.7990	1.608	2315.49	249.4
9009	06-May-02	2.7745	3.0480	3.0495	0.2300	0.2735	66.9470	1.895	2729.19	100.2
997	12-May-02	2.8108	3.0122	3.0149	0.2291	0.2014	67.1800	1.902	2738.69	73.5
999	18-May-02	2.7847	3.0207	3.0216	0.2268	0.2360	72.0720	2.040	2938.12	80.3
9013	24-May-02	2.7980	3.1125	3.1134	0.2257	0.3145	61.1530	1.731	2492.99	126.2
9001	30-May-02	2.7688	3.1637	3.1629	0.2332	0.3949	59.6240	1.688	2430.66	162.5

Anexo 1b. Resumen de datos de muestreo y resultado de concentración de PST en estación Noreste (CESUES)

Filtro	Fecha	Gi Peso inicial g	Gf Peso final g	Chequeo Peso final g	Peso de tira g	Gf-Gi Peso partículas g	Qptn Flujo Patrón ft ³ /min	Qptn Flujo Patrón M ³ /min	V Volumen total M ³	PST Concen- tración ug/m ³
407	03-Jun-01	2.8247	3.1928	3.1749	0.2393	0.3681	59.6290	1.688	2430.86	151.4
408	09-Jun-01	2.6396	3.1524	3.1350	0.2424	0.5128	59.2140	1.676	2413.94	212.4
2	15-Jun-01	2.6492	2.9540	2.9557	0.2164	0.3048	63.9550	1.811	2607.22	116.9
6	21-Jun-01	2.6302	2.8936	2.8812	0.2106	0.2634	64.5070	1.826	2629.72	100.2
7	27-Jun-01	2.6535	2.8747	2.8643	0.2109	0.2212	63.3440	1.793	2582.31	85.7
10	03-Jul-01	2.6617		3.0016	0.2172					
	09-Jul-01									
13	15-Jul-01	2.6529	3.0263	2.8865	0.2117	0.3734	68.5840	1.942	2795.92	133.6
16	21-Jul-01	2.6323	2.7852	2.7814	0.2055	0.1529				
	27-Jul-01									
25	02-Ago-01	2.6858	2.8881	2.8796	0.2167	0.2023	60.2850	1.707	2457.60	82.3
28	08-Ago-01	2.8026	2.8740	2.8197	0.2077	0.0714	61.3810	1.738	2502.28	28.5
31	14-Ago-01	2.7865	2.9808	2.9763	0.2173	0.1943	58.9420	1.669	2402.85	80.9
34	20-Ago-01	2.6671	3.2584	3.0140	0.2192	0.5913	59.6090	1.688	2430.04	243.3
37	26-Ago-01	2.6512	2.9138	2.8953	0.2115	0.2626	58.0000	1.642	2364.45	111.1
40	01-Sep-01	2.6342	2.9551	2.9508	0.2180	0.3209	68.2980	1.934	2784.26	115.3
43	07-Sep-01	2.6438	2.7750	2.7729	0.2094	0.1312	72.6630	2.057	2962.21	44.3
46	13-Sep-01	2.6344	3.2393	3.2306	0.2321	0.6049	70.3330	1.991	2867.22	211.0
49	19-Sep-01	2.6447	2.9206	2.9125	0.2128	0.2759	66.3140	1.877	2703.38	102.1
52	25-Sep-01	2.6380	2.6950	2.6927	0.1972	0.0570	77.7630	2.201	3170.12	18.0
55	01-Oct-01	2.6749	2.8525	2.8514	0.2124	0.1776	77.0210	2.180	3139.87	56.6
58	07-Oct-01	2.6713	2.9291	2.9277	0.2141	0.2578	77.5410	2.195	3161.07	81.6
61	13-Oct-01	2.6637	3.1727	3.1659	0.2344	0.5090	76.1750	2.157	3105.38	163.9
64	19-Oct-01	2.6517	3.2749	3.2701	0.2300	0.6232	72.7330	2.059	2965.06	210.2
67	25-Oct-01	2.6535	3.1360	3.1317	0.2301	0.4825	73.9810	2.094	3015.94	160.0
70	31-Oct-01	2.6500	3.0860	3.0821	0.2285	0.4360	72.3350	2.048	2948.84	147.9
73	06-Nov-01	2.6439	3.0310	3.0319	0.2227	0.3871	75.3890	2.134	3073.34	126.0
76	12-Nov-01	2.6582	3.1098	3.1092	0.2240	0.4516	76.0850	2.154	3101.71	145.6
80	18-Nov-01	4.4269	4.4931	4.9297	0.3621	0.0662	70.2950	1.990	2865.67	23.1
	24-Nov-01	4.2719	4.7010			0.4291	68.7820	1.947	2803.99	153.0
5	30-Nov-01	4.2927	4.8067	4.8061	0.3542	0.5140	73.5010	2.081	2996.37	171.5
	06-Dic-01									
657	12-Dic-01	3.5326	4.0284	4.0297	0.3025	0.4958	74.4110	2.107	3033.47	163.4
652	18-Dic-01	3.5248	3.8915	3.8872	0.2843	0.3667	78.6080	2.225	3204.57	114.4
650	24-Dic-01	3.5302	3.6314	3.6303	0.2656	0.1012	105.9610	3.000	4319.65	23.4
646	30-Dic-01	3.5269	3.8288	3.8311	0.2922	0.3019	101.9070	2.885	4154.38	72.7
644	06-Ene-02	3.5372	3.8957	3.8910	0.2888	0.3585	81.0090	2.293	3302.45	108.6
636	12-Ene-02	3.5393	4.0297	4.0237	0.2994	0.4904	83.9630	2.377	3422.87	143.3
630	18-Ene-02	3.5159	3.9254	3.9156	0.2909	0.4095	78.9150	2.234	3217.08	127.3
640	24-Ene-02	3.5353	4.0598	4.0560	0.3005	0.5245	112.3160	3.180	4578.72	114.6
622	30-Ene-02	3.5637	3.6695	3.6627	0.2777	0.1058	109.1170	3.089	4448.31	23.8
616	05-Feb-02	3.5883	3.7196	3.7297	0.2765	0.1313	75.0610	2.125	3059.97	42.9
816	11-Feb-02	2.8007	2.9419	2.9476	0.2210	0.1412	51.5300	1.459	2100.69	67.2
818	17-Feb-02	2.7727	2.9923	2.9946	0.2196	0.2196	74.6730	2.114	3044.15	72.1
822	23-Feb-02	2.7760	3.2127	3.1275	0.2338	0.4367	92.4800	2.618	3770.08	115.8
824	01-Mar-02	2.7693	2.9568	2.9586	0.2197	0.1875	80.8370	2.288	3295.43	56.9
827	07-Mar-02	2.7797	3.4847	3.4574	0.2591	0.7050	80.0660	2.267	3264.00	216.0
830	13-Mar-02	2.7720	3.2608	3.2621	0.2421	0.4888	82.3270	2.331	3356.18	145.6
833	19-Mar-02	2.7580	2.9718	2.9714	0.2242	0.2138	88.4360	2.504	3605.22	59.3
836	25-Mar-02	2.7900	3.2713	3.2720	0.2406	0.4813	89.2010	2.525	3636.40	132.4
839	31-Mar-02	2.7961	3.0855	3.0838	0.2288	0.2894	92.2560	2.612	3760.94	76.9
842	06-Abr-02	2.7924	3.1376	3.1309	0.2320	0.3452	78.7370	2.229	3209.82	107.5
834	12-Abr-02	2.7820	3.2277	3.2347	0.2420	0.4457	77.4300	2.192	3156.54	141.2
847	18-Abr-02	2.7980	3.0893	3.0914	0.2268	0.2913	80.7530	2.286	3292.01	88.5
851	24-Abr-02	2.7936	3.3156	3.3137	0.2519	0.5220	85.0460	2.408	3467.02	150.6
9005	30-Abr-02	2.7943	3.1759	3.1741	0.2348	0.3816	92.6320	2.622	3776.27	101.1
9008	06-May-02	2.7886	3.1184	3.1215	0.2308	0.3298	78.2940	2.217	3191.76	103.3
9011	12-May-02	2.7853	3.0947	3.0969	0.2325	0.3094	70.9780	2.009	2893.52	106.9
	18-May-02						71.1190	2.013	2899.27	
9014	24-May-02	2.7875	3.1294	3.1295	0.2318	0.3419	98.7080	2.794	4023.97	85.0
	30-May-02	2.7857	3.0947			0.3090	112.6100	3.188	4590.70	67.3

Anexo 1c. Resumen de datos de muestreo y resultado de concentración de PST en estación Noroeste (CBTIS)

Filtro	Fecha	Gi Peso inicial g	Gf Peso final g	Chequeo Peso final g	Peso de tira g	Gf-Gi Peso partículas g	Qptn Flujo Patrón ft ³ /min	Qptn Flujo Patrón M ³ /min	V Volumen total M ³	PST Concen- tración ug/m ³
406	03-Jun-01	2.8346	3.7346	3.7168	0.2762	0.9000	63.8290	1.807	2602.08	345.9
409	09-Jun-01	2.6472	3.3884	3.3394	0.2501	0.7412	64.1410	1.816	2614.80	283.5
1	15-Jun-01	2.6935	3.1789	3.1742	0.2314	0.4854				
4	21-Jun-01	2.6980	3.1009	3.0907	0.2343	0.4029				
8	27-Jun-01	2.6363	2.9752	2.9660	0.2206	0.3389	64.8630	1.836	2644.23	128.2
11	03-Jul-01	2.6595		3.2104	0.2323					
	09-Jul-01									
14	15-Jul-01	2.6513	2.9244	2.9215	0.2138	0.2731	61.6870	1.746	2514.76	108.6
17	21-Jul-01	2.6532	2.9975	3.0712	0.2212	0.3443	62.9400	1.782	2565.84	134.2
19	27-Jul-01	2.6395	2.9046	2.8949	0.2159	0.2651	64.9570	1.839	2648.06	100.1
26	02-Ago-01	2.6363	2.9954	2.9858	0.2209	0.3591	67.5880	1.913	2755.32	130.3
29	08-Ago-01	2.3522	3.1216	3.1153	0.2333	0.7694	65.5620	1.856	2672.73	287.9
32	14-Ago-01	2.6549	2.8767	3.0978	0.2318	0.2218	51.6640	1.463	2106.16	105.3
35	20-Ago-01	2.6312	2.9817	3.0807	0.2313	0.3505	55.7400	1.578	2272.32	154.2
38	26-Ago-01	2.7604	3.1708	3.1558	0.2337	0.4104	51.4890	1.458	2099.02	195.5
41	01-Sep-01	2.6370	3.2175	3.2124	0.2383	0.5805	66.0680	1.870	2693.35	215.5
44	07-Sep-01	2.5909	2.8876	2.8822	0.2141	0.2967	67.2290	1.903	2740.68	108.3
47	13-Sep-01	2.6415	3.0590	3.0538	0.2285	0.4175	66.0690	1.870	2693.40	155.0
50	19-Sep-01	2.6203	3.2527	3.2411	0.2428	0.6324	64.8670	1.836	2644.39	239.1
53	25-Sep-01	2.6373	2.7773	2.7690	0.2069	0.1400	72.2630	2.046	2945.90	47.5
56	01-Oct-01	2.6712	3.0556	3.0504	0.2276	0.3844	68.4620	1.938	2790.95	137.7
59	07-Oct-01	2.6672	3.1123	3.1079	0.2311	0.4451	63.2000	1.789	2576.44	172.8
62	13-Oct-01	2.6606	3.5762	3.5694	0.2671	0.9156	63.8930	1.809	2604.69	351.5
65	19-Oct-01	2.6560	3.2749	3.2701	0.2300	0.6189	59.0470	1.672	2407.13	257.1
68	25-Oct-01	2.6666	3.3521	3.3509	0.2486	0.6855	60.5230	1.713	2467.30	277.8
71	31-Oct-01	2.6494	3.4572	3.4521	0.2584	0.8078	59.9180	1.696	2442.64	330.7
	06-Nov-01	2.6483	3.5569			0.9086	60.8300	1.722	2479.82	366.4
77	12-Nov-01	2.6523	3.5093	3.5042	0.2580	0.8570	61.7450	1.748	2517.12	340.5
81	18-Nov-01	4.4390	5.2006	5.1984	0.3907	0.7616	58.8130	1.665	2397.59	317.7
79	24-Nov-01	4.2218	5.6108	5.6063	0.4158	1.3890	55.7810	1.579	2273.99	610.8
673	30-Nov-01	3.5533	4.7117	4.7156	0.3595	1.1584	57.4960	1.628	2343.90	494.2
663	06-Dic-01	3.5229	3.9331	3.9339	0.3000	0.4102	60.8710	1.723	2481.49	165.3
658	12-Dic-01	3.5526	3.9537	3.9503	0.2888	0.4011	62.8610	1.780	2562.62	156.5
655	18-Dic-01	3.5129	4.5677	4.5685	0.3428	1.0548	56.4300	1.598	2300.45	458.5
651	24-Dic-01	3.5206	4.4449	4.4362	0.3294	0.9243	58.2200	1.648	2373.42	389.4
649	30-Dic-01	3.5267	4.2903	4.2925	0.3203	0.7636	55.0880	1.560	2245.74	340.0
641	06-Ene-02	3.5692	4.2667	4.2604	0.3214	0.6975	64.5720	1.828	2632.37	265.0
638	12-Ene-02	3.5642	4.6280	4.6313	0.3558	1.0638	58.3230	1.651	2377.62	447.4
632	18-Ene-02	3.5418	4.3134	4.3039	0.3260	0.7716	59.7650	1.692	2436.40	316.7
626	24-Ene-02	3.5189	4.6082	4.5903	0.3554	1.0893	60.9140	1.724	2483.24	438.7
620	30-Ene-02	3.5578	3.6940	3.6879	0.2766	0.1362	65.2050	1.846	2658.17	51.2
614	05-Feb-02	3.5742	3.9764	3.9887	0.2914	0.4022	68.6300	1.943	2797.80	143.8
611	11-Feb-02	3.6163	4.1641	4.1619	0.3097	0.5478	64.6430	1.830	2635.26	207.9
819	17-Feb-02	2.7931	3.4462	3.4459	0.2540	0.6531	50.3300	1.425	2051.77	318.3
821	23-Feb-02	2.8044	3.7557	3.7565	0.2767	0.9513	63.1660	1.788	2575.05	369.4
825	01-Mar-02	2.7768	3.2133	3.2149	0.2402	0.4365	72.2510	2.045	2945.41	148.2
829	07-Mar-02	2.7666	3.6426	3.6436	0.2751	0.8760	68.7170	1.945	2801.34	312.7
831	13-Mar-02	2.7725	3.5822	3.5807	0.2697	0.8097	58.5690	1.658	2387.65	339.1
	19-Mar-02						60.3820	1.709	2461.56	
837	25-Mar-02	2.7819	3.0669	3.0668	0.2244	0.2850	59.0760	1.672	2408.32	118.3
840	31-Mar-02	2.7964	3.1070	3.1111	0.2342	0.3106	60.6330	1.717	2471.79	125.7
843	06-Abr-02	2.7860	3.4073			0.6213	67.3340	1.906	2744.96	226.3
845	12-Abr-02	2.7873	3.4512	3.4554	0.2585	0.6639	69.7190	1.974	2842.19	233.6
848	18-Abr-02	2.7943	3.2592	3.2629	0.2458	0.4649	60.2110	1.705	2454.59	189.4
856	24-Abr-02	2.8082	3.5447	3.5430	0.2647	0.7365	59.0320	1.671	2406.52	306.0
9004	30-Abr-02	2.7759	3.3319	3.3363	0.2544	0.5560	56.0400	1.586	2284.55	243.4
9007	06-May-02	2.7879	3.4488	3.4480	0.2576	0.6609	69.5490	1.969	2835.26	233.1
9010	12-May-02	2.7891	3.1515	3.1526	0.2364	0.3624	63.8380	1.807	2602.45	139.3
998	18-May-02	2.7712	3.5452	3.5824	0.2707	0.7740	72.3230	2.047	2948.35	262.5
	24-May-02	2.7865	3.1515			0.3650	72.6360	2.056	2961.11	123.3
996	30-May-02	2.7924	3.4221	3.4156	0.2639	0.6297	71.2600	2.017	2905.01	216.8

ANEXO 2

Resultados de Control de Calidad (Fase Analítica).

Anexo 2a. Calibración Analítica: Reproducibilidad

(ANÁLISIS DE ESTANDARES CERTIFICADOS)

Batch de Análisis	Análisis	Parámetro (estándar usado)				
		Plomo (A) 1 ppm	Cadmio (B) 0.2 ppm	Níquel (A) 1 ppm	Cobre (B) 3 ppm	Cromo (B) 0.4 ppm
Batch 1	al inicio del batch (ppm)	1.01	0.20	1.00	3.00	0.41
	al final del batch (ppm)	1.00	0.20	1.00	3.02	0.40
	reproducibilidad (%)	1.00	0.00	0.00	0.66	2.47
Batch 2	al inicio del batch (ppm)	1.03	0.20	1.00	3.00	0.40
	al final del batch (ppm)	1.01	0.20	1.01	3.00	0.39
	reproducibilidad (%)	1.96	0.00	1.00	0.00	2.53
Batch 3	al inicio del batch (ppm)	1.00	0.20	1.00	3.01	0.40
	al final del batch (ppm)	1.00	0.21	1.00	3.00	0.40
	reproducibilidad (%)	0.00	4.88	0.00	0.33	0.00
Batch 4	al inicio del batch (ppm)	1.00	0.20	1.02	3.00	0.40
	al final del batch (ppm)	1.00	0.20	1.00	3.00	0.40
	reproducibilidad (%)	0.00	0.00	1.98	0.00	0.00

Estándares utilizados: (A).- High Purity Standards Cat. # CRM-Soil-B Lot# 223429 Nov.03 y (B).- CWW-TM-F Nov.02

Anexo 2b. Resultados de la estabilidad de la calibración para Pb, Cd, Ni, Cu y Cr.

Batch de Análisis	Frecuencia de Verificación	Plomo		Cadmio		Niquel		Cobre		Cromo	
		1 ppm	2 ppm	1 ppm	2 ppm	1 ppm	2 ppm	1 ppm	2 ppm	1 ppm	2 ppm
Batch 1	al inicio	1.00	2.00	1.00	2.02	1.00	1.99	1.01	2.00	0.99	2.00
	después de 10 muestras	1.00	2.00	1.01	2.01	1.00	2.00	1.00	2.00	1.00	2.01
	después de 20 muestras	1.02	2.03	0.98	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00
	después de 30 muestras	1.02	2.04	1.00	2.00	1.00	1.98	0.98	1.99	1.00	2.00
	después de 40 muestras	1.00	2.03	1.02	2.01	1.00	1.99	1.02	1.98	0.99	1.98
Batch 2	después de última muestra	1.00	2.00	1.00	2.00	0.99	1.98	1.00	1.98	0.99	2.00
	al inicio	1.00	2.00	1.00	2.00	0.99	1.99	1.00	1.99	1.01	2.00
	después de 10 muestras	1.00	2.00	1.00	1.98	0.98	2.00	1.02	1.98	1.01	2.00
	después de 20 muestras	1.03	2.03	1.00	1.97	1.00	2.00	1.01	2.00	1.00	1.99
	después de 30 muestras	1.00	2.02	1.01	2.00	1.00	2.00	1.00	2.01	1.00	2.00
Batch 3	después de 40 muestras	1.00	2.00	1.02	2.00	0.99	1.99	1.00	2.00	1.00	2.00
	después de última muestra	0.99	2.02	1.02	1.99	1.00	2.02	1.00	2.00	1.00	1.99
	al inicio	1.00	2.00	1.02	2.00	1.00	2.00	1.00	2.03	1.00	2.02
	después de 10 muestras	1.00	2.00	1.02	2.03	1.02	2.00	1.02	2.01	0.99	2.00
	después de 20 muestras	1.00	2.00	1.00	2.00	1.00	2.01	0.99	2.00	1.00	2.00
Batch 4	después de 30 muestras	1.00	2.03	1.00	2.00	1.00	2.01	0.99	2.01	1.03	2.00
	después de 40 muestras	1.03	2.01	1.01	2.00	1.00	2.00	1.00	1.98	1.01	1.99
	después de última muestra	1.03	2.00	1.00	1.99	0.98	1.97	1.00	1.99	1.00	1.99
	al inicio	1.00	2.00	0.99	1.99	1.00	1.98	1.00	2.01	1.00	2.00
	después de 10 muestras	0.98	2.00	1.00	1.98	0.99	1.99	1.00	2.00	1.00	1.99
Batch 4	después de 20 muestras	0.98	1.95	1.01	2.00	1.00	2.00	0.99	2.01	1.01	2.00
	después de 30 muestras	1.00	2.01	0.98	1.99	1.00	2.00	1.00	2.01	1.01	2.00
	después de 40 muestras	1.00	2.00	0.98	2.00	1.00	1.99	1.00	2.00	1.00	1.97
	después de última muestra	0.99	1.97	0.97	2.02	1.00	2.00	0.99	1.99	1.01	2.00
	Promedio	1.0029	2.0058	1.0017	1.9992	0.9975	1.9954	0.9996	1.9988	1.0021	1.9971

Anexo 2c. Resultados de exactitud: Recuperación de concentraciones fortificadas.

Batch de Análisis	Concentraciones Conocidas de Metales Pesados en Filtros (ppm)																													
	Plomo						Cadmio						Niquel						Cobre						Cromo					
	0.50	1.00	2.00	2.00	0.50	1.00	0.50	1.00	2.00	2.00	0.50	1.00	0.50	1.00	2.00	2.00	0.50	1.00	0.50	1.00	2.00	2.00	0.50	1.00	0.50	1.00	2.00	2.00	0.50	1.00
	0.52	1.03	2.00	2.00	0.51	1.01	1.99	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.47	0.97
Batch 1	0.50	1.00	2.00	2.00	0.50	0.99	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.07
	0.51	1.03	2.01	2.00	0.49	1.01	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.07
Batch 2	0.50	1.03	2.00	2.00	0.49	0.95	2.00	2.00	2.00	2.00	0.49	0.96	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.01	2.00	2.00	2.00	2.00	0.48	1.01	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00
	0.49	1.06	2.00	2.00	0.53	1.02	2.00	2.00	2.00	2.00	0.51	1.02	2.05	2.05	2.05	2.05	0.49	1.01	1.95	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00
	0.50	0.98	2.00	2.00	0.52	1.01	2.00	2.00	2.00	2.00	0.48	0.98	2.05	2.05	2.05	2.05	0.51	1.04	2.03	2.00	2.00	2.00	0.49	1.06	2.03	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00
Batch 3	0.50	0.97	2.00	2.00	0.53	1.03	1.96	2.00	2.00	2.00	0.50	1.02	2.05	2.05	2.05	2.05	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00
	0.51	1.00	2.01	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.51	1.02	2.03	2.03	2.03	2.03	0.52	1.02	2.06	2.00	2.00	2.00	0.51	1.02	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00
	0.50	1.02	2.00	2.00	0.50	1.01	2.00	2.00	2.00	2.00	0.51	1.00	2.01	2.01	2.01	2.01	0.50	1.00	2.01	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00
Batch 4	0.50	1.00	2.00	2.00	0.49	1.00	1.99	2.00	2.00	2.00	0.50	1.02	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.00	2.01	2.00	2.00	2.00	0.50	0.99	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	0.99
	0.52	1.00	2.02	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.01	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.02	2.00	2.00	2.00	2.00	0.49	1.00	2.01	2.00	2.00	2.00	0.49	1.00
	0.50	1.01	2.00	2.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.49	1.00	2.03	2.03	2.03	2.03	0.50	1.01	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.02	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50	1.02

ANEXO 3

Resultados del Coeficiente de Determinación (R^2) para
Partículas Suspendidas Totales (PST)

Resultados del Coeficiente de Determinación R^2

Estacion Centro

Ecuación	PST vs Fecha	PST vs Temperatura	PST vs Presión	PST vs vel. Viento	PST vs Humedad
Linear	0.027	0.045	0.0001	0.015	0.011
2 orden	0.066	0.11	0.037	0.015	0.024
3 orden	0.067	0.237	0.068	0.041	0.088
4 orden	0.067	0.439	0.071	0.07	0.169
5 orden	0.081	0.467	0.11	0.073	0.408
6 orden	0.093	0.519	0.113	0.131	0.412

Estacion Noreste

Ecuación	PST vs Fecha	PST vs Temperatura	PST vs Presión	PST vs vel. Viento	PST vs Humedad
Linear	0.023	0.062	0.019	0.0009	0.041
2 orden	0.024	0.064	0.032	0.095	0.086
3 orden	0.027	0.159	0.033	0.095	0.087
4 orden	0.033	0.189	0.047	0.097	0.128
5 orden	0.112	0.202	0.056	0.111	0.128
6 orden	0.114	0.202	0.07	0.123	0.145

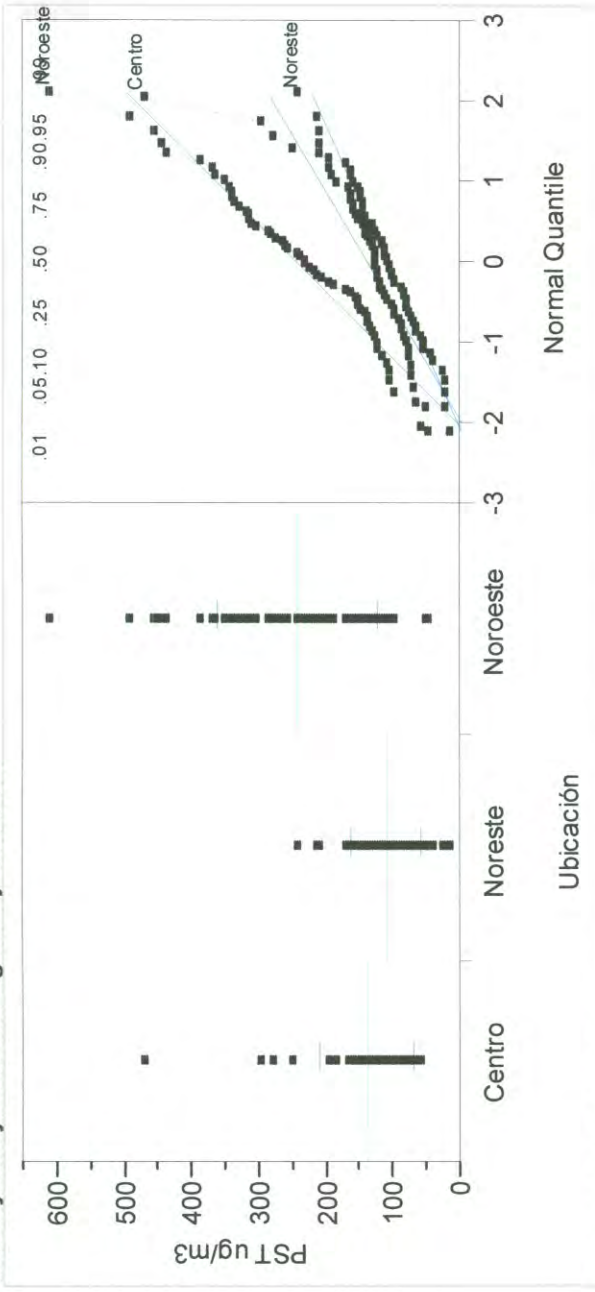
Estacion Noroeste

Ecuación	PST vs Fecha	PST vs Temperatura	PST vs Presión	PST vs vel. Viento	PST vs Humedad
Linear	0.011	0.045	0.011	0.033	0.019
2 orden	0.126	0.06	0.066	0.036	0.02
3 orden	0.179	0.064	0.12	0.039	0.023
4 orden	0.348	0.068	0.154	0.039	0.025
5 orden	0.357	0.072	0.157	0.052	0.026
6 orden	0.375	0.235	0.168	0.102	0.031

ANEXO 4

Resultados de la prueba de Van der Waerden para
Partículas Suspendidas Totales (PST).

Oneway Analysis of PST ug/m3 By Ubicación



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Centro	49	140.120	70.491	10.070	119.87	160.37
Noreste	55	110.989	52.945	7.139	96.68	125.30
Noroeste	56	244.323	119.245	15.935	212.39	276.26

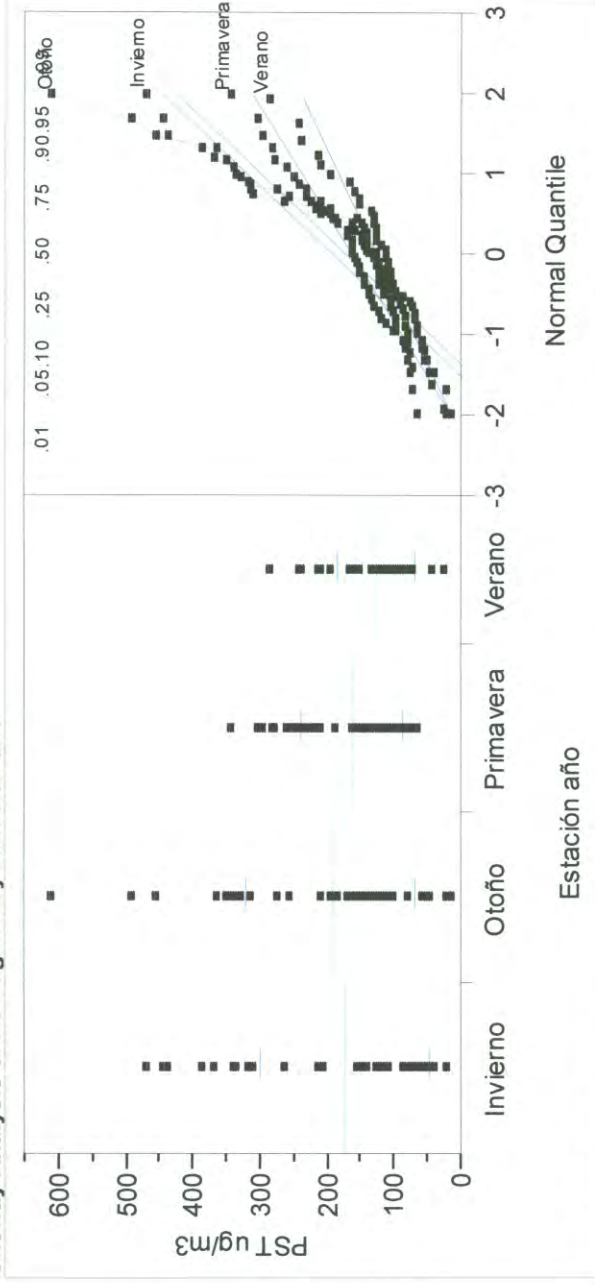
Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Centro	49	-8.0357	-0.16399	-1.412
Noreste	55	-30.8531	-0.56096	-5.262
Noroeste	56	38.8887	0.69444	6.605

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare 47.9146
 DF 2
 Prob>ChiSq <.0001

Fit Y by X Group
One-way Analysis of PST ug/m3 By Estación año



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Invierno	42	174.057	126.168	19.468	134.74	213.37
Otoño	41	194.944	126.483	19.753	155.02	234.87
Primavera	41	163.763	74.680	11.663	140.19	187.34
Verano	36	128.750	56.529	9.422	109.62	147.88

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Invierno	42	-2.3921	-0.05696	-0.440
Otoño	41	10.9219	0.26639	2.027
Primavera	41	2.2802	0.05562	0.423
Verano	36	-10.8100	-0.30028	-2.097

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	6.7397
DF	3
Prob>ChiSq	0.0807

ANEXO 5

Resultados de las pruebas a posteriori para Partículas
Suspendidas Totales (PST).

TABLA 1

PST		PRUEBA A POSTERIORI CORRESPONDIENTE A VAN DER WAERDEN				
ESTACION	Ni	SCORE MEAN		Y	X	
CENTRO	49	-0.16399	CEN-NORE	0.39697	0.318509163	
NORESTE	55	-0.56096	CEN-NORO	0.85843	0.317166451	
NOROESTE	56	0.69444	NORE-NORO	1.2554	0.307801532	
N	160	N-1-T1	111.0854	si Y mayor a X = diferencia		
K	3	N-K	157			
ALFA	0.05					
t(0.975,157)	1.9752					
T1	47.9146					
W1	1.31774328	S2	0.952335137			
W2	17.3071867					
W3	27.0058272					
W	45.6307571					

ANEXO 6

Resultados de concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) en aire ambiente en las tres estaciones de monitoreo, durante el periodo junio 2001 a mayo 2002.

Anexo 6a. Concentración de Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
en aire ambiente en Hermosillo, Son.

Fecha	Centro	Noreste	Noroeste
03-Jun-01		0.010	0.032
09-Jun-01	0.035	0.040	0.032
15-Jun-01	0.031	0.032	
21-Jun-01	0.035	0.009	
27-Jun-01	0.018	0.014	0.041
03-Jul-01			
09-Jul-01			
15-Jul-01	0.030	0.026	0.024
21-Jul-01	0.035		0.033
27-Jul-01			0.018
02-Ago-01	0.020	0.068	0.013
08-Ago-01	0.030	0.048	0.081
14-Ago-01	0.046	0.040	0.040
20-Ago-01	0.068	0.044	0.042
26-Ago-01	0.025	0.036	0.074
01-Sep-01		0.013	0.022
07-Sep-01	0.030	0.008	0.048
13-Sep-01	0.015	0.017	0.049
19-Sep-01	0.072	0.022	0.036
25-Sep-01	0.047	0.008	0.000
01-Oct-01		0.015	0.000
07-Oct-01	0.015	0.027	0.061
13-Oct-01	0.075	0.035	0.028
19-Oct-01	0.044	0.028	0.050
25-Oct-01	0.021	0.036	0.063
31-Oct-01	0.031	0.041	0.039
06-Nov-01	0.021	0.000	
12-Nov-01		0.000	0.043
18-Nov-01	0.015	0.029	0.030
24-Nov-01		0.009	0.069
30-Nov-01	0.011	0.000	0.067
06-Dic-01	0.034		0.019
12-Dic-01	0.029	0.059	0.000
18-Dic-01		0.064	0.047
24-Dic-01		0.017	0.035
30-Dic-01		0.000	0.059
06-Ene-02	0.017	0.029	0.064
12-Ene-02	0.025	0.035	0.076
18-Ene-02	0.080	0.048	0.015
24-Ene-02	0.014	0.008	0.029
30-Ene-02	0.006	0.022	0.014
05-Feb-02	0.000	0.000	0.004
11-Feb-02	0.021	0.000	0.005
17-Feb-02	0.000	0.004	0.029
23-Feb-02	0.006	0.003	0.023
01-Mar-02	0.000	0.007	0.029
07-Mar-02	0.017	0.007	0.013
13-Mar-02	0.023	0.011	0.010
19-Mar-02	0.015	0.013	
25-Mar-02	0.028	0.000	0.000
31-Mar-02	0.010	0.006	0.019
06-Abr-02	0.021	0.019	
12-Abr-02	0.016	0.019	0.013
18-Abr-02	0.000	0.011	0.015
24-Abr-02	0.030	0.021	0.020
30-Abr-02	0.021	0.019	0.016
06-May-02	0.018	0.019	0.021
12-May-02	0.000	0.021	0.009
18-May-02	0.000	0.008	0.024
24-May-02	0.014	0.039	
30-May-02	0.044	0.005	0.017

Anexo 6b. Concentración de Cd ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
en aire ambiente en Hermosillo, Son.

Fecha	Centro	Noreste	Noroeste
03-Jun-01		0.000	0.000
09-Jun-01	0.000	0.000	0.000
15-Jun-01	0.000	0.000	
21-Jun-01	0.000	0.000	
27-Jun-01	0.000	0.000	0.000
03-Jul-01			
09-Jul-01			
15-Jul-01	0.000	0.000	0.000
21-Jul-01	0.000		0.000
27-Jul-01			0.000
02-Ago-01	0.000	0.000	0.000
08-Ago-01	0.000	0.000	0.000
14-Ago-01	0.000	0.000	0.000
20-Ago-01	0.000	0.000	0.000
26-Ago-01	0.000	0.000	0.000
01-Sep-01		0.000	0.000
07-Sep-01	0.000	0.000	0.000
13-Sep-01	0.000	0.000	0.000
19-Sep-01	0.000	0.000	0.000
25-Sep-01	0.000	0.000	0.000
01-Oct-01		0.000	0.000
07-Oct-01	0.000	0.000	0.000
13-Oct-01	0.000	0.000	0.000
19-Oct-01	0.000	0.000	0.000
25-Oct-01	0.000	0.000	0.000
31-Oct-01	0.000	0.000	0.000
06-Nov-01	0.000	0.000	
12-Nov-01		0.000	0.000
18-Nov-01	0.000	0.000	0.000
24-Nov-01		0.000	0.000
30-Nov-01	0.000	0.000	0.000
06-Dic-01	0.000		0.000
12-Dic-01	0.000	0.000	0.000
18-Dic-01		0.000	0.000
24-Dic-01		0.000	0.000
30-Dic-01		0.000	0.000
06-Ene-02	0.000	0.000	0.000
12-Ene-02	0.000	0.000	0.000
18-Ene-02	0.000	0.000	0.000
24-Ene-02	0.000	0.000	0.000
30-Ene-02	0.000	0.000	0.000
05-Feb-02	0.000	0.000	0.000
11-Feb-02	0.007	0.000	0.000
17-Feb-02	0.000	0.000	0.000
23-Feb-02	0.000	0.000	0.000
01-Mar-02	0.000	0.000	0.000
07-Mar-02	0.000	0.000	0.004
13-Mar-02	0.000	0.000	0.000
19-Mar-02	0.000	0.000	
25-Mar-02	0.000	0.000	0.000
31-Mar-02	0.000	0.000	0.000
06-Abr-02	0.000	0.000	
12-Abr-02	0.000	0.000	0.000
18-Abr-02	0.000	0.000	0.000
24-Abr-02	0.000	0.003	0.000
30-Abr-02	0.005	0.000	0.005
06-May-02	0.004	0.004	0.004
12-May-02	0.000	0.000	0.009
18-May-02	0.000	0.000	0.000
24-May-02	0.005	0.000	
30-May-02	0.000	0.000	0.004

Anexo 6c. Concentración de Ni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
en aire ambiente en Hermosillo, Son.

Fecha	Centro	Noreste	Noroeste
03-Jun-01		0.010	0.014
09-Jun-01	0.013	0.020	0.023
15-Jun-01	0.009	0.009	
21-Jun-01	0.004	0.009	
27-Jun-01	0.013	0.005	0.005
03-Jul-01			
09-Jul-01			
15-Jul-01	0.009	0.009	0.005
21-Jul-01	0.009		0.009
27-Jul-01			0.014
02-Ago-01	0.008	0.005	0.004
08-Ago-01	0.004	0.005	0.004
14-Ago-01	0.009	0.000	0.017
20-Ago-01	0.009	0.005	0.005
26-Ago-01	0.010	0.005	0.011
01-Sep-01		0.004	0.009
07-Sep-01	0.015	0.012	0.009
13-Sep-01	0.015	0.021	0.022
19-Sep-01	0.010	0.004	0.018
25-Sep-01	0.016	0.008	0.012
01-Oct-01		0.011	0.009
07-Oct-01	0.005	0.008	0.009
13-Oct-01	0.005	0.019	0.018
19-Oct-01	0.016	0.020	0.020
25-Oct-01	0.010	0.016	0.010
31-Oct-01	0.010	0.016	0.025
06-Nov-01	0.000	0.004	
12-Nov-01		0.015	0.010
18-Nov-01	0.025	0.004	0.005
24-Nov-01		0.009	0.016
30-Nov-01	0.006	0.012	0.010
06-Dic-01	0.005		0.005
12-Dic-01	0.005	0.004	0.005
18-Dic-01		0.007	0.016
24-Dic-01		0.003	0.015
30-Dic-01		0.000	0.027
06-Ene-02	0.011	0.015	0.005
12-Ene-02	0.006	0.007	0.015
18-Ene-02	0.006	0.007	0.020
24-Ene-02	0.000	0.003	0.010
30-Ene-02	0.006	0.003	0.023
05-Feb-02	0.019	0.012	0.004
11-Feb-02	0.014	0.000	0.005
17-Feb-02	0.006	0.004	0.006
23-Feb-02	0.011	0.003	0.019
01-Mar-02	0.022	0.007	0.000
07-Mar-02	0.006	0.007	0.021
13-Mar-02	0.000	0.011	0.025
19-Mar-02	0.010	0.003	
25-Mar-02	0.017	0.016	0.005
31-Mar-02	0.000	0.006	0.019
06-Abr-02	0.005	0.004	
12-Abr-02	0.011	0.008	0.013
18-Abr-02	0.005	0.007	0.005
24-Abr-02	0.015	0.010	0.020
30-Abr-02	0.010	0.013	0.005
06-May-02	0.000	0.004	0.000
12-May-02	0.000	0.000	0.014
18-May-02	0.000	0.008	0.016
24-May-02	0.000	0.000	
30-May-02	0.010	0.005	0.000

Anexo 6d. Concentración de Cu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
en aire ambiente en Hermosillo, Son.

Fecha	Centro	Noreste	Noroeste
03-Jun-01		0.084	0.042
09-Jun-01	0.035	0.109	0.028
15-Jun-01	0.026	0.051	
21-Jun-01	0.044	0.059	
27-Jun-01	0.026	0.042	0.032
03-Jul-01			
09-Jul-01			
15-Jul-01	0.039	0.090	0.019
21-Jul-01	0.035		0.037
27-Jul-01			0.054
02-Ago-01	0.057	0.015	0.026
08-Ago-01	0.061	0.038	0.045
14-Ago-01	0.046	0.030	0.023
20-Ago-01	0.009	0.025	0.048
26-Ago-01	0.035	0.030	0.029
01-Sep-01		0.022	0.027
07-Sep-01	0.030	0.024	0.013
13-Sep-01	0.050	0.038	0.036
19-Sep-01	0.005	0.027	0.027
25-Sep-01	0.021	0.015	0.033
01-Oct-01		0.034	0.017
07-Oct-01		0.019	0.042
13-Oct-01	0.021	0.027	0.023
19-Oct-01	0.038	0.028	0.050
25-Oct-01		0.032	0.024
31-Oct-01	0.016	0.028	0.029
06-Nov-01	0.031	0.039	
12-Nov-01		0.035	0.057
18-Nov-01	0.025	0.038	0.060
24-Nov-01		0.073	0.074
30-Nov-01	0.078	0.060	0.041
06-Dic-01	0.053		0.048
12-Dic-01	0.106	0.087	0.061
18-Dic-01		0.026	0.068
24-Dic-01		0.031	0.056
30-Dic-01		0.017	0.069
06-Ene-02	0.017	0.022	0.059
12-Ene-02	0.025	0.032	0.045
18-Ene-02	0.040	0.022	0.039
24-Ene-02	0.014	0.026	0.068
30-Ene-02	0.032	0.013	0.063
05-Feb-02	0.025	0.043	0.043
11-Feb-02	0.042	0.046	0.036
17-Feb-02	0.031	0.032	0.070
23-Feb-02	0.039	0.029	0.070
01-Mar-02	0.027	0.062	0.029
07-Mar-02	0.028	0.099	0.047
13-Mar-02	0.040	0.032	0.055
19-Mar-02	0.056	0.033	
25-Mar-02	0.218	0.046	0.045
31-Mar-02	0.056	0.073	0.053
06-Abr-02	0.047	0.022	
12-Abr-02	0.027	0.034	0.025
18-Abr-02	0.027	0.055	0.034
24-Abr-02	0.045	0.055	0.035
30-Abr-02	0.036	0.025	0.032
06-May-02	0.053	0.045	0.047
12-May-02	0.048	0.041	0.032
18-May-02	0.057	0.070	0.085
24-May-02	0.053	0.119	
30-May-02	0.044	0.044	0.112

Anexo 6e. Concentración de Cr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
en aire ambiente en Hermosillo, Son.

Fecha	Centro	Noreste	Noroeste
03-Jun-01		0.010	0.014
09-Jun-01	0.000	0.005	0.005
15-Jun-01	0.004	0.005	
21-Jun-01	0.004	0.009	
27-Jun-01	0.000	0.005	0.005
03-Jul-01			
09-Jul-01			
15-Jul-01	0.004	0.004	0.005
21-Jul-01	0.004		0.005
27-Jul-01			0.005
02-Ago-01	0.004	0.010	0.004
08-Ago-01	0.004	0.005	0.004
14-Ago-01	0.009	0.005	0.006
20-Ago-01	0.005	0.005	0.005
26-Ago-01	0.010	0.005	0.011
01-Sep-01		0.004	0.004
07-Sep-01	0.005	0.008	0.000
13-Sep-01	0.000	0.008	0.009
19-Sep-01	0.010	0.009	0.005
25-Sep-01	0.010	0.008	0.004
01-Oct-01		0.008	0.009
07-Oct-01	0.010	0.008	0.009
13-Oct-01	0.011	0.008	0.014
19-Oct-01	0.011	0.008	0.015
25-Oct-01	0.010	0.008	0.005
31-Oct-01	0.010	0.008	0.010
06-Nov-01	0.000	0.004	
12-Nov-01		0.008	0.014
18-Nov-01	0.000	0.008	0.010
24-Nov-01		0.009	0.021
30-Nov-01	0.011	0.004	0.020
06-Dic-01	0.000		0.010
12-Dic-01	0.005	0.008	0.005
18-Dic-01		0.015	0.005
24-Dic-01		0.006	0.000
30-Dic-01		0.006	0.016
06-Ene-02	0.006	0.004	0.005
12-Ene-02	0.000	0.007	0.015
18-Ene-02	0.000	0.004	0.010
24-Ene-02	0.007	0.000	0.019
30-Ene-02	0.000	0.000	0.005
05-Feb-02	0.019	0.008	0.009
11-Feb-02	0.028	0.006	0.009
17-Feb-02	0.019	0.012	0.023
23-Feb-02	0.022	0.010	0.014
01-Mar-02	0.005	0.007	0.016
07-Mar-02	0.011	0.011	0.013
13-Mar-02	0.017	0.007	0.015
19-Mar-02	0.020	0.013	
25-Mar-02	0.006	0.010	0.010
31-Mar-02	0.025	0.019	0.005
06-Abr-02	0.021	0.015	
12-Abr-02	0.011	0.019	0.021
18-Abr-02	0.016	0.007	0.010
24-Abr-02	0.015	0.000	0.015
30-Abr-02	0.000	0.003	0.005
06-May-02	0.009	0.008	0.017
12-May-02	0.004	0.000	0.005
18-May-02	0.000	0.008	0.012
24-May-02	0.005	0.003	
30-May-02	0.015	0.005	0.008

ANEXO 7

Resultados del Coeficiente de Determinación (R^2) para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

Anexo 7a. Valores de Coeficiente de Determinación (R^2) para Pb y datos climáticos según estación de muestreo

Estacion Centro

Ecuación	Pb vs Fecha	Pb vs Temperatura	Pb vs Presión	Pb vs vel. Viento	Pb vs Humedad
Lineal	0.178	0.092	0.012	0.017	0.000
2 orden	0.182	0.139	0.031	0.017	0.126
3 orden	0.246	0.209	0.042	0.017	0.133
4 orden	0.248	0.212	0.093	0.053	0.228
5 orden	0.250	0.217	0.106	0.063	0.236
6 orden	0.271	0.245	0.117	0.065	0.238

Estacion Noreste

Ecuación	Pb vs Fecha	Pb vs Temperatura	Pb vs Presión	Pb vs vel. Viento	Pb vs Humedad
Lineal	0.095	0.014	0.008	0.000	0.007
2 orden	0.095	0.198	0.125	0.000	0.037
3 orden	0.135	0.198	0.203	0.013	0.037
4 orden	0.136	0.199	0.216	0.038	0.054
5 orden	0.155	0.202	0.233	0.048	0.132
6 orden	0.192	0.203	0.291	0.081	0.133

Estacion Noroeste

Ecuación	Pb vs Fecha	Pb vs Temperatura	Pb vs Presión	Pb vs vel. Viento	Pb vs Humedad
Lineal	0.132	0.039	0.001	0.050	0.004
2 orden	0.192	0.056	0.002	0.092	0.072
3 orden	0.206	0.069	0.037	0.092	0.074
4 orden	0.239	0.078	0.109	0.105	0.102
5 orden	0.241	0.078	0.109	0.105	0.110
6 orden	0.252	0.106	0.141	0.115	0.122

Anexo 7b. Valores de Coeficiente de Determinación (R^2) para Cd y datos climáticos según estación de muestreo

Estacion Centro

Ecuación	Cd vs Fecha	Cd vs Temperatura	Cd vs Presión	Cd vs vel. Viento	Cd vs Humedad
Lineal	0.100	0.000	0.001	0.000	0.004
2 orden	0.132	0.012	0.031	0.016	0.283
3 orden	0.137	0.015	0.042	0.049	0.289
4 orden	0.140	0.019	0.068	0.059	0.353
5 orden	0.141	0.026	0.107	0.071	0.368
6 orden	0.144	0.065	0.107	0.071	0.488

Estacion Noreste

Ecuación	Cd vs Fecha	Cd vs Temperatura	Cd vs Presión	Cd vs vel. Viento	Cd vs Humedad
Lineal	0.067	0.019	0.019	0.010	0.044
2 orden	0.110	0.019	0.025	0.010	0.078
3 orden	0.117	0.032	0.030	0.035	0.089
4 orden	0.123	0.046	0.060	0.048	0.089
5 orden	0.167	0.046	0.094	0.058	0.089
6 orden	0.231	0.057	0.095	0.096	0.089

Estacion Noroeste

Ecuación	Cd vs Fecha	Cd vs Temperatura	Cd vs Presión	Cd vs vel. Viento	Cd vs Humedad
Lineal	0.197	0.018	0.046	0.019	0.126
2 orden	0.353	0.023	0.055	0.043	0.223
3 orden	0.417	0.043	0.074	0.050	0.251
4 orden	0.430	0.067	0.148	0.056	0.251
5 orden	0.430	0.067	0.191	0.056	0.255
6 orden	0.434	0.127	0.191	0.129	0.258

Anexo 7c. Valores de Coeficiente de Determinación (R^2) para Ni y datos climáticos según estación de muestreo

Estacion Centro

Ecuación	Ni vs Fecha	Ni vs Temperatura	Ni vs Presión	Ni vs vel. Viento	Ni vs Humedad
Lineal	0.046	0.000	0.005	0.000	0.115
2 orden	0.075	0.000	0.008	0.246	0.117
3 orden	0.083	0.042	0.083	0.261	0.124
4 orden	0.088	0.042	0.084	0.327	0.197
5 orden	0.094	0.059	0.123	0.355	0.217
6 orden	0.140	0.059	0.229	0.361	0.240

Estacion Noreste

Ecuación	Ni vs Fecha	Ni vs Temperatura	Ni vs Presión	Ni vs vel. Viento	Ni vs Humedad
Lineal	0.062	0.044	0.029	0.040	0.008
2 orden	0.067	0.045	0.027	0.048	0.069
3 orden	0.067	0.046	0.029	0.064	0.080
4 orden	0.083	0.046	0.041	0.066	0.152
5 orden	0.265	0.047	0.069	0.100	0.184
6 orden	0.265	0.050	0.078	0.122	0.185

Estacion Noroeste

Ecuación	Ni vs Fecha	Ni vs Temperatura	Ni vs Presión	Ni vs vel. Viento	Ni vs Humedad
Lineal	0.001	0.002	0.011	0.015	0.016
2 orden	0.023	0.005	0.059	0.017	0.017
3 orden	0.051	0.028	0.061	0.025	0.025
4 orden	0.056	0.056	0.069	0.027	0.035
5 orden	0.112	0.091	0.082	0.059	0.052
6 orden	0.118	0.112	0.087	0.114	0.151

Anexo 7d. Valores de Coeficiente de Determinación (R^2) para Cu y datos climáticos según estación de muestreo

Estacion Centro

Ecuación	Cu vs Fecha	Cu vs Temperatura	Cu vs Presión	Cu vs vel. Viento	Cu vs Humedad
Lineal	0.041	0.021	0.022	0.001	0.01
2 orden	0.045	0.039	0.039	0.009	0.01
3 orden	0.048	0.041	0.039	0.012	0.017
4 orden	0.056	0.063	0.064	0.055	0.018
5 orden	0.056	0.086	0.069	0.109	0.018
6 orden	0.064	0.123	0.069	0.122	0.032

Estacion Noreste

Ecuación	Cu vs Fecha	Cu vs Temperatura	Cu vs Presión	Cu vs vel. Viento	Cu vs Humedad
Lineal	0.002	0.013	0.023	0.005	0.005
2 orden	0.229	0.035	0.094	0.054	0.008
3 orden	0.262	0.035	0.098	0.101	0.014
4 orden	0.325	0.071	0.099	0.12	0.023
5 orden	0.325	0.074	0.136	0.121	0.062
6 orden	0.326	0.074	0.15	0.156	0.091

Estacion Noroeste

Ecuación	Cu vs Fecha	Cu vs Temperatura	Cu vs Presión	Cu vs vel. Viento	Cu vs Humedad
Lineal	0.187	0.165	0.065	0.007	0.027
2 orden	0.189	0.165	0.085	0.01	0.044
3 orden	0.19	0.167	0.111	0.014	0.06
4 orden	0.368	0.179	0.216	0.052	0.164
5 orden	0.566	0.183	0.236	0.073	0.166
6 orden	0.579	0.185	0.236	0.1	0.183

Anexo 7e. Valores de Coeficiente de Determinación (R^2) para Cr y datos climáticos según estación de muestreo

Estación Centro

Ecuación	Cr vs Fecha	Cr vs Temperatura	Cr vs Presión	Cr vs vel. Viento	Cr vs Humedad
Lineal	0.046	0.017	0.001	0.031	0.001
2 orden	0.165	0.125	0.113	0.036	0.143
3 orden	0.189	0.159	0.136	0.042	0.238
4 orden	0.281	0.213	0.139	0.057	0.245
5 orden	0.284	0.220	0.139	0.078	0.274
6 orden	0.384	0.350	0.147	0.088	0.281

Estación Noreste

Ecuación	Cr vs Fecha	Cr vs Temperatura	Cr vs Presión	Cr vs vel. Viento	Cr vs Humedad
Lineal	0.008	0.009	0.014	0.002	0.008
2 orden	0.015	0.105	0.026	0.010	0.053
3 orden	0.052	0.111	0.031	0.011	0.076
4 orden	0.097	0.183	0.076	0.011	0.079
5 orden	0.187	0.183	0.114	0.012	0.080
6 orden	0.199	0.338	0.114	0.013	0.084

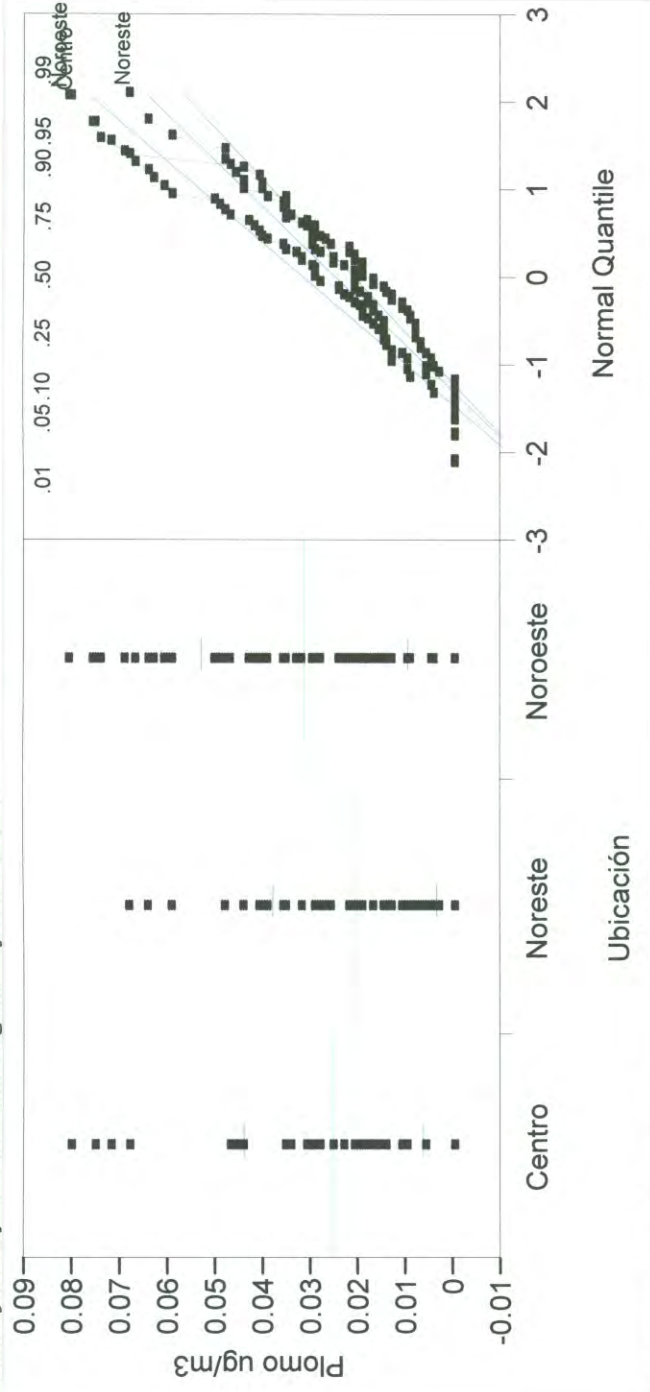
Estación Noroeste

Ecuación	Cr vs Fecha	Cr vs Temperatura	Cr vs Presión	Cr vs vel. Viento	Cr vs Humedad
Lineal	0.137	0.022	0.004	0.008	0.019
2 orden	0.158	0.173	0.104	0.015	0.019
3 orden	0.213	0.188	0.105	0.015	0.019
4 orden	0.223	0.204	0.127	0.015	0.020
5 orden	0.254	0.228	0.127	0.020	0.081
6 orden	0.255	0.262	0.133	0.075	0.102

ANEXO 8

Resultados de la Prueba de Van der Waerden para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

Anexo 8a. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Plomo según ubicación
Oneway Analysis of Plomo ug/m3 By Ubicación



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Centro	50	0.025180	0.019037	0.00269	0.01977	0.03059
Noreste	56	0.020875	0.017192	0.00230	0.01627	0.02548
Noroeste	53	0.031321	0.021485	0.00295	0.02540	0.03724

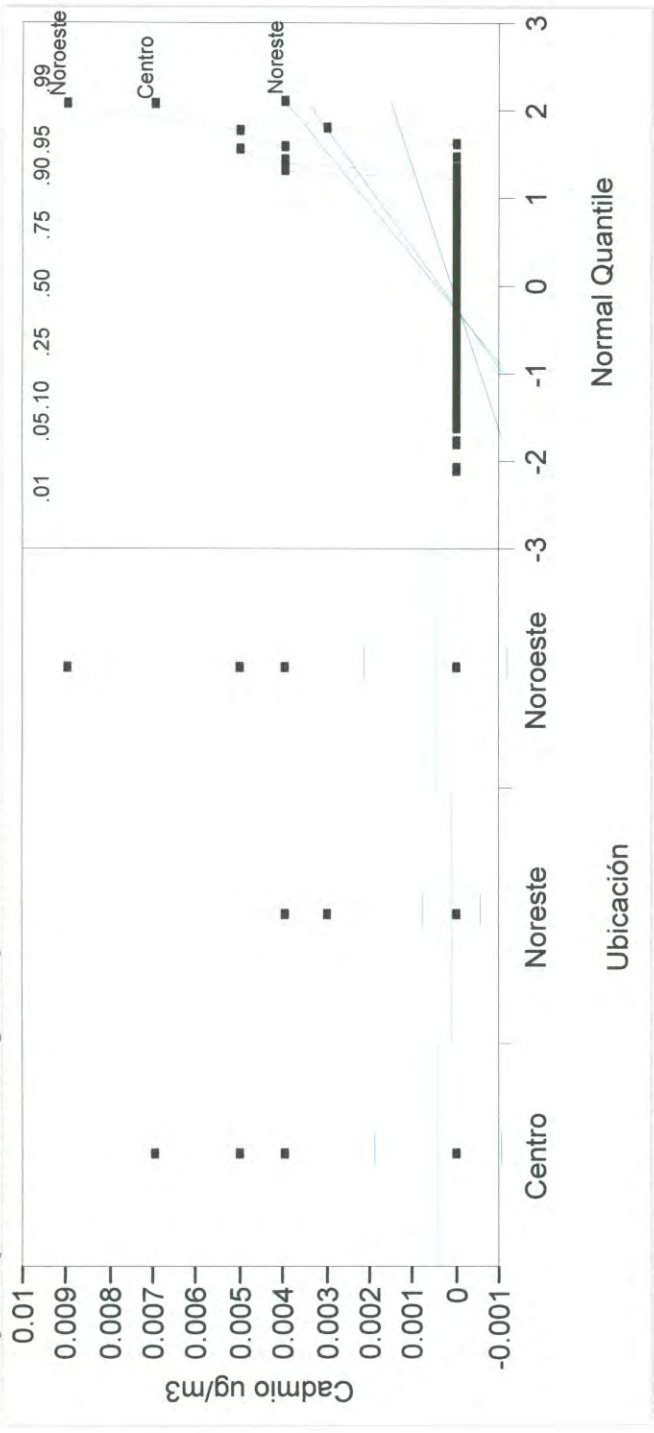
Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Centro	50	-0.3916	-0.00783	-0.069
Noreste	56	-13.5539	-0.24203	-2.323
Noroeste	53	13.9454	0.26312	2.421

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	7.4069
DF	2
Prob>ChiSq	0.0246

Anexo 8b. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Cadmio según ubicación
Oneway Analysis of Cadmio ug/m3 By Ubicación



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Centro	50	0.000420	0.001472	0.00021	0.0000	0.00084
Noreste	56	0.000125	0.000662	0.00009	-0.0001	0.00030
Noroeste	53	0.000491	0.001648	0.00023	0.0000	0.00094

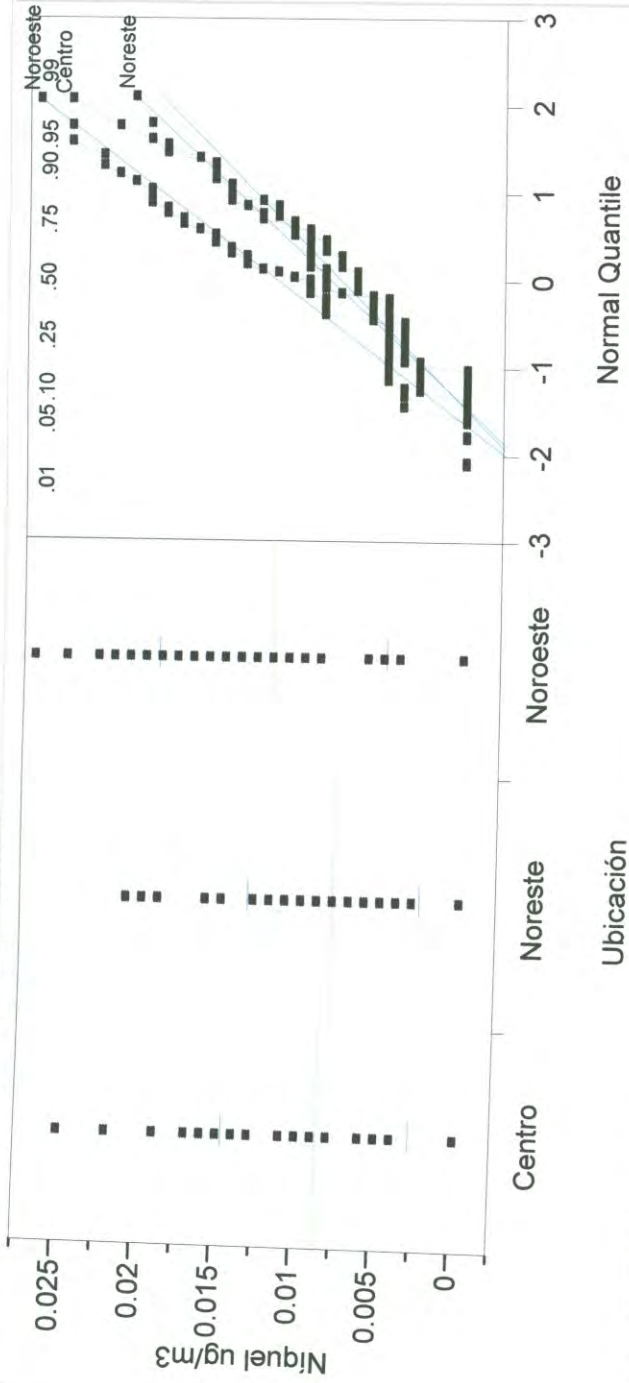
Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Centro	50	1.49267	0.02985	0.497
Noreste	56	-4.30064	-0.07680	-1.393
Noroeste	53	2.80797	0.05298	0.922

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	1.9925	DF	2	Prob>ChiSq	0.3693
-----------	--------	----	---	------------	--------

Anexo 8c. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Niquel según ubicación
 Oneway Analysis of Niquel ug/m3 By Ubicación



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev
Centro	50	0.008600	0.005911
Noreste	56	0.007893	0.005406
Noroeste	53	0.011906	0.007222

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean
Centro	50	-5.1151	-0.10230
Noreste	56	-13.3200	-0.23786
Noroeste	53	18.4350	0.34783

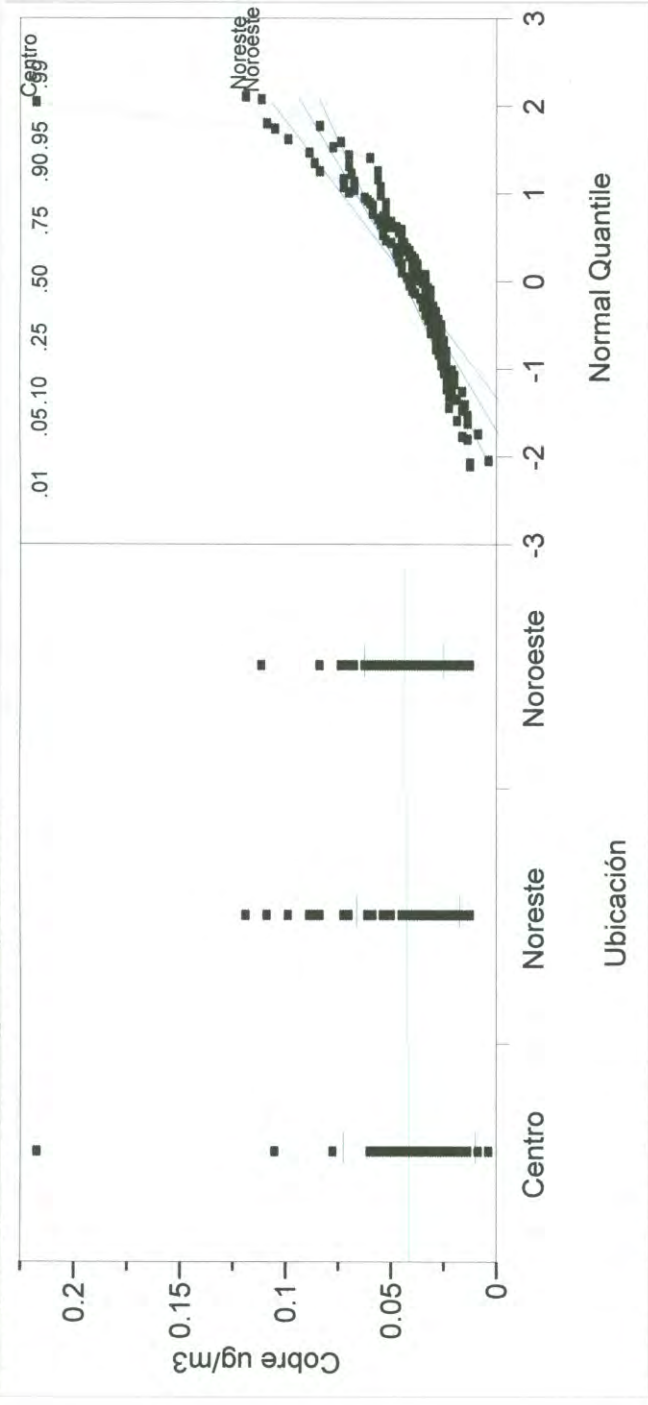
1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	10.7962
DF	2
Prob>ChiSq	0.0045

Level	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Centro	0.00084	0.00692	0.01028
Noreste	0.00072	0.00645	0.00934
Noroeste	0.00099	0.00991	0.01390

Level	(Mean-Mean0)/Std0
Centro	-0.903
Noreste	-2.286
Noroeste	3.206

Anexo 8d. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Cobre según ubicación
Oneway Analysis of Cobre ug/m3 By Ubicación



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Centro	48	0.041958	0.031447	0.00454	0.03283	0.05109
Noreste	56	0.042732	0.024315	0.00325	0.03622	0.04924
Noroeste	53	0.044566	0.019063	0.00262	0.03931	0.04982

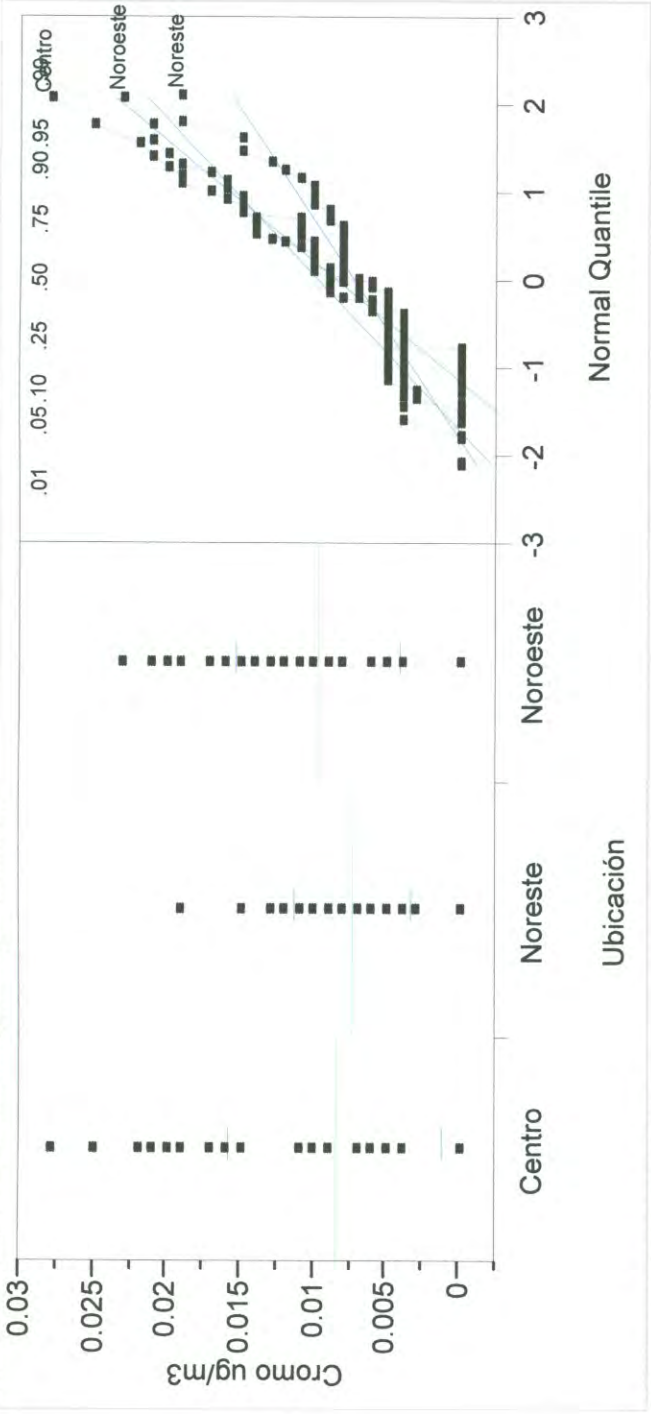
Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Centro	48	-5.97075	-0.12439	-1.061
Noreste	56	-2.29683	-0.04101	-0.392
Noroeste	53	8.26758	0.15599	1.431

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
2.2360	2	0.3269

Anexo 8e. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Cromo según ubicación
Oneway Analysis of Cromo ug/m3 By Ubicación



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Centro	50	0.008440	0.007304	0.00103	0.00636	0.01052
Noreste	56	0.007268	0.003975	0.00053	0.00620	0.00833
Noroeste	53	0.009717	0.005600	0.00077	0.00817	0.01126

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

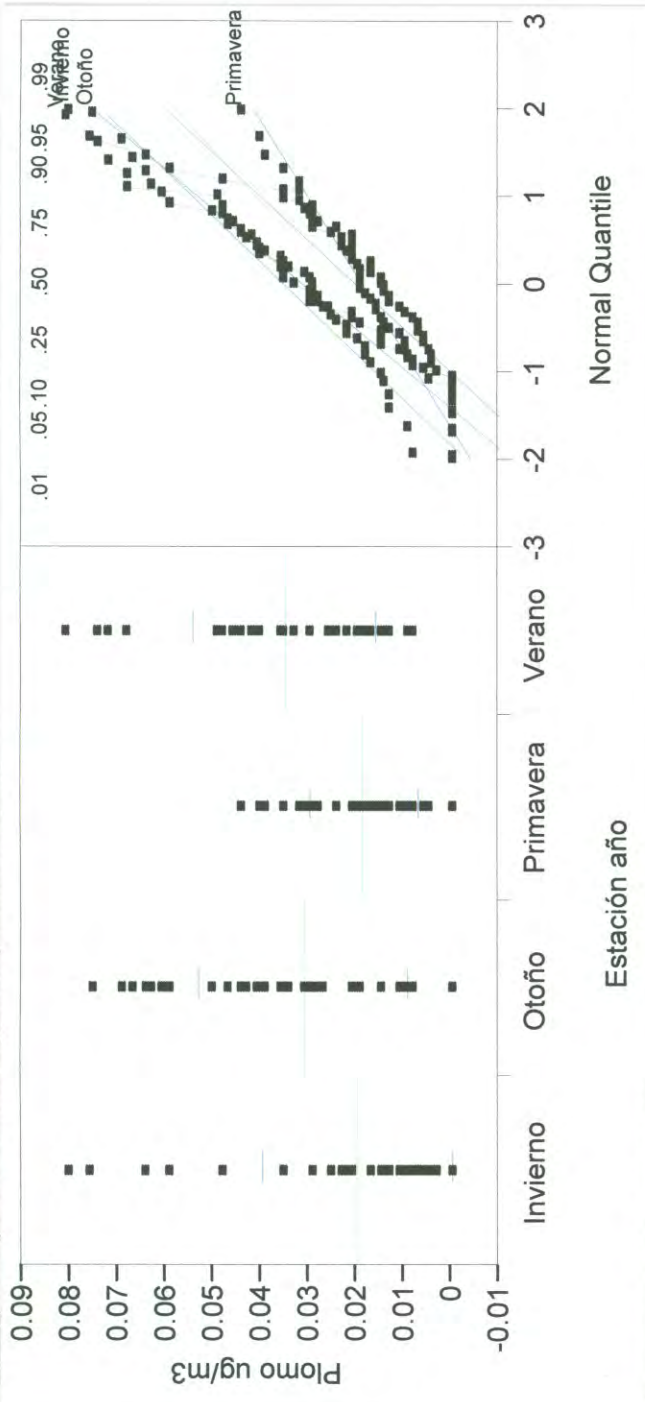
Level	Count	Score Sum	Score Mean
Centro	50	-3.4204	-0.06841
Noreste	56	-8.8031	-0.15720
Noroeste	53	12.2235	0.23063

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	4.7606
DF	2
Prob>ChiSq	0.0925

(Mean-Mean0)/Std0
 -0.605
 -1.514
 2.130

Anexo 8f. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Plomo según estación del año
 Oneway Analysis of Plomo ug/m3 By Estación año



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err	Mean	Lower 95%	Upper 95%
Invierno	42	0.019833	0.020077	0.00310	0.01358	0.02609	
Otoño	39	0.031026	0.021869	0.00351	0.02393	0.03812	
Primavera	41	0.018415	0.011537	0.00180	0.01477	0.02206	
Verano	37	0.034865	0.019088	0.00314	0.02850	0.04123	

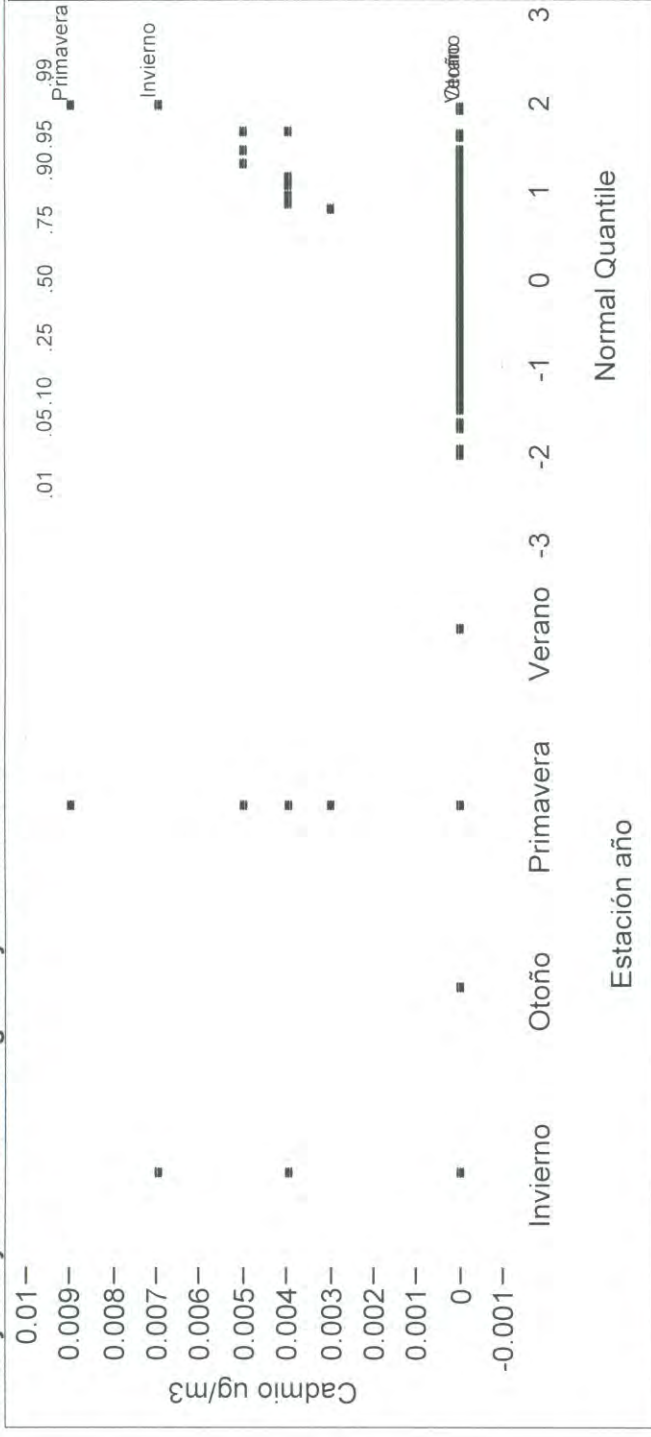
Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Invierno	42	-13.9908	-0.33311	-2.598
Otoño	39	7.7809	0.19951	1.480
Primavera	41	-12.3674	-0.30164	-2.314
Verano	37	18.5773	0.50209	3.599

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	20.5293	DF	3	Prob>ChiSq	0.0001
-----------	---------	----	---	------------	--------

Anexo 8g. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Cadmio según estación del año
Oneway Analysis of Cadmio ug/m3 By Estación año



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Invierno	42	0.000262	0.001231	0.00019	-0.0001	0.00065
Otoño	39	0.000000	0.000000	0.00000	0.0000	0.00000
Primavera	41	0.001049	0.002144	0.00033	0.0004	0.00173
Verano	37	0.000000	0.000000	0.00000	0.0000	0.00000

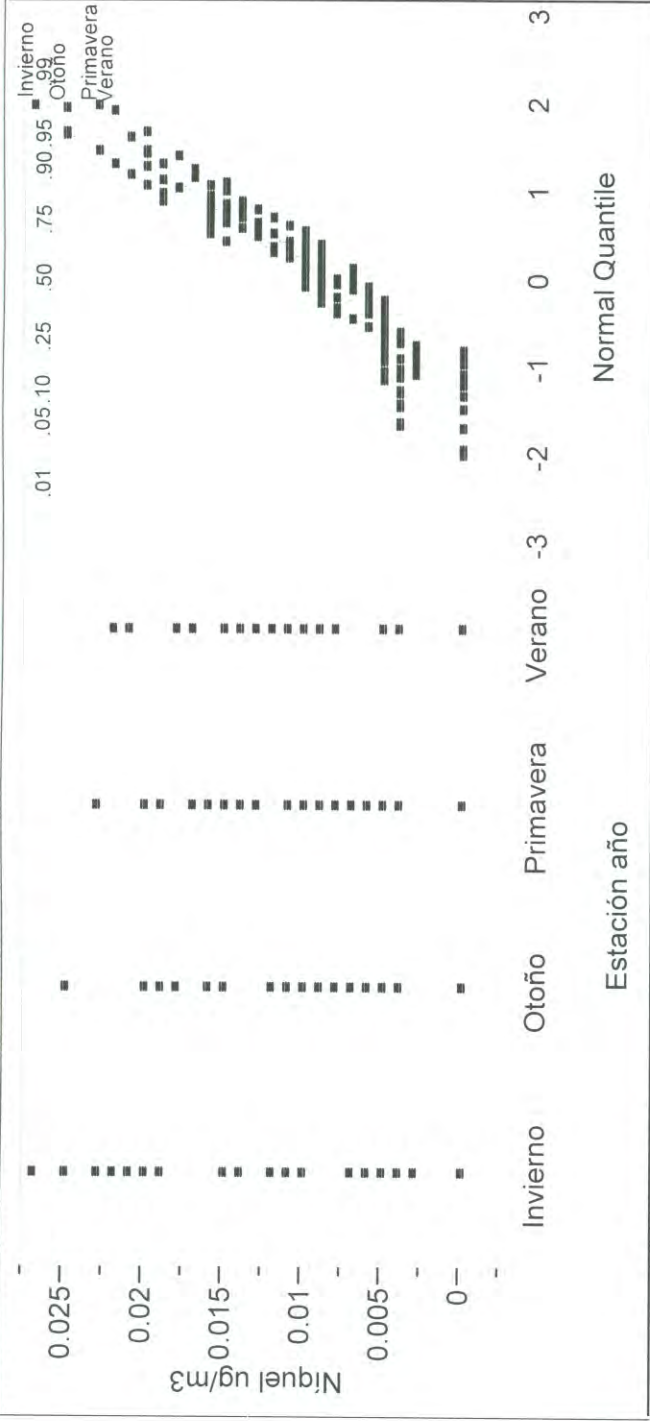
Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Invierno	42	-1.6163	-0.03848	-0.567
Otoño	39	-5.3711	-0.13772	-1.931
Primavera	41	12.0830	0.29471	4.273
Verano	37	-5.0956	-0.13772	-1.866

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare 19.2729
 DF 3
 Prob>ChiSq 0.0002

Anexo 8h. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Níquel según estación del año
Oneway Analysis of Níquel ug/m3 By Estación año



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Invierno	42	0.009452	0.007481	0.00115	0.00712	0.01178
Otoño	39	0.010923	0.006136	0.00098	0.00893	0.01291
Primavera	41	0.008512	0.006562	0.00102	0.00644	0.01058
Verano	37	0.008946	0.005126	0.00084	0.00724	0.01066

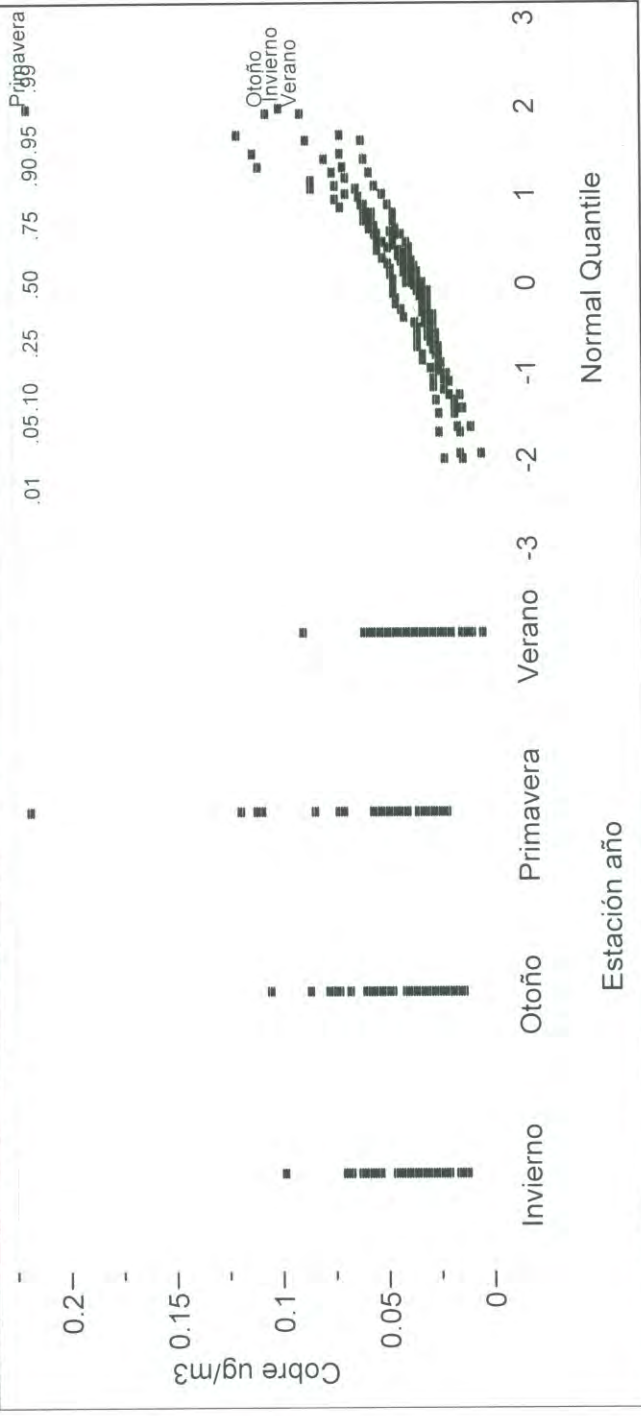
Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Invierno	42	-1.05410	-0.02510	-0.196
Otoño	39	9.66118	0.24772	1.841
Primavera	41	-6.90057	-0.16831	-1.293
Verano	37	-1.70650	-0.04612	-0.331

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
3.9107	3	0.2713

Anexo 8i. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Cobre según estación del año
Oneway Analysis of Cobre ug/m3 By Estación año



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Invierno	42	0.040571	0.018434	0.00284	0.03483	0.04632
Otoño	37	0.042081	0.022014	0.00362	0.03474	0.04942
Primavera	41	0.054024	0.035145	0.00549	0.04293	0.06512
Verano	37	0.034946	0.016355	0.00269	0.02949	0.04040

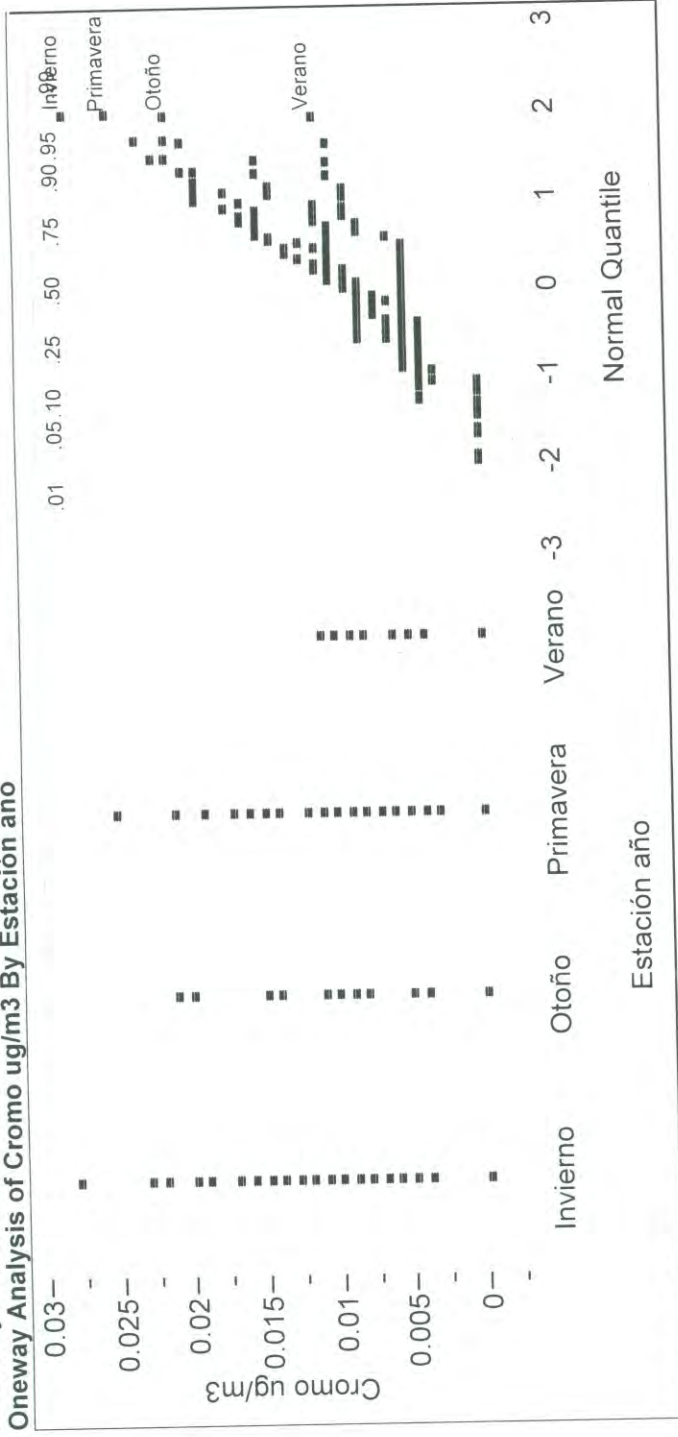
Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Invierno	42	-2.3276	-0.05542	-0.430
Otoño	37	-1.6317	-0.04410	-0.315
Primavera	41	16.8538	0.41107	3.140
Verano	37	-12.8945	-0.34850	-2.486

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	12.2206
DF	3
Prob>ChiSq	0.0067

Anexo 8j. Promedio, desviación estándar y prueba de Van der Waerden para Cromo según estación del año
Oneway Analysis of Cromo ug/m3 By Estación año



Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Invierno	42	0.010095	0.007060	0.00109	0.00790	0.01230
Otoño	39	0.008744	0.004575	0.00073	0.00726	0.01023
Primavera	41	0.009146	0.006544	0.00102	0.00708	0.01121
Verano	37	0.005514	0.002735	0.00045	0.00460	0.00643

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Invierno	42	9.9940	0.23795	1.862
Otoño	39	4.3135	0.11060	0.824
Primavera	41	3.3265	0.08113	0.625
Verano	37	-17.6340	-0.47659	-3.428

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	12.3704
DF	3
Prob>ChiSq	0.0062

ANEXO 9

Resultados de las pruebas a posteriori para metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

TABLA 1

Níquel PRUEBA A POSTERIORI CORRESPONDIENTE A VAN DER WAERDEN					
ESTACION	Ni	SCORE MEAN		Y	X
CENTRO	50	-0.1023	CEN-NORE	0.13556	0.361170249
NORESTE	56	-0.23786	CEN-NORO	0.45013	0.365960091
NOROESTE	53	0.34783	NORE-NORO	0.58569	0.355729066
N	159	N-1-T1	147.2038	si Y mayor a X = diferencia	
K	3	N-K	156		
ALFA	0.05				
t(0.975,156)	1.9753				
T1	10.7962				
W1	0.5232645	S2	0.935870059		
W2	3.16833326				
W3	6.41224257				
W	10.1038403				

TABLA 2

Plomo PRUEBA A POSTERIORI CORRESPONDIENTE A VAN DER WAERDEN					
EST. AÑO	Ni	SCORE MEAN		Y	X
PRIMAVERA	42	-0.33311	PRI-VER	0.53262	0.400813009
VERANO	39	0.19951	PRI-OTO	0.03147	0.395711544
OTOÑO	41	-0.30164	PRI-INV	0.8352	0.406391192
INVIERNO	37	0.50209	VER-OTO	0.50115	0.403159603
			VER-INV	0.30258	0.413646999
			OTO-INV	0.80373	0.40870576
N	159	N-1-T1	137.4707	si Y mayor a X = diferencia	
K	4	N-K	155		
ALFA	0.05				
t(0.975,155)	1.9754				
T1	20.5293				
W1	4.66041543	S2	0.9386938		
W2	1.55236536				
W3	3.73045427				
W4	9.32749162				
W	19.2707267				

TABLA 3

Cadmio PRUEBA A POSTERIORI CORRESPONDIENTE A VAN DER WAERDEN						
EST. AÑO	Ni	SCORE MEAN		Y	X	
PRIMAVERA	42	-0.03848		PRI-VER	0.09924	0.213038394
VERANO	39	-0.13772		PRI-OTO	0.33319	0.210326886
OTOÑO	41	0.29471		PRI-INV	0.09924	0.216003286
INVIERNO	37	-0.13772		VER-OTO	0.43243	0.214285646
				VER-INV	0	0.219859862
				OTO-INV	0.43243	0.217233516
N	159		N-1-T1	138.7271	si Y mayor a X = diferencia	
K	4		N-K	155		
ALFA	0.05					
t(0.975,155)	1.9754					
T1	19.2729					
W1	0.06218984		S2	0.26278764		
W2	0.73970514					
W3	3.56101335					
W4	0.70177154					
W	5.06467986					

TABLA 4

Cobre PRUEBA A POSTERIORI CORRESPONDIENTE A VAN DER WAERDEN						
EST. AÑO	Ni	SCORE MEAN		Y	X	
PRIMAVERA	42	-0.05542		PRI-VER	0.01132	0.421113309
VERANO	37	-0.0441		PRI-OTO	0.46649	0.410046775
OTOÑO	41	0.41107		PRI-INV	0.29308	0.421113309
INVIERNO	37	-0.3485		VER-OTO	0.45517	0.423511726
				VER-INV	0.3044	0.434235239
				OTO-INV	0.75957	0.423511726
N	157		N-1-T1	143.7794	si Y mayor a X = diferencia	
K	4		N-K	153		
ALFA	0.05					
t(0.975,153)	1.9756					
T1	12.2206					
W1	0.12899781		S2	0.95108336		
W2	0.07195797					
W3	6.92812034					
W4	4.49373325					
W	11.6228094					

TABLA 5

Cromo		PRUEBA A POSTERIORI CORRESPONDIENTE A VAN DER WAERDEN				
EST. AÑO	Ni	SCORE MEAN		Y	X	
PRIMAVERA	42	0.23795		PRI-VER 0.12735	0.411059885	
VERANO	39	0.1106		PRI-OTO 0.15682	0.405828	
OTOÑO	41	0.08113		PRI-INV 0.71454	0.416780675	
INVIERNO	37	-0.47659		VER-OTO 0.02947	0.41346647	
				VER-INV 0.58719	0.424221979	
				OTO-INV 0.55772	0.419154416	
N	159		N-1-T1	145.6296	si Y mayor a X = diferencia	
K	4		N-K	155		
ALFA	0.05					
t(0.975,155)	1.9754					
T1	12.3704					
W1	2.37804851		S2	0.93198949		
W2	0.47706204					
W3	0.26986515					
W4	8.40410704					
W	11.5290827					