



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS CIUDADES DE
NOGALES, AGUA PRIETA, OBREGÓN Y HERMOSILLO,
SONORA, MÉXICO, RESPECTO DE PARTÍCULAS
SUSPENDIDAS TOTALES (PST) Y METALES (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr)
DURANTE EL AÑO 2010.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTAN:

KATHERINE LIZETH RODRÍGUEZ VALDÉZ
CARLOS LUIS CABANILLAS LARIOS

HERMOSILLO, SONORA

JULIO 2014

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

DEDICATORIA

Katherine Rodríguez:

A Dios porque sin el nada podría hacer, por darme fe para creer que nada es imposible y con esfuerzo se pueden lograr nuestros sueños.

A mis padres Raúl y Teresa, que hicieron todo en la vida porque yo pudiera lograr mis metas, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino terminaba, a ustedes mi corazón y amor infinito.

A mi compañero de vida Carlos Cabanillas por que sin ti nada de esto se hubiera logrado, gracias por tu apoyo.

Carlos Cabanillas:

Quisiera dedicar este trabajo a la persona más importante en mi vida, Mi Madre, por su paciencia, confianza y su incansable apoyo para cumplir mis metas.

A mí querida tía Alba Socorro Larios, por su gran comprensión y apoyo en toda mi carrera profesional.

A mi compañera de vida Katherine, por el magnifico equipo que formamos durante nuestra carrera profesional y por tu gran apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, por darnos la oportunidad de estudiar esta carrera.

A la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado Sonora por el apoyo en el suministro de información y filtros muestra del programa de monitoreo de la Red Estatal de Infraestructura e Información de la Calidad del Aire.

Nuestro más sincero agradecimiento al Dr. Agustín Gómez Álvarez por su paciencia, apoyo, confianza y dirección en la realización de este trabajo.

Nuestro agradecimiento al M. en C. Martin Eusebio Cruz Campas por su asesoría y apoyo en la realización de este trabajo.

Agradecemos a los maestros Dra. Onofre Monge Amaya, M. en C. Jaime Varela Salazar y al Dr. Guillermo T. Munive por su apoyo, asesoría y sugerencias en la realización de este trabajo.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CONTENIDO | i |
| LISTA DE FIGURAS | iv |
| LISTA DE TABLAS | v |
| RESUMEN | vi |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1 Objetivo General | 3 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN | 4 |
| 3.1 Hipótesis de Trabajo | 4 |
| 3.2 Hipótesis de Nulidad | 4 |
| 4. ANTECEDENTES | 5 |
| 4.1 Calidad del Aire | 5 |
| 4.2 Fuentes de Contaminación del Aire | 6 |
| 4.3 Tipos de Contaminantes del Aire | 7 |
| 4.3.1 Partículas. | 7 |
| 4.3.2 Metales..... | 11 |
| 4.4 Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire | 15 |
| 4.4.1 Partículas | 16 |
| 4.4.2 Metales..... | 16 |
| 4.5 Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire..... | 19 |
| 4.5.1 Partículas Suspendingas Totales | 19 |
| 4.5.2 Metales..... | 20 |
| 5. ÁREA DE ESTUDIO | 22 |
| 5.1 Localización Geográfica. | 22 |
| 5.1.1 Nogales, Sonora. | 22 |
| 5.1.2 Agua Prieta, Sonora..... | 25 |
| 5.1.3 Obregón, Sonora. | 26 |
| 5.1.4 Hermosillo, Sonora..... | 29 |
| 6. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 31 |

| | |
|---|----|
| 6.1 Procedimiento de Muestreo | 31 |
| 6.2 Análisis de Laboratorio | 31 |
| 6.3 Partículas Suspendidas Totales (PST)..... | 33 |
| 6.4 Metales (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr). | 33 |
| 6.5 Control de Calidad en el Análisis de las Muestras de Filtros. | 33 |
| 6.6 Indicadores de Calidad de los Datos | 34 |
| 6.6.1 Precisión. | 34 |
| 6.6.2 Exactitud..... | 34 |
| 6.6.3 Límite de Detección del Instrumento (L.D.). | 35 |
| 6.7 Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire. | 36 |
| 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 37 |
| 7.1 Partículas Suspendidas Totales (PST)..... | 37 |
| 7.1.1 Promedio o Mediana Mes a Mes | 40 |
| 7.1.2 Percentil 98 | 41 |
| 7.1.3 Número de días arriba del límite | 44 |
| 7.1.4 Índice de Calidad del Aire..... | 44 |
| 7.1.5 Distribución de Días con Calidad del Aire Buena, Regular y Mala | 46 |
| 7.2 Metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr)..... | 47 |
| 7.3 Comparación con los Máximos Permisibles para Metales | 50 |
| 7.3.1 Plomo. | 50 |
| 7.3.2 Cadmio. | 52 |
| 7.3.3 Níquel. | 52 |
| 7.3.4 Cobre. | 52 |
| 7.3.5 Cromo..... | 54 |
| 7.4 Comparación de resultados con otros estudios relacionados..... | 56 |
| 8. CONCLUSIONES | 57 |
| 8.1 Partículas Suspendidas Totales (PST)..... | 57 |
| 8.2 Metales | 57 |
| 9. RECOMENDACIONES | 59 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA..... | 60 |
| 11. APÉNDICES | 64 |

| | |
|--|----|
| APÉNDICE 1. Resultados del Control de Calidad durante el Análisis de Metales en Filtros. | 65 |
| APÉNDICE 2. Concentraciones de Partículas Suspendidas Totales (PST) en aire ambiente en Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora durante al año 2010. | 67 |
| APÉNDICE 3. Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora durante el año 2010. | 72 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | Página |
|---|---------------|
| Figura 1. Localización del área de estudio..... | 23 |
| Figura 2. Ubicación de la estación en Nogales, Sonora..... | 24 |
| Figura 3. Ubicación de la estación en Agua Prieta, Sonora..... | 24 |
| Figura 4. Ubicación de la estación en Obregón, Sonora..... | 28 |
| Figura 5. Ubicación de la estación en Hermosillo, Sonora..... | 28 |
| Figura 6. Muestreador de alto volumen (HI-VOL)..... | 32 |
| Figura 7. Comportamiento de la concentración contra tiempo de PST en la ciudad de Hermosillo, Sonora, durante el año 2010 y comparación con el máximo permisible. .. | 38 |
| Figura 8. Comportamiento de la concentración contra tiempo de PST en la ciudad de Nogales, Sonora, durante el año 2010 y comparación con el máximo permisible..... | 39 |
| Figura 9. Comportamiento de la concentración contra tiempo de PST en ciudad Obregón, Sonora, durante el año 2010 y comparación con el máximo permisible. | 40 |
| Figura 10. Comportamiento de la concentración contra tiempo de PST en la ciudad de Agua Prieta, Sonora, durante el año 2010 y comparación con el máximo permisible. . | 40 |
| Figura 11. Comparación gráfica de días con buena, regular y mala calidad del aire en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010..... | 47 |
| Figura 12. Distribución de concentración de plomo en aire ambiente para las cuatro estaciones de monitoreo durante el año 2010..... | 51 |
| Figura 13. Distribución de concentración de níquel en aire ambiente para las cuatro estaciones de monitoreo durante el año 2010..... | 53 |
| Figura 14. Distribución de concentración de cobre en aire ambiente para las cuatro estaciones de monitoreo durante el año 2010..... | 55 |

LISTA DE TABLAS

| Tabla | Página |
|---|---------------|
| Tabla 1. Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). Interpretación del Índice | 6 |
| Tabla 2. Parámetros de Calidad del Aire Monitoreados en México..... | 9 |
| Tabla 3. Valores de límite de detección de metales (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb) en aire ambiente | 36 |
| Tabla 4. Resumen de concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST \pm DE) en cuatro ciudades en el estado de Sonora, México, para el año 2010. | 37 |
| Tabla 5. Valores promedio mensual de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010. | 41 |
| Tabla 6. Evaluación del criterio de cobertura para muestreos de PST realizados en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, durante el año 2010. | 43 |
| Tabla 7. Evaluación del Percentil 98 en base a la Norma NOM-025-SSA1-1993. | 43 |
| Tabla 8. Número de días por Arriba del Límite Máximo Permisible de PST en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010. | 44 |
| Tabla 9. Índice de Calidad del Aire basado en el IMECA modificado por Cruz-Campas (2005) para PST en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010. | 46 |
| Tabla 10. Valores de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio y máximo (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) detectados en el aire ambiente en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010..... | 48 |
| Tabla 11. Comparación de resultados de concentraciones máximas de PST y metales en aire ambiente. | 56 |

RESUMEN

En la presente investigación se evalúa la calidad del aire para las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, del estado de Sonora, México, respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) para el periodo anual 2010. La localización de las estaciones de muestreo corresponden a los sitios considerados en la red de monitoreo de calidad del aire del Estado de Sonora. Se utilizó la información y filtros de los muestreos realizados durante un período anual (2010), por lo que se obtuvo apoyo de la Red Estatal de Información e Infraestructura de Calidad del Aire de la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES), suministrando los datos de muestreo y los filtros usados en el período anual seleccionado. Para el análisis de PST se utilizó el método de alto volumen (Hi-Vol) establecido en la Norma NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993). La determinación de metales se realizó utilizando la técnica de espectroscopia de absorción atómica, establecida bajo el procedimiento para la determinación de plomo en partículas suspendidas, recomendada en el CFR 40 (1992). Para evaluar la calidad del aire respecto de PST, se utilizó la Norma Mexicana NOM-025-SSA1-1993; así mismo se determinó el porcentaje de días por arriba del máximo permisible y se calculó el índice IMECA modificado por Cruz-Campas (2005). Para evaluar la calidad del aire respecto a metales se utilizó la NOM-026-SSA1-1993 para Pb ($1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Para los demás metales no existen normas de calidad por lo que se utilizaron los siguientes criterios: Cd (WHO, 2000 a, $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual), Níquel (Comisión de Comunidades Europeas, 2003; $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual), Cobre y Cromo (Ontario Ministry of the Environment, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 hrs).

Los resultados del presente estudio indican que las concentraciones de PST rebasaron frecuentemente los $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (normativa para máximo permisible diario) en las cuatro estaciones de monitoreo para las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, por lo que la calidad del aire se encontraba no satisfactoria durante el período analizado, debido a que se excedieron los niveles de PST establecidos en la NOM-025-SSA1-1993. Respecto a los metales Pb, Cd, Cu y Cr, se observó que las concentraciones detectadas se encuentran por debajo de los criterios y/o máximos permisibles usados como referencia de calidad del aire, por lo que la calidad del aire fue satisfactoria para las ciudades en estudio, durante el período analizado. En cuanto a níquel, solo para la estación ubicada en Nogales se determinó una concentración promedio anual de $0.026 \mu\text{g}/\text{m}^3$, rebasando el criterio establecido y presentando una calidad de aire no satisfactoria. En el presente 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.

1. INTRODUCCIÓN

Los seres humanos necesitan una cantidad 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).

La contaminación atmosférica que presentan las ciudades actuales se agrava por 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).

A nivel internacional, existen normativas y criterios que establecen valores de concentración de contaminantes en aire, como por ejemplo las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (2003), la base de datos STAR de la Agencia Ambiental Europea (1993-2002), las normas para la calidad del aire de la Comisión Europea (EC 2012), o los criterios del Ministerio Ambiental de Ontario (AAQCs 2005). Algunos de ellos son obligatorios y otros son solo criterios o guías; sin embargo, ambos representan indicadores a partir de los cuales las concentraciones de contaminantes específicos en el aire ambiente representan riesgos de salud. (Cruz-Campas, 2005)

En México actualmente existen normas de calidad del aire para Partículas Suspendidas Totales (PST), Partículas menores a 10 micras (PM₁₀), Partículas menores a 2.5 micras (PM_{2.5}), Monóxido de carbono (CO), Bióxido de azufre (SO₂), Bióxido de nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y Plomo (Pb).

Los metales se han convertido en un tema actual tanto en el campo ambiental como en el de salud pública, los daños que causan son tan severos y en ocasiones tan ausentes de síntomas, que las autoridades ambientales y de salud de todo el mundo

ponen mucha atención en minimizar la exposición de la población, en particular de la población infantil (EEA, 2011).

El objetivo de esta investigación, consistió en la determinación de la calidad del aire ambiente para cuatro ciudades del estado de Sonora, México (Nogales, Agua Prieta, Obregón, Hermosillo) con respecto a Partículas Suspendidas Totales (PST) y de metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr), generando conocimiento sobre las concentraciones de PST y metales en aire ambiente en las ciudades seleccionadas, lo cual no existe actualmente, y es necesario a fin de que las autoridades ambientales cuenten con información para el diseño de planes, estrategias y políticas de protección de la población. Se obtuvo apoyo de la Red Estatal de Información e Infraestructura de Calidad del Aire de la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES), suministrando los datos de muestreo y los filtros usados en el período anual seleccionado.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar la calidad del aire en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) durante el año 2010.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en aire ambiente en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010.
- Evaluar la calidad del aire respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México durante el año 2010.

3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Hipótesis de Trabajo

La concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) en el aire ambiente de las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo del Estado de Sonora, rebasaron los máximos permisibles o estándares dando como resultado una mala calidad del aire para el periodo anual 2010.

3.2 Hipótesis de Nulidad

La calidad del aire en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo del Estado de Sonora respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) para el periodo anual 2010 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 la presencia en la atmósfera de sustancias no deseables en concentraciones y circunstancias tales que puedan afectar significativamente el confort, salud y bienestar de las personas o al uso y disfrute de sus propiedades (Canter, 1997). La contaminación del aire puede ser fácilmente perceptible en comparación con la del suelo, especialmente en las grandes ciudades, en muchas ocasiones basta observar la atmósfera para señalar que el aire se ve sucio. Entonces resulta necesario medir de forma cuantitativa la calidad del aire y en su caso tomar medidas para evitar efectos adversos en la salud. Estas mediciones nos indican la calidad del aire y, por consecuencia, podemos saber si son satisfactorias o no en comparación con las normas nacionales e internacionales (Martínez, 2010).

En México, la Secretaría de Salud es la dependencia gubernamental que establece las normas de la contaminación atmosférica para los compuestos como el NO₂, CO, SO₂, O₃, Pb y partículas suspendidas. La finalidad de las normas es establecer la concentración máxima de un contaminante que puede tener el aire sin que existan riesgos para la salud de la población, y sobre todo para los grupos vulnerables como son los niños, ancianos y personas con enfermedades crónicas respiratorias y cardíacas, entre otras (Martínez, 2010).

Existen diversas formas de expresar la presencia de contaminantes atmosféricos, como son: partes por millón (ppm), partes por billón (ppb) o microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Pero informar a la población bajo estos términos no resulta práctico, ya que no existe familiaridad con ellos, sin embargo, en México y otros países del mundo se han desarrollado otros índices de la calidad del aire que en nuestro caso se denomina Índice Metropolitano de la Calidad del Aire o IMECA. De acuerdo con este índice, rebasar el valor de 100 puntos IMECA significa que la calidad del aire no es satisfactoria, como se especifica en la Tabla 1.

Tabla 1. Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). Interpretación del Índice

| Interpretación del IMECA | | |
|---------------------------------|--------------------|--|
| IMECA | Condición | Efectos en la Salud |
| 0-100 | Dentro de la norma | Ninguno |
| 101-200 | No satisfactoria | Molestias en ojos, nariz y garganta en personas sensibles. |
| 201-300 | Mala | Posibles problemas respiratorios. |
| 301-500 | Muy mala | Se agudizan los síntomas anteriores en personas sensibles y quienes fuman o padecen enfermedades crónicas. |

Fuente: Martínez (2010).

4.2 Fuentes de Contaminación del Aire

Los contaminantes en la atmósfera provienen principalmente de dos fuentes: de los fenómenos naturales y las provenientes de actividades humanas, también llamadas antropogénicas. Algunas fuentes naturales son los fenómenos geo-químicos, los fenómenos biológicos y los fenómenos atmosféricos. En cuanto a las actividades humanas como fuentes de emisiones de contaminantes, estas pueden ser muy variadas, pero las más relevantes incluyen a todos los procesos industrializados de producción, la quema de combustibles para la calefacción y la generación de energía eléctrica, y el uso de vehículos con motores de combustión interna (Molina, 2005).

Las fuentes de emisiones contaminantes también pueden clasificarse de acuerdo a su movilidad en fijas o estacionarias, de área y móviles. Las fuentes fijas de emisiones incluyen las plantas generadoras de energía termoeléctrica y los procesos industriales y agroindustriales, la quema e incineración de desechos. Las fuentes de área son en su mayoría fuentes fijas, pero que son muy pequeñas en términos de la cantidad de emisiones que producen, y muy numerosas. Su naturaleza es variada, pero

las más importantes son básicamente la quema de combustibles para cocinas, calentadores de agua, calefactores, maquinaria de construcción y maquinaria agrícola. Las fuentes móviles son básicamente los vehículos automotores que circulan por las carreteras públicas (Molina, 2005).

El tema de las fuentes de emisiones de contaminantes es sumamente importante, pues su identificación, clasificación y la evaluación de su situación constituye el primer paso en cualquier plan de acción tendiente a disminuir la contaminación (Molina, 2005).

4.3 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, sustancias minerales, compuestos halogenados, compuestos orgánicos azufrados, compuestos orgánicos halogenados). Los contaminantes secundarios o sustancias que no se vierten directamente a la atmósfera, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones, 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).

4.3.1 Partículas. El material particulado está formado por una mezcla compleja de componentes cuyas características físicas y químicas son muy variadas. Esta complejidad, que se da tanto en ambientes urbanos como en rurales, complica la interpretación de los numerosos resultados de los estudios e investigaciones que se han llevado a cabo sobre las partículas suspendidas en todo el mundo, pues el potencial de que causen daños a la salud puede variar de acuerdo con su tamaño, su composición química y las fuentes de donde provienen (WHO, 2006).

Actualmente, para efectos de su control, las partículas se clasifican de acuerdo con su diámetro aerodinámico, pues éste determina, en gran medida, la probabilidad

de que ingresen y se alojen en el tracto respiratorio. Es importante señalar que las autoridades de Estados Unidos y Europa establecieron, en un principio, regulaciones basadas en la medición de Partículas Suspendidas Totales (PST), las cuales, son partículas con un diámetro aerodinámico menor a aproximadamente 50 micrómetros medidas con un muestreador de alto volumen, pero conforme fueron conociéndose nuevos estudios en la materia, la normatividad sobre la calidad del aire se volvió más específica y requirió la medición de partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras (PM_{10}), y posteriormente de aquellas con diámetro menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) (INE, 2011).

En México, la SEMARNAT (2000) a través del Instituto Nacional de Ecología (INE) estableció 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 la publicación del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) que se difunde a través del INE, los parámetros registrados por las principales redes automáticas de monitoreo atmosférico en la República Mexicana se muestran en la Tabla 2. En ninguna de las ciudades donde se encuentran estas redes de monitoreo (Valle de México, Guadalajara, Monterrey, Valle de Toluca, Ciudad Juárez, Tijuana, Mexicali, Puebla, León, San Luis Potosí, Durango, Irapuato, Gómez Palacio y Lerdo, Celaya, Salamanca, Silao, Tecate, Rosarito) se cumple con la norma anual, excepto Celaya en 2008 (SEMARNAT, 2011).

Tabla 2. Parámetros de Calidad del Aire Monitoreados en México.

| Zona o Ciudad (Período) | Parámetro | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------|------------------|-------|-------------------|---------------------|----------------------|
| | PM _{2.5} | PM ₁₀ | Ozono | Bióxido de Azufre | Monóxido de Carbono | Bióxido de Nitrógeno |
| 1. Valle de México (2000-2009) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2. Guadalajara (2000-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3. Monterrey (2000-2009) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4. Valle de Toluca (2000-2009) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5. Ciudad Juárez (2000-2009) | | ✓ | ✓ | | ✓ | |
| 6. Tijuana (2000-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 7. Mexicali (2000-2009) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 8. Puebla (2000-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 9. León (2006-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 10. San Luis Potosí (2006-2009) | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 11. Durango (2006-2008) | | ✓ | | | | |
| 12. Irapuato (2006-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 13. Gómez Palacio y Lerdo (2006-2009) | | ✓ | | | | |
| 14. Celaya (2006-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 15. Salamanca (2006-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 16. Silao (2006-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 17. Tecate (2000-2009) | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| 18. Rosarito (2000-2009) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)(2010)

Los estudios oficiales de Partículas Suspendidas Totales en México después del año 2000 son escasos, debido a la especificación de la normatividad en PM_{10} y $PM_{2.5}$, En un estudio donde se obtuvo información a nivel local para la ciudad de Hermosillo, Sonora, (SEMARNAP, 1996). Se incluyen cuatro estaciones de monitoreo, de las cuales en tres se muestreaban PST y en dos PM_{10} . Según los resultados obtenidos de 1990 a 1995 y de acuerdo a los máximos permisibles establecidos en la NOM-024-SSA1-1993 (DOF, 1994), solamente en una estación durante 1994, no se rebasó el máximo permisible de 24 hrs que era de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero sí fue rebasado en los demás años; mientras que el máximo permisible anual que era de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio aritmético anual fue rebasado en todas las estaciones durante todos los años analizados.

Para el período junio de 2001 a mayo de 2002 en Hermosillo las concentraciones promedio de PST 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. (Cruz-Campas, 2005). De acuerdo a los máximos permisibles establecidos en la NOM-024-SSA1-1993 (DOF, 1994), se rebasó respectivamente 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, en dicho estudio se concluyó que la calidad del aire se clasificaba como no satisfactoria para esa ciudad.

En un estudio efectuado en la ciudad de México en el año 2011 sobre partículas suspendidas la concentración para el percentil 98 del promedio de 24 horas para PST fue de $325 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para las partículas menores a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el valor promedio anual fue de $93.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para el percentil 98 del promedio de 24 horas fue de $174 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SMA, 2011).

Para el año 2007 en Torreón Coahuila, se monitorearon las PST, cuya norma de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fue rebasada más frecuentemente durante los meses de abril, mayo y noviembre en todos los sitios de muestreo. Cabe mencionar que los picos máximos de este contaminante superaron los $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SEMARNAT, 2007).

En Coatzacoalcos los niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST) alcanzaron los 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando en un 43% el máximo permitido (<http://www.eltotonacapan.com/nota/20679/respira-coatza-aire-de-mala-calidad.html>).

4.3.2 Metales. La organización mundial de la salud publicó en las guías de calidad del aire los valores guía para los siguientes metales: cadmio, cromo, plomo, manganeso, mercurio, níquel, platino, vanadio y el metaloide arsénico (WHO, 2000a).

Algunos metales son micronutrientes para la mayoría de los organismos, pero en cantidades excesivas ejercen efectos tóxicos. Las fuentes de emisión mas importantes para algunos metales como el níquel, son las industrias de aceros y aleaciones de níquel, combustión de carbón y fuel-oil, procesos de catálisis y suelos. En el caso del cobre, las fuentes mas comunes son industrias metalúrgicas, procesos de refinado, centrales térmicas con combustión, suelos, incineradores municipales y otros procesos en lo que se emplean combustibles fósiles. Las principales fuentes a la atmósfera de cadmio se dan por la industria del cinc, ya que constituye un subproducto, el cadmiado de metales, la fabricación de colorantes, en la construcción de células fotovoltaicas, abonos fosfatados, etc. Estas son las fuentes posibles de estos contaminantes, tanto por sus chimeneas, como por emisiones fugitivas (Fernández, 2001). Las emisiones de plomo se deben principalmente a los aditivos de la gasolina y la combustión de hidrocarburos en la fundición, incineración de residuos, producción de fierro, acero y cemento. Existen diferentes vías naturales de aporte de metales a la atmósfera en escala global, como son: partículas de suelo transportadas por el viento, volcanes, spray de sal marina e incendios forestales (EEA, 2011).

Plomo en Aire Ambiente.- En Europa para el periodo de 1999-2009, las concentraciones de plomo han sido monitoreadas en 58 estaciones de 8 países, estas estaciones se dividen en urbanas, rurales, de tráfico y otras. En las estaciones rurales y de tráfico, las concentraciones se encuentran alrededor de 0.2-0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se mantienen casi constantes en el periodo, las estaciones urbanas reportan ha principios del periodo una concentración de 0.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y ha finales una de 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se puede ver que tienen un descenso mínimo de manera lineal para todo el periodo. En las estaciones industriales se reporta el mayor descenso de concentraciones, empezando

en el año 2002 con $0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de plomo, la cual es la concentración más alta del periodo, para llegar a descender para el año 2009 hasta $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ marcando una reducción de emisiones muy importante para las zonas industriales de Europa. En 23 estados de Estados Unidos de América, las emisiones de plomo se redujeron en aproximadamente 91% entre los años 1990 y 2009 (EEA, 2011). En áreas rurales pueden encontrarse niveles de plomo promedio de $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que los niveles típicos en las ciudades son en el rango de 0.5 a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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).

En México, 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 $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 1990 hasta $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2000 (Gobierno del Estado de México, 2002). En el 2011 la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) en una investigación avalada y certificada por investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), encontraron que la concentración de plomo en Tabasco fue de $8.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cuando la norma debe ser menor a $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (<http://ddt.mx/metales-pesado-en-el-aire-de-tabasco/>). En el caso del plomo en Torreón Coahuila los niveles más altos se presentaron en el mes de agosto del 2007 con una concentración de hasta $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual no rebasó la norma de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SEMARNAT, 2007).

A nivel local, en Hermosillo, Sonora, se reportan datos del periodo 2001-2002, en donde las concentraciones de plomo en un promedio anual en 3 sitios de monitoreo en dicha ciudad, son de 0.025 , 0.021 y $0.031 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, es importante señalar que el valor más alto detectado fue de $0.081 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual se ubica muy por debajo del establecido en la Norma NOM-026-SSA1-1993 (DOF, 1994) para un promedio trimestral, que es de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto confirma que todos los valores reportados en el periodo estudiado, están en promedio debajo de la norma (Cruz-Campas, 2005).

Cadmio en Aire Ambiente. Los niveles de Cadmio en el aire ambiente son generalmente bajos, con concentraciones promedio a largo plazo que pueden variar desde menores a 0.001 a $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EEA, 2011). 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 $0.05 \mu\text{g}/\text{día}$. Para áreas inusualmente contaminadas, se han estimado valores máximos de hasta $3.5 \mu\text{g}/\text{día}$ (WHO, 1984). El número de estaciones que reportan cadmio en concentraciones de aire en Europa se han incrementado alcanzando aproximadamente 600 en 2009. En un periodo de 10 años (2000-2009), se tienen datos de 54 estaciones en 7 países europeos: Austria, Bélgica, Bulgaria, Suiza, Dinamarca, Holanda y Rumania. Austria es uno de los países que mas resalta con concentraciones de $1.0 \text{ng}/\text{m}^3$ para los años de 2001-2002, para 2009 las concentraciones bajaron alrededor de $0.5 \text{ng}/\text{m}^3$. Los demás países que han reportado cadmio en este periodo han ido de $0.3 \text{ng}/\text{m}^3$ hasta $0.1 \text{ng}/\text{m}^3$ en nueve años. En Estados Unidos de América las concentraciones de cadmio han disminuido en 70 % entre 1990 y 2009, son 20 estados los que han reportado concentraciones de cadmio en este periodo de 20 años (EEA, 2011).

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 $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para Hermosillo, Sonora, se tiene información de monitoreo para cadmio en el periodo 2001-2002, el cual reporta una concentración promedio anual encontrada en 3 sitios de monitoreo en dicha ciudad, es de 0.0004 , 0.0001 y $0.0005 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dichos valores detectados se encontraron muy por debajo del criterio establecido por la WHO (2000a) de $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio anual (Cruz-Campas, 2005).

Níquel en Aire Ambiente. 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 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Solo Bélgica y Dinamarca han reportado concentraciones de níquel en un periodo de 10 años (2000-2009). Bélgica en el año

2000 reportó un promedio anual de 23 ng/m³, el cual es el mas alto reportado y para el año 2009 las concentración anuales fueron de aproximadamente 10 ng/m³, se puede notar que Bélgica ha tenido bajas y altas en todo el periodo de manera que el promedio anual de descenso es de 1 ng/m³. Mientras que Dinamarca empezó en el año 2000 con concentraciones de níquel anuales de aproximadamente 3 ng/m³ y para el año 2009 se tiene una concentración anual de 2 ng/m³, a diferencia de Bélgica, Dinamarca no ha tenido altas y bajas, su comportamiento ha ido disminuyendo gradualmente, lo que indica que el promedio anual de descenso fue de 0.1 ng/m³. En este mismo periodo mencionado Bélgica ha reducido sus emisiones en un 69% y Dinamarca en un 39%. En Estados Unidos de América son 16 estados los que han reportado concentraciones de níquel desde 1990 hasta 2009, los datos reportados marcan un descenso de 57% de níquel en este periodo (EEA, 2011).

A nivel local los datos reportados de níquel en Hermosillo, Sonora, por un estudio similar a éste, se encuentra información de monitoreo para este metal en el periodo 2001-2002, en donde la concentración promedio anual encontrada en 3 sitios de monitoreo, fue de 0.009, 0.008 y 0.012 µg/m³. Valores menores al criterio establecido por la Comisión de las Comunidades Europeas (2003) de 20 ng/m³ en un promedio anual (Cruz-Campas, 2005).

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 µm) de óxidos y cobre elemental, mientras que el liberado en material particulado (como el de tolváneras) se presenta en partículas mas grandes (<10 µm) 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 un 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de cobre en aire.

La concentración promedio anual encontrada en 3 sitios de monitoreo en la ciudad de Hermosillo Sonora, México, en el periodo 2001-2002, fue de 0.042, 0.043 y 0.045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cruz-Campas, 2005).

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 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. Otra referencia señala que una concentración máxima de 26.2 ng/m^3 y un promedio de 3.70 ng/m^3 de cromo en aire ambiente fueron detectados en el monitoreo ambiental desarrollado en la ciudad de Praga (Municipio de Praga, 2003).

A nivel local se tienen antecedentes para cromo en el periodo 2001-2002, el cual menciona que la concentración promedio anual encontrada en 3 sitios de monitoreo en la ciudad de Hermosillo Sonora, fue de 0.008, 0.007 y 0.010 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cruz-Campas, 2005).

4.4 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.

4.4.1 Partículas

Existe evidencia sobre los impactos negativos en la salud por la exposición aguda o crónica a las partículas suspendidas en estudios epidemiológicos y toxicológicos en todo el mundo. Los efectos más documentados son la mortalidad y la hospitalización de pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), exacerbación de los síntomas y aumento de la necesidad de terapia en asmáticos, mortalidad y hospitalización de pacientes con enfermedades cardiovasculares, mortalidad y hospitalización de pacientes con diabetes mellitus, aumento del riesgo de infarto al miocardio, inflamación de los pulmones, inflamación sistémica, disfunción endotelial y vascular, desarrollo de aterosclerosis, aumento en la incidencia de infecciones y cáncer de pulmón (WHO, 2006).

4.4.2 Metales

Los metales como cadmio, plomo, mercurio, níquel y metaloides como el arsénico son contaminantes comunes en el aire, principalmente emitidos por varias actividades industriales y la combustión de carbón. Aunque los niveles en la atmósfera de estos metales son bajos, contribuyen a la deposición y acumulación en los suelos, sedimentos y organismos. Los metales son persistentes en el medio ambiente y algunos se bioacumulan en las cadenas alimenticias (EEA, 2011). El cadmio está asociado con el daño renal, daño de hueso y ha sido identificado como un posible carcinógeno humano, causando cáncer de pulmón. Con exposiciones al plomo se tienen efectos en el desarrollo y comportamiento neuronal de fetos, bebés y niños. En los adultos provocan una elevación en la presión sanguínea. El níquel es un carcinógeno conocido y también tiene otros efectos no carcinógenos como por ejemplo, en el sistema endocrino. La contaminación del aire es solo una fuente de exposición a estos metales, pero su persistencia y su potencial en el transporte atmosférico a larga distancia hacen que estos contaminantes puedan llegar a regiones remotas (EEA, 2011).

4.4.2.1 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 metal neurotóxico, que también se acumula en el cuerpo humano, dañando órganos y nervios. La exposición a altas concentraciones puede causar serios daños al cerebro, incluyendo retardo mental, trastornos en el comportamiento, problemas de memoria y cambios de humor (EEA, 2011). Uno de los efectos más críticos en niños es la discapacidad en el desarrollo neuronal. Estos efectos se pueden dar por exposiciones durante la lactancia o durante la niñez. El plomo se acumula en los huesos y durante la lactancia o el embarazo el feto se ve expuesto a estas acumulaciones. Por lo tanto el tiempo de exposición al plomo durante el embarazo es muy importante. La inhalación de plomo es significativa cuando los niveles en el aire son muy altos. Las fuentes de emisión locales son más responsables de elevadas concentraciones que las del transporte atmosférico a gran distancia. Sin embargo, el plomo se bioacumula e impacta en sistemas terrestres y acuáticos, exponiendo al riesgo a toda la cadena alimenticia (EEA, 2011)

4.4.2.2 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). 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).

4.4.2.3 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. 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).

4.4.2.4 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 cobre puede causar náusea, vómitos y diarrea. Sin embargo, este tipo de enfermedades no es muy común debido a las altas temperaturas necesarias para producir humos de cobre. La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de Estados Unidos (ATSDR) menciona que no se sabe si el cobre puede producir cáncer en seres humanos. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha determinado que el cobre no es clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos (ATSDR, 2010).

4.4.2.5 Efectos a la Salud por Cromo. El cromo es un metal duro y gris más comúnmente encontrado en estado trivalente en la naturaleza, mientras que los compuestos de cromo hexavalente son encontrados en pequeñas cantidades. 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 ha sido reportada, 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).

4.5 Valores 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. 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).

4.5.1 Partículas Suspendidas Totales

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).

En México, los máximos permisibles de calidad del aire para Partículas Suspendidas Totales (PST), han sido publicados en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005), siendo dicho valor para PST de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas para el percentil 98 en un período de un año.

4.5.2 Metales

4.5.2.1 Máximos Permisibles para Plomo. La Organización Mundial de Salud (WHO, 2005) establece un máximo permisible de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio anual. 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 $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio trimestral (CFR 40, 2008). En México, fue establecido en la NOM-026-SSA1-1993, un valor máximo de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en un período de tres meses promedio aritmético (DOF, 1994).

4.5.2.2 Máximos Permisibles para Cadmio. La WHO (2000a), en su segunda edición de las Guías de Calidad del Aire para Europa, define que para cadmio el máximo permisible sea de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio anual. La Comunidad Europea (CE) en 2010, ha establecido el límite de cadmio en aire ambiente, el cual queda definido como $5 \text{ng}/\text{m}^3$ en un promedio anual, tomando en cuenta que este valor se fija para prevenir el aumento en suelos agrícolas y prevenir a las futuras generaciones. Este mismo límite lo establecerá el gobierno de Estados Unidos de América a partir del 31 de diciembre del 2012. 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 $0.00005 \text{mg}/\text{m}^3$ 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 México no existe actualmente normatividad sobre calidad del aire para este metal.

4.5.2.3 Máximos Permisibles para Níquel. La Comunidad Europea (2010) ha establecido el límite de níquel en aire ambiente, el cual queda definido como $20 \text{ng}/\text{m}^3$ en un promedio anual. El gobierno de Estados Unidos de América fija el límite para níquel a

partir del 31 de diciembre del 2012, el cual es de 20 ng/m^3 . 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/m^3 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/m^3 de níquel para un período de 24 horas, un valor límite de 0.0015 mg/m^3 promedio mensual y un valor límite de 0.001 mg/m^3 promedio anual (<http://star.eea.eu.int/default.asp>). En México no se cuenta con ninguna norma que regule la concentración de níquel en aire ambiente.

4.5.2.4 Máximos Permisibles para Cobre. En las guías y criterios de calidad del aire del Ministerio de Ambiente de Ontario (AAQCs Regulación 419/05, 2005), el límite para cobre en aire ambiente en un periodo de 24 horas queda definido en $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. 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/m^3 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.

4.5.2.5 Máximos Permisibles para Cromo. En los criterios de calidad del aire del Ministerio de Ambiente de Ontario (AAQCs, Abril 2012), el límite para cromo en aire ambiente muestreado de PST en un periodo de 24 horas, queda definido en $0.00007 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Para un periodo anual de Cromo muestreado de PST, es de $0.00014 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. 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/m^3 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.

5. ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Localización Geográfica.

El presente trabajo se realizó en las siguientes ciudades del estado de Sonora, México: Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, en las cuales se opera un equipo de PST de la Red Estatal de Información e Infraestructura sobre Calidad del Aire (Figura 1)

5.1.1 Nogales, Sonora.

El municipio de Nogales se encuentra situado en el extremo norte del estado de Sonora, México, ocupando la porción media de la frontera del mismo con los EUA, y tiene una superficie de 1,674.56 kilómetros cuadrados, correspondientes al 0.9% del área del estado. En la Figura 2 se puede observar la ubicación de la estación de monitoreo en la ciudad de Nogales.

5.1.1.1 Climatología

El municipio de Nogales cuenta con un clima semiseco templado BS1Kw (x)(e), con una temperatura media máxima mensual de 27°C en los meses de julio y agosto, de 8.7°C en los meses de diciembre y enero. La temperatura media anual es 17.8°C. La época de lluvia se presenta en el verano, en los meses de julio y agosto con una precipitación media anual de 460.8 milímetros. En el invierno generalmente hay nevadas y granizos.

5.1.1.2 Principales Ecosistemas (Flora y Fauna)

En toda la extensión territorial del municipio predomina principalmente la vegetación de pastizal (natural e inducido); en gran porción de la región serrana se encuentra bosque de encino, aunque también está diseminado por casi toda el área municipal: En la parte este del municipio, en los límites con Sáric, se presenta un tipo de vegetación de matorral desértico micrófilo, como gobernadora, hierba de burro, cardón; también existen pequeñas áreas de vegetación de mezquital y un poco de agricultura de riego.



Figura 1. Localización del área de estudio.

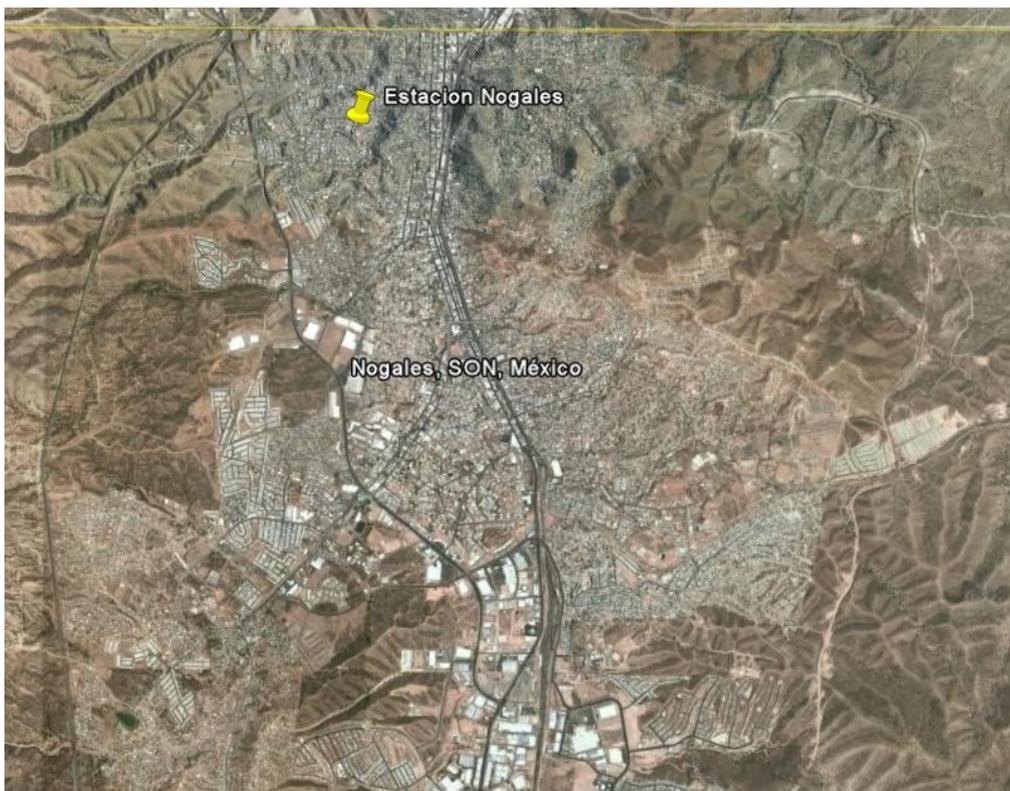


Figura 2. Ubicación de la estación en Nogales, Sonora.

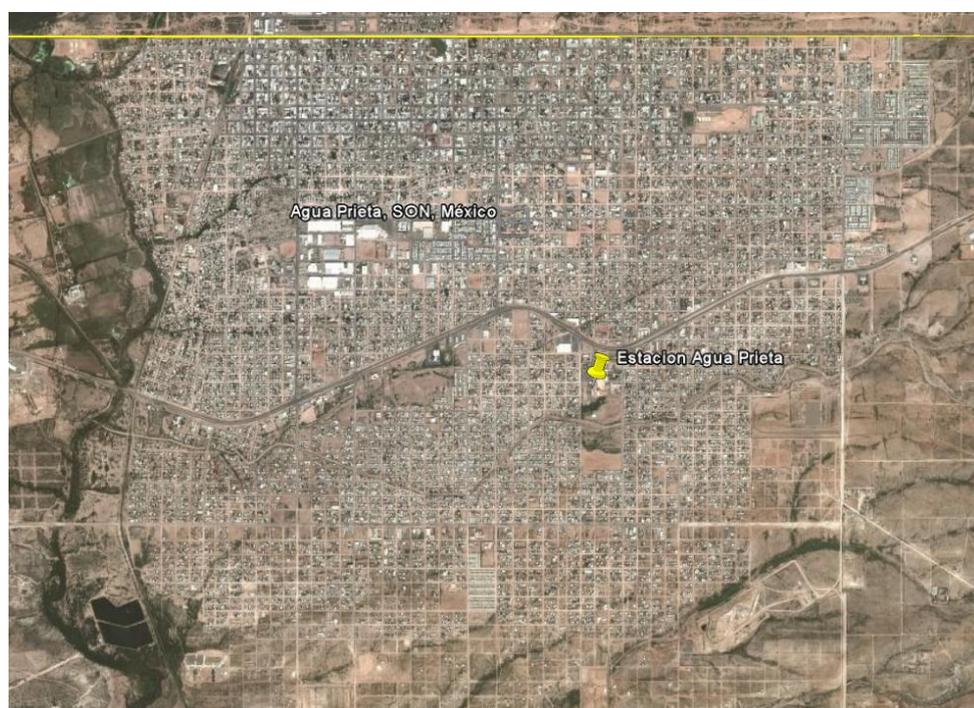


Figura 3. Ubicación de la estación en Agua Prieta, Sonora.

Entre la fauna del municipio se pueden mencionar: sapo, rana, sapo verde, sapo toro, tortuga de río, cachora, víbora de cascabel, víbora sorda, coralillo, camaleón, culebra, salamanquesa, bura, venado cola blanca, borrego cimarrón, puma, puerco espín, murciélago, ratón de campo, margay, paloma morada, tecolote cornudo, cardenal, alondra cornuda, aura, gavilán ratonero, halcón plomero y aguililla cola roja.

5.1.1.3 Características y Uso de Suelo.

En el municipio se localizan las siguientes unidades de suelos Feozem: se localiza al este del municipio, tiene una capa superficial obscura, y rica en materias orgánica y nutrientes. Litosol: se localiza al sur y este del municipio. Regosol: se localiza al norte y centro del municipio, presentando fases físicas líticas.

5.1.2.4 Población

El municipio de Nogales presentó una población total de 220,292 habitantes en el año 2010, de los cuales 111,295 son hombres y 108,997 son mujeres (INEGI, 2010).

5.1.2 Agua Prieta, Sonora.

El Municipio de Agua Prieta se localiza en el noreste del Estado de Sonora. La extensión territorial del Municipio es de 3 631.63 kilómetros cuadrados, que representan el 1.95 por ciento del territorio estatal y el 0.18 % del nacional. (Ayuntamiento de Agua Prieta, 2010). En la Figura 3 se puede observar la ubicación de la estación de monitoreo en la ciudad de Agua Prieta.

5.1.2.1 Climatología

El clima predominante en el municipio es de tipo templado Bsokw (C"), la temperatura media mensual máxima es de 27.3°C en los meses de junio y julio, la media mensual mínima es de 7.4°C en los meses de diciembre y enero; la temperatura media anual es de 17°C; las lluvias se presentan los meses de julio, agosto y septiembre con una precipitación media anual de 334.6 milímetros; hay deshielos del norte en los meses de diciembre y febrero.

5.1.2.2 Principales Ecosistemas (Flora y Fauna).

En el noroeste del municipio existen pastizales naturales, denominados también zacates como navajita belluda, navajita delgada, zacate galleta, así como zacate toboso y zacatón; en su parte central existen agrupaciones de bosques de encinos y pinos.

En cuanto a fauna se refiere, existen las siguientes especies. Anfibios: rana común, salamandra, ajolote, sapo toro. Reptiles: tortuga, cachorón, cachora, camaleón y chirriero. Mamíferos: venado, puma coyote, jabalí y mapache. Aves: esmerejón, aura, águila y aguililla cola roja.

5.1.2.3 Características y Uso de Suelo.

Los diferentes tipo de suelos son los que a continuación se mencionan: Litosol: predomina en gran parte del municipio que corresponde a la región serrana. Regosol: se localiza al centro y al oeste, presentando fases físicas pedregosas; al este y sur fases líticas. Xerosol: se localiza al noroeste y presenta fase física pedregosa; predomina en zonas áridas y semiáridas.

5.1.2.4 Población

El municipio de Agua Prieta presentó una población total de 79,138 habitantes en el año 2010, de los cuales 40,117 son hombres y 39,021 son mujeres (INEGI, 2010).

5.1.3 Obregón, Sonora.

El Municipio de Cajeme está ubicado en el suroeste del Estado de Sonora, su cabecera es la población de Ciudad Obregón. Posee una superficie de 3,312.05 kilómetros cuadrados, que representan el 1.79 por ciento del total estatal y el 0.17 % del nacional; las localidades más importantes, además de la cabecera, son Esperanza, Cócorit y Pueblo Yaqui. En la Figura 4 se puede observar la ubicación de la estación de monitoreo en la ciudad de Obregón.

5.1.3.1 Climatología

El municipio presenta básicamente dos tipos de climas: seco y muy seco. El primero BS (h) hw(e) clima cálido extremoso, con una precipitación media anual de 410 milímetros; cubre la mayor parte del territorio al norte y al este. El segundo, BW (h) muy cálido extremoso, con una precipitación media anual de 299 milímetros, se tiene en la parte suroeste. En ambos casos el 73 por ciento de la precipitación se presenta en los meses de julio a septiembre; los dos son cálidos, con una temperatura media anual de poco más de 24° C, las temperaturas medias máximas son de 31° C; y se presentan en los meses de junio a septiembre; la máxima es de 48° C; las medias mínimas de temperatura son de 16° C en enero.

5.1.3.2 Principales Ecosistemas (Flora y Fauna).

Una gran parte del territorio municipal está constituido por selva baja caducifolia, principalmente en la zona norte y estribaciones de Sierra Madre Occidental: otra gran porción está constituida por matorral sarco-crasicaule tales como el cirio, idria, cardón, copalquín, candelilla y agave; así también abundan diseminados en toda la extensión municipal, áreas de vegetación entre las que se encuentran el mezquital, palo verde, brea, palo fierro y huisache; en las áreas urbanas se encuentran árboles frondosos como el yucateco, tabachín y laureles de la India.

Respecto a la variedad faunística, se cuenta con varias especies de pájaros como: churea, palomas, codorniz y aves migratorias en la costa sur de Cajeme; existen reptiles como coralillos, rana, sapo toro y chicotera y algunos mamíferos como coyote, zorra, rata, rata algodónera y madera.

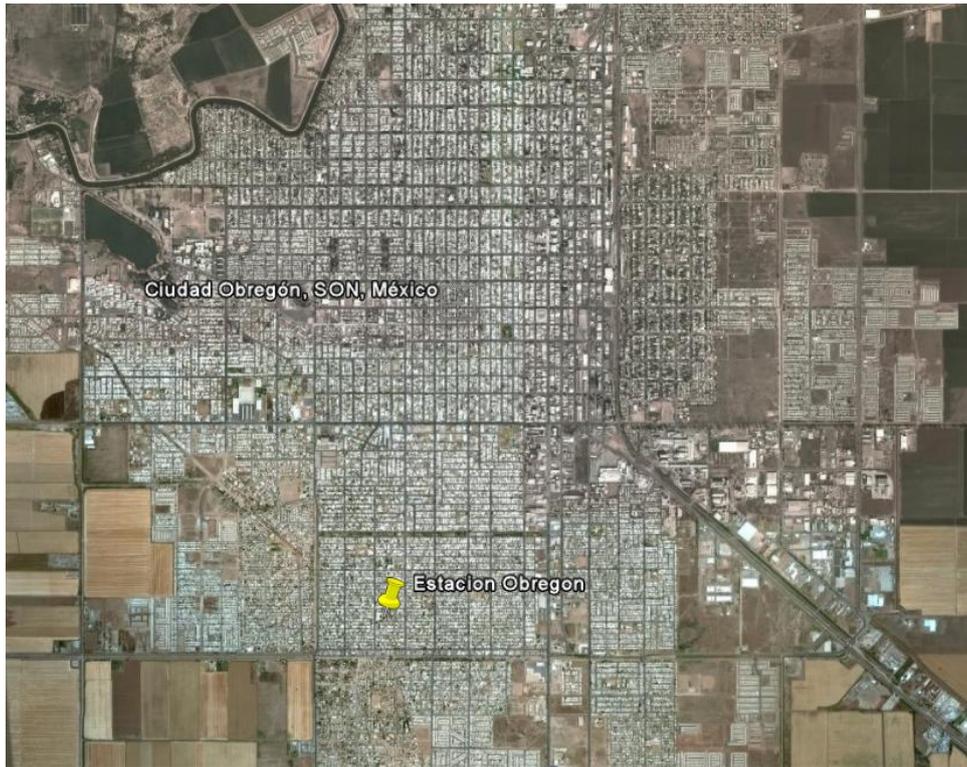


Figura 4. Ubicación de la estación en Obregón, Sonora.

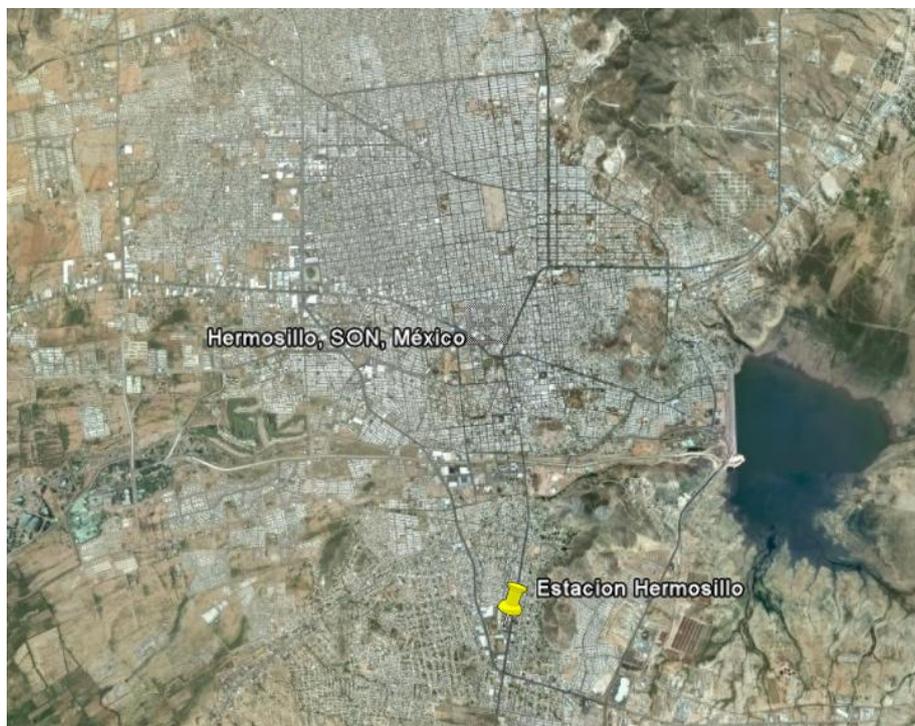


Figura 5. Ubicación de la estación en Hermosillo, Sonora.

5.1.3.3 Características y Uso de Suelo.

El municipio cuenta con los siguientes tipos de suelo: Cambisol: se localiza en el norte y pueden acumular algunos materiales como arcilla, carbonato de calcio, hierro, magnesio, etcétera, moderada a alta susceptibilidad a la erosión. Fluvisol: se localiza en las márgenes de la presa Álvaro Obregón. Litosol: se localiza al noreste del municipio; se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación. Regosol: se localiza al este presentando fases físicas líticas. Vertisol: se localiza en el centro y presenta fases líticas. Xerosol: se localiza al sur del municipio en zonas áridas.

5.1.3.4 Población

El municipio de Obregón presentó una población total de 409,310 habitantes en el año 2010, de los cuales 202,700 son hombres y 206,610 son mujeres (INEGI, 2010).

5.1.4 Hermosillo, Sonora.

El municipio de Hermosillo, 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. En la Figura 5 se puede observar la ubicación de la estación de monitoreo en la ciudad de Hermosillo.

5.1.4.1 Climatología

En el municipio de Hermosillo existen dos regiones climáticas: la primera que corresponde a la región costera la cual presenta un clima desértico semicálido con inviernos frescos y temperaturas de cero grados en enero y febrero, hasta temperaturas de 48 grados centígrados en julio y agosto. La segunda región la conforma el resto del municipio, con un clima muy seco con temperaturas de 14 a 16 grados en los meses de enero y febrero, con extremas de 31 a 47 en los meses de julio y agosto.

5.1.4.2 Principales Ecosistemas (Flora y Fauna).

Sobresale en casi toda la geografía del municipio la vegetación del tipo mezquital, entre los se encuentran: el palo fierro, palo verde, huisache, brea; también se encuentran plantas halofilas en la parte costera, en las cercanías a Bahía de Kino existe vegetación de dunas.

En cuanto a la fauna del municipio, predomina el sapo, sapo toro, tortuga del desierto, camaleón, víboras de coralillo, cascabel, sorda, chirrionera, venado cola blanca, borrego, berrendo, puma, lince, conejo, zorra, armadillo, entre los principales.

5.1.4.3 Características y Uso de Suelo

En el municipio se localizan los siguientes tipos de suelos: el Litosol en la zona noroeste y al sur del municipio; el Regosol que se localiza al norte del municipio y el Yemosol que se encuentra principalmente en la parte norte del municipio.

5.1.4.4 Población

El municipio de Hermosillo presentó una población total de 784,342 habitantes en el año 2010, de los cuales 392,697 son hombres y 391,645 son mujeres (INEGI, 2010).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Procedimiento de Muestreo

La Red Estatal de Infraestructura e Información sobre Calidad del Aire (REIICA) estableció una frecuencia de muestreo cada 6 días con muestreos no simultáneos en las 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 anual 2010, para el análisis de PST y metales (Pb, Cu, Ni, Cu y Cr). El método de muestreo utilizado 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 utilizados tienen una eficiencia de recolección mínima del 99 % para partículas de 0.3 μm . Los filtros son los utilizados para la determinación de concentración de PST y de metales de acuerdo a la metodología citada más adelante. En la Figura 6 se ilustra un muestreador de alto volumen.

6.2 Análisis de Laboratorio

El material utilizado en el laboratorio se sometió a un estricto control para evitar una posible contaminación principalmente de metales. Para esto, se utilizó la metodología recomendada por Moody y Lindstrom (1977) y la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-115-SCFI-2001). El procedimiento de limpieza consistió en someter el material de cristalería a un lavado con detergente, enjuague con agua corriente y sumergirlo en una disolución de ácido nítrico al 20% (v/v) durante 3 días. Posteriormente, se enjuagó con agua deionizada, se secó y se guardó en bolsas de plástico para su posterior utilización.

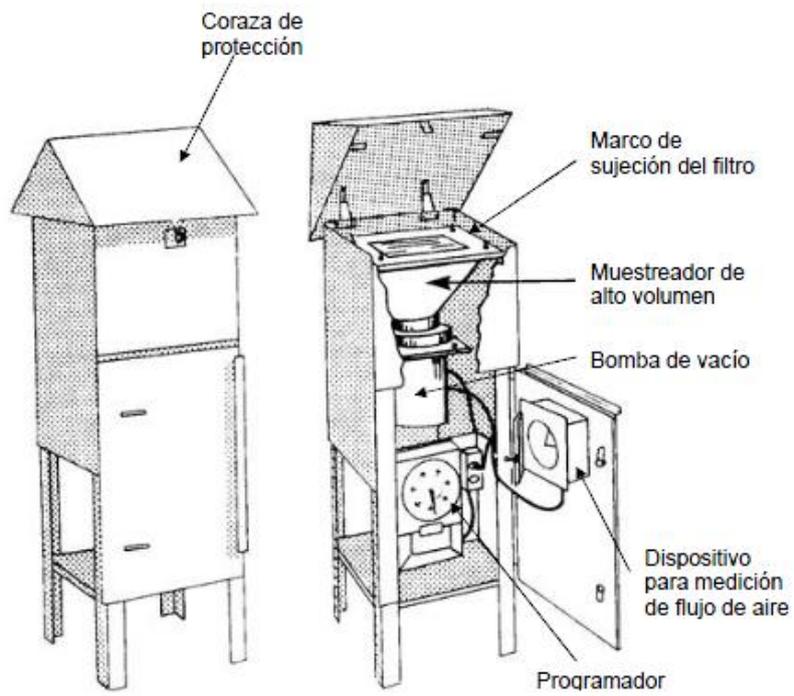


Figura 6. Muestreador de alto volumen (HI-VOL).

6.3 Partículas Suspendidas Totales (PST).

El método utilizado para muestreo y determinación de PST es el señalado por la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993), 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 (PST) en 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.

6.4 Metales (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr).

La metodología para la determinación de metales 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, utilizando un muestreador de alto volumen. Los metales del material particulado muestreado son solubilizados por extracción con una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico para posteriormente analizarse por espectrometría de absorción atómica utilizando un equipo de absorción atómica PERKIN-ELMER, Modelo AAnalyst 400 mediante la siguiente expresión:

$$\mu\text{g}/\text{m}^3 = (\mu\text{g}/\text{ml} * 100\text{ml}) / \text{Volumen de aire filtrado en m}^3.$$

Donde: $\mu\text{g}/\text{ml}$ = Lectura registrada por el Equipo de Absorción Atómica.

100ml = Volumen de muestra analizada.

6.5 Control de Calidad en el Análisis de las Muestras de Filtros.

Con la finalidad de obtener datos confiables de campo así como resultados precisos y exactos, se llevó a cabo un procedimiento de control de calidad en los métodos utilizados en el análisis químico de metales en las muestras de filtros. Para

esto, se siguió la metodología de control de calidad recomendados en la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-115-SCFI-2001) y la Environmental Protection Agency (EPA, 1998). El procedimiento de control de calidad consistió de un estricto control en los siguientes puntos:

1. Limpieza de los Equipos de Muestreo. La limpieza de los equipos de muestreo fue igual al presentado al inicio de este capítulo.
2. Procedimiento de Calibración y Frecuencia. El equipo analítico de laboratorio (balanza analítica y espectrofotómetro de absorción atómica) fue calibrado en base a los manuales del fabricante. Se utilizaron reactivos de alta pureza analítica y se elaboró una curva de calibración empleándose un mínimo de 5 estándares para la determinación de metales.

6.6 Indicadores de Calidad de los Datos

6.6.1 Precisión. Es el grado de conformidad con que un grupo de mediciones realizadas bajo las mismas condiciones experimentales para una misma sustancia o propiedad (Clavijo, 2002). En el presente trabajo, se evaluó la precisión mediante el análisis de réplicas de análisis repetidos de una muestra o estándar (CNA, 1993). La desviación estándar absoluta, S , describe la dispersión de las mediciones individuales alrededor de la media y viene dada por la fórmula (Harvey, 2002):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Dónde:

x_i = Es una de las mediciones individuales

\bar{x} = Es la media

6.6.2 Exactitud. La exactitud de una medición es el grado de concordancia del resultado de la misma comparada con el valor verdadero del objeto que está siendo medido. La exactitud se determinó a través del análisis de muestras fortificadas con estándares de alta pureza analítica de concentración conocida, los cuales fueron

sometidas al mismo procedimiento de análisis que las muestras (CNA, 1993). Los resultados obtenidos se expresan como porcentaje de recuperación:

$$\text{Recuperación (\%)} = a/b \times 100$$

Dónde:

a = Concentración adicionada a la muestra

b = Concentración medida en la muestra

En la presente investigación, se llevaron a cabo determinaciones de tres muestras de concentración conocida de estándares de alta pureza analítica, de 0.5, 1.0 y 2.0 ppm para cada uno de los metales estudiados, los cuales se analizaron al principio, en medio y al final del análisis de los filtros muestra. Se utilizó el criterio de aceptación de $\pm 16\%$ como porcentaje de diferencia utilizado por EPA (1998). Con base en el criterio de aceptación y los valores de concentración de recuperación presentados en el Apéndice 1 (Tabla 1a) se establece que en ninguna de las pruebas de recuperación se rebasó el criterio de calidad aceptable para exactitud.

6.6.3 Límite de Detección del Instrumento (L.D.). En la presente investigación se utilizó el criterio del Límite de Detección, como la cantidad de concentración del analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco (YB), más tres veces la desviación estándar del blanco (SB) (Miller y Miller, 1993):

$$YLDI = YB + 3SB$$

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (CFR 40 (1992)). De acuerdo a los resultados obtenidos, el valor del L.D. para plomo fue de 0.01mg/l, con este dato y considerando un volumen de muestreo de 2,400 m^3 , se obtiene un L.D. en aire ambiente de 0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera igual que para el plomo, se calculó el límite de detección de cadmio, níquel, cobre y cromo en el aire (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de límite de detección de metales (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb) en aire ambiente

| Metal | Límite de detección analítico (µg/ml) | Límite de detección en aire ambiente (µg/m³) |
|--------------|--|--|
| Plomo | 0.01 | 0.005 |
| Cadmio | 0.04 | 0.020 |
| Níquel | 0.01 | 0.005 |
| Cobre | 0.02 | 0.010 |
| Cromo | 0.02 | 0.010 |

6.7 Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire.

El método utilizado para la determinación de PST es el muestreo de alto volumen recomendado por la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993). Con la finalidad de evaluar la calidad del aire respecto de PST, se comparo con la Norma NOM-025-SSA1-1993; así mismo se determinó el porcentaje de días por arriba del máximo permisible y se calculó el índice IMECA modificado por Cruz-Campas (2005).

Los criterios utilizados en la presente investigación con la finalidad de determinar la calidad del aire respecto a metales fueron los siguientes:

- a) Plomo.NOM-026-SSA1-1993, correspondiendo a un valor de 1.5 µg/m³, en un período de tres meses promedio aritmético (DOF, 1994).
- b) Cadmio: Directiva 2004/107/CE (2004) de la Comisión de Comunidades Europeas que establece un valor de 0.005 µg/m³ promedio anual.
- c) Níquel: Directiva 2004/107/CE (2004) de la Comisión de Comunidades Europeas (2003), que fija un valor para níquel de 0.02 µg/m³ en promedio anual.
- d) Cobre: Criterio establecido por la Ontario Ministry of the Environment (MOE) que fija un valor para cobre de 50 µg/m³ en 24 hrs.
- e) Cromo: Criterio del Ministerio de Ambiente de Ontario (AAQCs, Abril 2012), el límite para cromo en aire ambiente muestreado de PST en un periodo de 24 horas, queda definido en 0.00007 µg/m³ y para un periodo anual de Cromo muestreado de PST, es de 0.00014 µg/m³.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Partículas Suspendidas Totales (PST)

Los resultados de concentraciones de PST determinados para los días muestreados en cada estación de monitoreo para las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, se presentan en el Apéndice 2. En la Tabla 4, se presenta un resumen de los valores mínimo, promedio y máximo obtenidos para cada ciudad.

Tabla 4. Resumen de concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST \pm DE) en cuatro ciudades en el estado de Sonora, México, para el año 2010.

| Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Nogales | Agua Prieta | Obregón | Hermosillo |
|--|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Mínimo | 66.53 | 28.27 | 54.49 | 51.91 |
| Promedio anual \pm DE | 362.58 \pm 219.42 | 182.21 \pm 84.85 | 231.55 \pm 69.55 | 103.50 \pm 39.87 |
| Máximo | 1047.28 | 410.44 | 350.23 | 305.38 |

DE = Desviación Estándar

En la Figura 7, se puede apreciar que en la estación ubicada en Hermosillo, se encontró que de los 46 días muestreados, solo el día 8 de Enero del 2010 se rebasó el máximo permisible para 24 horas, representando un 2.2% del total de las muestras analizadas. Esto se puede deber a alguna tolvanera que haya alcanzado el sur de esta ciudad, ya que la mayoría se presentan en el norte y centro de Hermosillo y abarcan un área muy extensa, pero la locación de la estación se encuentra en el sur y pudo haber sido la ubicación de la estación la razón del pico de PST que se tiene en el periodo de estudio. Cabe mencionar que en Hermosillo ocurren tolvaneras muy continuamente debido a la región en la que se encuentra, la cual es un desierto árido y se tiene mucha tierra y arena suelta que se suspende con la más mínima ráfaga de viento, es una de las fuentes más importantes de partículas en aire en esta ciudad.

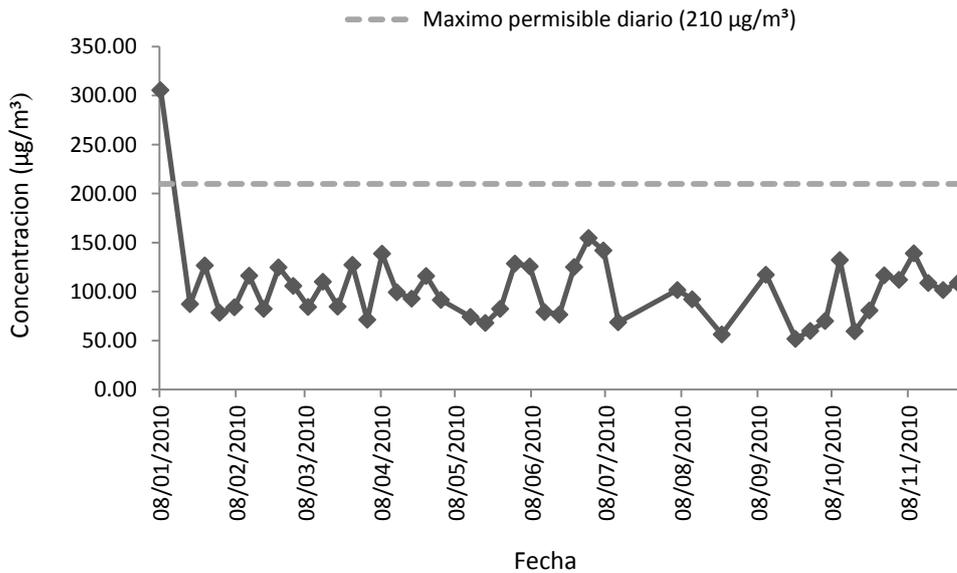


Figura 7. Comportamiento de la concentración contra tiempo de PST en la ciudad de Hermosillo, Sonora, durante el año 2010 y comparación con el máximo permisible.

Para la estación ubicada en Nogales, se tienen 49 días muestreados, de los cuales 38 de ellos se encuentran por encima del máximo permisible de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas, lo que representa el 77.5% de los días (Figura 8). El máximo valor registrado que se encontró el 3 de diciembre del 2010, con una concentración de $1047.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El aumento en las concentraciones marca sus inicios en julio y termina en diciembre con un máximo en los valores, lo cual pareciera indicar que las partículas suspendidas se ven relacionadas con el tráfico vehicular ya que esta ciudad experimenta un tráfico de autos muy alto, que también comienza a aumentar desde julio y agosto pero tiene un máximo en diciembre. Probablemente aun que no se encontró algún escrito que soporte esta información, las calles con poco o sin recubrimiento junto con la acción del trafico pudieran ser una de las causas por las cuales se suelta la tierra o arena y esta se arrastra por los vientos de la región. De la misma manera, las emisiones de los vehículos y la quema de llantas para mitigar el clima frio pudieran ser una fuente importante de partículas en aire.

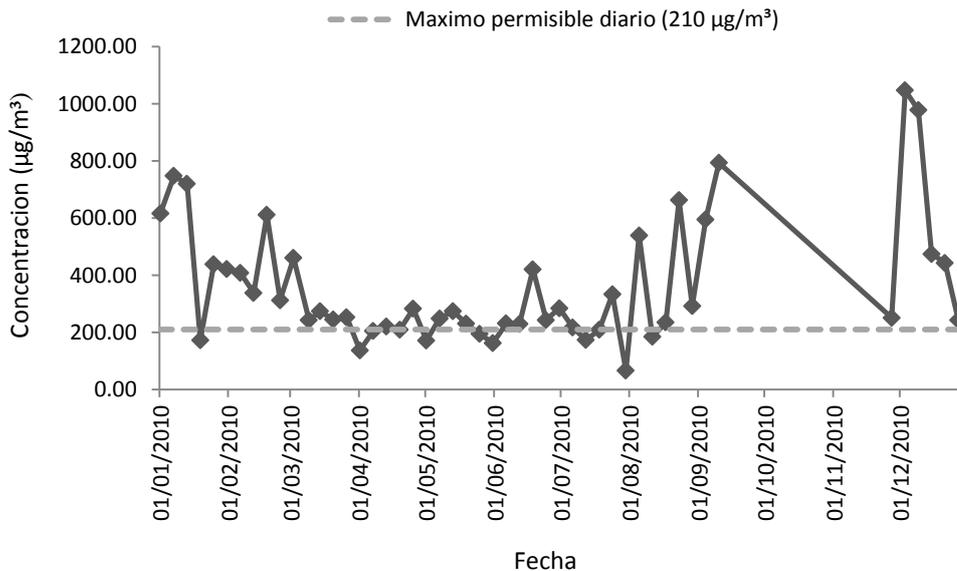


Figura 8. Comportamiento de la concentración contra tiempo de PST en la ciudad de Nogales, Sonora, durante el año 2010 y comparación con el máximo permisible.

La Figura 9 muestra las concentraciones para la estación en Obregón, de los 34 días muestreados, 13 de ellos se encuentran por encima del máximo permisible de 210 µg/m³ en 24 horas lo que representa el 38.2 % del total de días muestreados. La mayor parte de los días fuera de norma se encuentran entre los meses de abril y julio. El valor máximo de concentración de PST registrado fue de 361.62 µg/m³, el día 7 de abril del 2010.

Para la estación de Agua Prieta se tuvieron solo 20 días de muestreo en el periodo de estudio, de los cuales, 6 días se encontraron por encima del máximo permisible para PST, representando el 30 % del total de días muestreados. Los valores máximos fuera de norma se reportaron en el mes de diciembre con un valor pico de 410.44 µg/m³ (Figura 10). La ciudad se localiza al norte de Sonora con alrededores no tan desérticos, probablemente, aunque no se encontró ningún escrito que soporte esta información; la mayor parte de la influencia por la suspensión de partículas se puede dar por actividad humana como la quema de leña ya que en esta ciudad y en el mes de diciembre se reportan temperaturas muy bajas por lo que la población, comúnmente tiende a tener chimeneas encendidas durante la mayor parte del día.

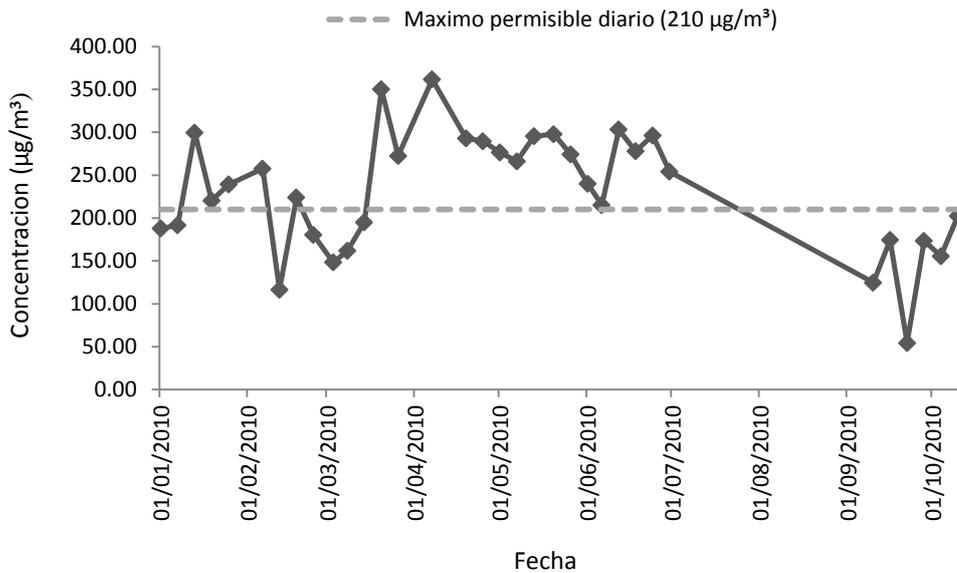


Figura 9. Comportamiento de la concentración contra tiempo de PST en ciudad Obregón, Sonora, durante el año 2010 y comparación con el máximo permisible.

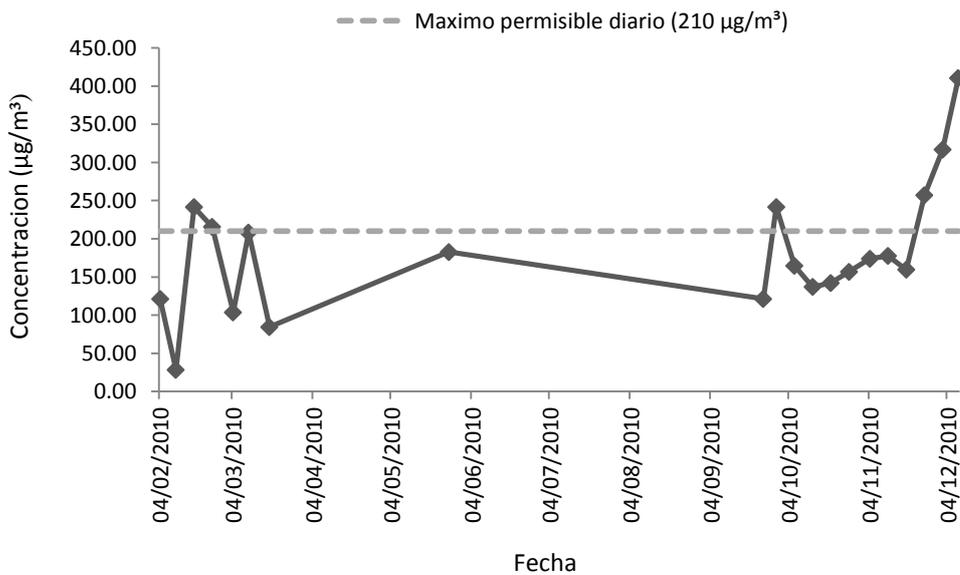


Figura 10. Comportamiento de la concentración contra tiempo de PST en la ciudad de Agua Prieta, Sonora, durante el año 2010 y comparación con el máximo permisible.

7.1.1 Promedio o Mediana Mes a Mes

Este indicador muestra el cambio de las concentraciones de un contaminante a lo largo de un año mostrando los valores típicos de cada uno de los meses. Se obtiene como el promedio (la mediana) de los registros horarios o diarios de cada mes, y permite asociar la concentración de los contaminantes con la intensidad de las actividades antropogénicas o patrones meteorológicos.

En la Tabla 5 se presentan los valores promedio mensual de concentración de PST para las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo. Es importante aclarar que las altas concentraciones de PST tienen numerosos efectos, el más obvio de estos es la reducción y distorsión de la visibilidad, además el sistema respiratorio puede ser dañado directamente por la materia particulada fina que entra hasta los pulmones (Manahan, 2007).

Nogales y Obregón registran valores promedio mensuales más elevados que las otras ciudades, siendo el valor promedio mensual más alto de 694.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en septiembre para Nogales y para Obregón de 314.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de abril. En Hermosillo el valor más alto es de 173.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de enero y en Agua Prieta de 363.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de diciembre.

Tabla 5. Valores promedio mensual de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010.

| Mes | Nogales | Agua Prieta | Obregón | Hermosillo |
|------------|---------|-------------|---------|------------|
| Enero | 519.85 | - | 227.78 | 173.07 |
| Febrero | 418.01 | 151.60 | 194.68 | 124.81 |
| Marzo | 295.42 | 132.13 | 225.58 | 102.43 |
| Abril | 211.43 | - | 314.75 | 103.64 |
| Mayo | 214.21 | 182.76 | 282.09 | 78.97 |
| Junio | 282.19 | - | 264.50 | 107.05 |
| Julio | 200.34 | - | - | 121.83 |
| Agosto | 383.24 | - | - | 83.42 |
| Septiembre | 694.32 | 181.47 | 131.82 | 76.41 |
| Octubre | - | 150.09 | 179.16 | 91.82 |
| Noviembre | 251.65 | 192.05 | - | 114.04 |
| Diciembre | 637.33 | 363.58 | - | - |

7.1.2 Percentil 98

El Percentil 98 sirve para evaluar el valor límite permisible para la concentración de partículas PST, PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. De acuerdo a la norma NOM-025-SSA1-1993 (SSA, 2005) para poder verificar la observancia de esta Norma se requerirá de un mínimo de datos en un año. Este mínimo se evalúa a partir de la cantidad de muestras de 24 horas válidas obtenidas en cada uno de los cuatro trimestres del año, así para cada trimestre se requerirá un mínimo de 75% de muestras válidas. En los sitios donde

el monitoreo no se realice diariamente se tomará como base el número de muestreos calendarizados para dicho periodo, caso que corresponde al muestreo de PST en Sonora.

La frecuencia máxima aceptable con que se permite rebasar el valor límite es del 2% de las concentraciones diarias en un año, es decir, si la concentración (medida) ubicada en el percentil 98 de las mediciones válidas en el año rebasa el límite permisible, entonces no se cumple con la norma. Si la cantidad de muestras es menor al 75% se invalidará el trimestre correspondiente y para la validación del año es necesario contar con al menos tres trimestres válidos, en caso contrario no podrá evaluarse el cumplimiento de la norma para ese año.

De los resultados obtenidos (Tabla 6), se desprende que solo fue posible determinar el cumplimiento de PST en las ciudades de Hermosillo y Nogales, obteniéndose un resultado para las dos ciudades de no cumplimiento con la norma, Hermosillo con un percentil 98 de $305.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y Nogales con $1047.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos superiores al máximo permisible de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabla 7). Para Obregón y Agua Prieta debido a que no se cumplió con los criterios de cobertura de datos de al menos el 75% de muestras válidas al menos en tres trimestres, no pueden ser evaluadas en base a la norma.

Tabla 6. Evaluación del criterio de cobertura para muestreos de PST realizados en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, durante el año 2010.

| Trimestre | Muestras esperadas | 75% del esperado | Muestras validas por ciudad y cumplimiento de criterio de compleción de datos | | | | | | | |
|-----------|--------------------|------------------|---|----------|-------------|----------|---------|---|------------|---|
| | | | (S: Sí, N: No) | | | | | | | |
| | | | Nogales | | Agua Prieta | | Obregón | | Hermosillo | |
| Muestras | Cumple | Muestras | Cumple | Muestras | Cumple | Muestras | Cumple | | | |
| Ene-Mar | 15 | 11 | 15 | S | 7 | N | 14 | S | 13 | S |
| Abr-Jun | 16 | 12 | 16 | S | 1 | N | 14 | S | 14 | S |
| Jul-Sep | 15 | 11 | 12 | S | 2 | N | 4 | N | 9 | N |
| Oct-dic | 14 | 10 | 6 | N | 10 | S | 2 | N | 10 | S |

Tabla 7. Evaluación del Percentil 98 en base a la Norma NOM-025-SSA1-1993.

| Estación | $P_{0.98}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Cumplimiento de Norma ($210 \mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|------------|---|--|
| Hermosillo | 305.38 | No |
| Nogales | 1047.28 | No |

7.1.3 Número de días arriba del límite

Este indicador se obtiene como el conteo de días por arriba del valor límite establecido en las normas de calidad del aire e indica el impacto que tiene la contaminación por un contaminante específico en una región dada, es un indicador complementario a los de la evaluación del cumplimiento de las normas de calidad del aire. La información que genera este indicador es equivalente a la que proporciona el indicador “porcentaje de días arriba del límite” y se obtiene como la división del número de días por arriba del valor límite establecido en las normas entre el total de días con concentraciones válidas del período a analizar. En la Tabla 8, se presenta el cálculo del número de días y el porcentaje de días en que se rebasa el valor límite establecido en la norma. Se puede apreciar que las estaciones en Nogales y Obregón presentan un porcentaje por arriba del 50%, lo cual pone a estas estaciones en una situación muy alarmante, debido a que la población cercana se expuso mas de la mitad del tiempo a PST. Si bien, la estación de Hermosillo se encontró fuera de norma la población solo estuvo expuesta muy poco tiempo a este contaminante durante el periodo de estudio.

Tabla 8. Número de días por Arriba del Límite Máximo Permissible de PST en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010.

| Ciudad | Total de días con muestras válidas | Número de días arriba del límite (210 µg/m ³) | Porcentaje de días arriba del límite |
|-------------|------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Nogales | 49 | 39 | 79.6 |
| Agua Prieta | 20 | 6 | 30.0 |
| Obregón | 34 | 22 | 64.7 |
| Hermosillo | 46 | 1 | 2.2 |

7.1.4 Índice de Calidad del Aire

Con la finalidad de determinar la calidad del aire respecto de PST a partir de índices comúnmente usados, se utilizó el algoritmo del Índice Uniforme de Calidad del Aire (CFR 40, 1992) también usado por el Pollutants Standards Index (PSI) en EUA y por

el IMECA en México, complementándolo con la variante utilizada por Cruz-Campas (2005) consistente en obtener el promedio de las concentraciones que rebasaron el valor máximo normado en cada ciudad durante el año en estudio, y con él calcular el índice antes señalado para cada ciudad para ese período (Tabla 9).

Aunque el índice se basa en una escala básicamente usada para informar a la población de la contaminación de la atmósfera, es pertinente señalar que lo que se pretende es informar de la peligrosidad o riesgo a la salud por dicha contaminación y en el caso de rebasarse una calidad satisfactoria, o lo que es igual rebasarse la norma, entonces esta condición de la atmósfera se considera peligrosa (Trejo-Vázquez, 2006), estableciéndose además que para valores del índice en el rango de 101 a 250 los efectos a la salud pudieron ser: 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. Se debió recomendar a la población evitar la exposición, no realizar ejercicio o actividad física intensa al aire libre, y permanecer en ambientes cerrados mientras duren los episodios de contaminación elevada.

Es pertinente señalar que en México, el Gobierno del Distrito Federal (2006), estableció una nueva clasificación para el IMECA en la Norma NADF-009-AIRE-2006, quedando la calidad de aire como: Buena de 0 a 50, regular de 51 a 100, mala de 101 a 150, muy mala de 151 a 200 y extremadamente mala cuando el valor es mayor de 200 puntos IMECA, sin embargo en esta clasificación no se considera el parámetro de PST como contaminante atmosférico criterio, como tampoco se incluye el plomo, aunque ambos se encuentran normados en México.

Tabla 9. Índice de Calidad del Aire basado en el IMECA modificado por Cruz-Campas (2005) para PST en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010.

| Ciudad | Concentración promedio de los días en se rebasó el límite normado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Algoritmo de cálculo del Índice | Resultado del Índice de Calidad del Aire | Condición o Calificación de la Calidad del aire |
|-------------|--|--|--|---|
| Nogales | 403.07 | $I = ((200 - 100) / (441 - 210)) \times (\text{promedio} - 210) + 100$ | 184 | No Satisfactoria |
| Agua Prieta | 280.55 | | 130 | |
| Obregón | 263.87 | | 123 | |
| Hermosillo | 305.38 | | 141 | |

7.1.5 Distribución de Días con Calidad del Aire Buena, Regular y Mala

A partir de la búsqueda de un calificativo comprensible y que facilite a la población interpretar la calidad del aire, surge la clasificación de los días con buena, regular y mala calidad del aire (SEMARNAT, 2011) y que se definen de acuerdo con el valor diario obtenido y las siguientes consideraciones: Los días con calidad del aire buena ocurren cuando el dato diario se ubica en el intervalo definido entre cero y la mitad del límite respectivo especificado en la norma referente a la salud; que los días con calidad del aire regular ocurren cuando el dato diario se ubica en el intervalo definido entre la mitad del límite y el límite mismo y que los días con mala calidad del aire ocurren cuando el dato diario rebasa el límite especificado.

En la Figura 11, se muestra un resumen comparativo considerando los días y el porcentaje de cada tipo de calidad del aire según ciudad durante el período de muestreo.

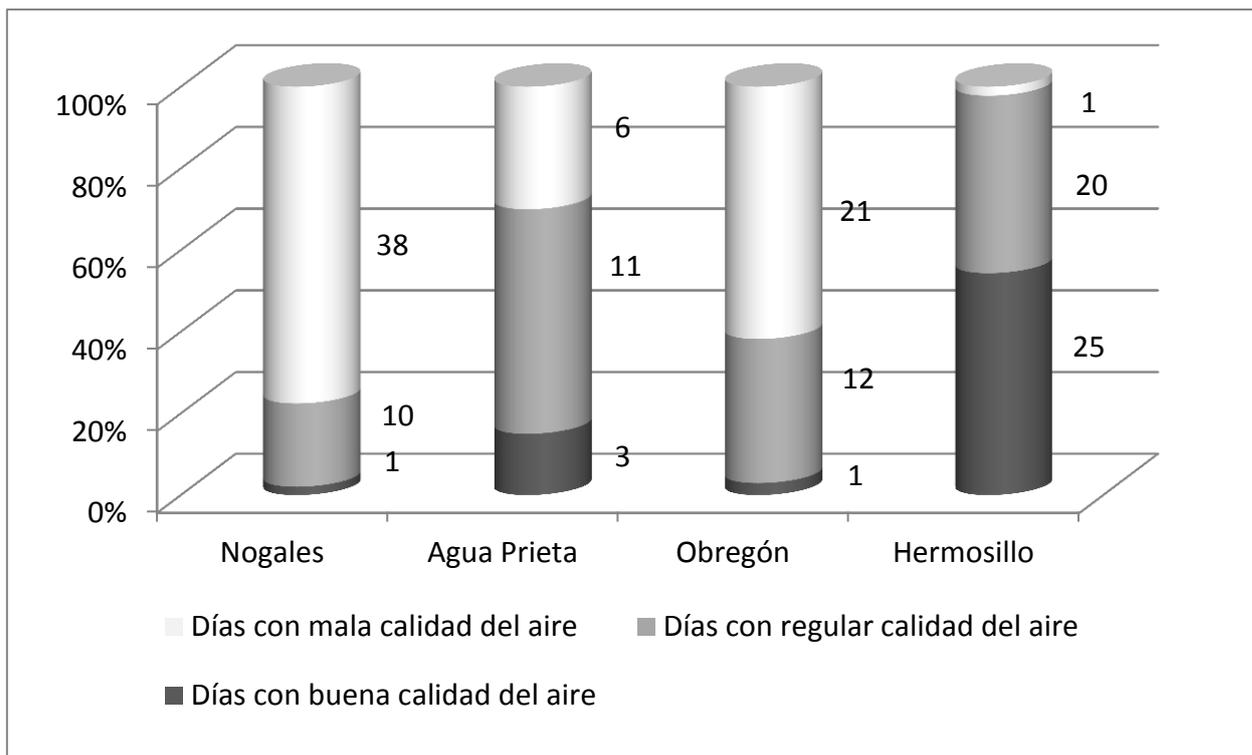


Figura 11. Comparación gráfica de días con buena, regular y mala calidad del aire en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010.

7.2 Metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr)

En la Tabla 10, 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 a los resultados obtenidos y de acuerdo a la Tabla 3, en la que se presentan los valores de Límite de Detección (LD) 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 LD.

En el Apéndice 3 (Tabla 3a, 3b, 3c, 3d) se presentan los valores de concentración de metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) detectados en aire ambiente para los días muestreados en cada ciudad.

Tabla 10. Valores de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio y máximo (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) detectados en el aire ambiente en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora, México, durante el año 2010.

| Metales | Valor | Nogales | Agua Prieta | Obregón | Hermosillo |
|---------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Pb | Promedio \pm DE Máximo | 0.015 ± 0.022 0.096 | 0.008 ± 0.016 0.052 | 0.023 ± 0.026 0.090 | 0.033 ± 0.020 0.096 |
| Cd | Promedio \pm DE Máximo | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND |
| Ni | Promedio \pm DE Máximo | 0.026 ± 0.041 0.284 | 0.012 ± 0.004 0.021 | 0.010 ± 0.003 0.015 | 0.014 ± 0.009 0.040 |
| Cu | Promedio \pm DE Máximo | 0.078 ± 0.040 0.175 | 0.075 ± 0.046 0.164 | 0.035 ± 0.020 0.097 | 0.044 ± 0.030 0.119 |
| Cr | Promedio \pm DE Máximo | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND |

DE = Desviación Estándar

ND < L.D (Pb, Ni = $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$); (Cd = $0.020 \mu\text{g}/\text{m}^3$); (Cu, Cr = $0.010 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Para Hermosillo, se analizaron 46 filtros y solo en uno de ellos se obtuvo una concentración de plomo por debajo del límite de detección en aire ($0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que representa el 2.2% del total. En Agua Prieta, se identificaron 14 filtros por debajo del límite de detección de los 20 totales analizados lo que representa un 70%. Para la ciudad de Obregón, se contó con un total de 34 filtros, de los cuales, 15 de ellos no fue posible establecer una concentración confiable, representando el 44.1%. En la estación de monitoreo que se encuentra en Nogales, fue posible determinar la concentración del 61.2% del total de filtros analizados, representando 30 días de 49 en total,

En cuanto al análisis de níquel, en Hermosillo se detectaron solo 7 filtros de 46 totales, por debajo del límite de detección en aire ($0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$), representando un 46%. De los 20 filtros analizados para la ciudad de Agua Prieta se encontró una sola concentración por debajo del límite de detección, representando el 5 % del total. Para la ciudad de Obregón de 34 filtros analizados se obtuvieron 2 por debajo del límite de detección lo que representa el 5.9% del total de filtros. En Nogales se encontraron 11 filtros por debajo del límite de detección de los 49 en total, representando un 22.4%.

Es importante señalar que no se obtuvo ningún valor de concentración de Cadmio mayor al límite de detección en aire ($0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$), para todas las estaciones de monitoreo en las ciudades analizadas.

En relación al cobre, se pudieron identificar en la ciudad de Hermosillo solo 2 filtros por debajo del límite de detección en aire ($0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que corresponde al 4.3% del total de filtros analizados. En los filtros analizados para la ciudad de Agua Prieta se encontró que uno presentó valores por debajo del límite de detección, el cual representa el 5% del total de filtros. Para las ciudades de Obregón y Nogales no se tuvieron valores por debajo del límite de detección.

En cuanto a la determinación de cromo, Es importante señalar que no se obtuvo ningún valor de concentración mayor al límite de detección en aire ($0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$), para todas las estaciones de monitoreo en las ciudades analizadas.

7.3 Comparación con los Máximos Permisibles para Metales

7.3.1 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; la normativa establecida en EUA (CFR 40, 2008) establece un máximo permisible de $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en promedio trimestral. Como puede observarse en la Tabla 10, el valor máximo detectado de este metal es de $0.096 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual indica que la concentración de plomo en el aire ambiente para el período de estudio no rebasó el máximo permisible de la norma Mexicana citada, tampoco se rebasó la norma citada en Estados Unidos de Norteamérica.

Existen otros criterios de calidad del aire 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, coincidente con la Comunidad Europea (CE, 2010) 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.

Los valores detectados de plomo en el aire ambiente de Hermosillo, Nogales, Obregón y Agua Prieta, se encontraron por debajo de dichos criterios. En la Figura 12, se presenta la gráfica de distribución de concentración de plomo detectadas para las cuatro estaciones de monitoreo a lo largo del período de estudio. En la cual se puede apreciar que las concentraciones de plomo para las estaciones en Hermosillo y Nogales tienden a decrecer de enero a diciembre, mientras que para Obregón y Agua Prieta es en caso contrario. Es notable también, que la concentración mas alta para cada estación se dio de noviembre a febrero, meses en los cuales la temperatura es baja.

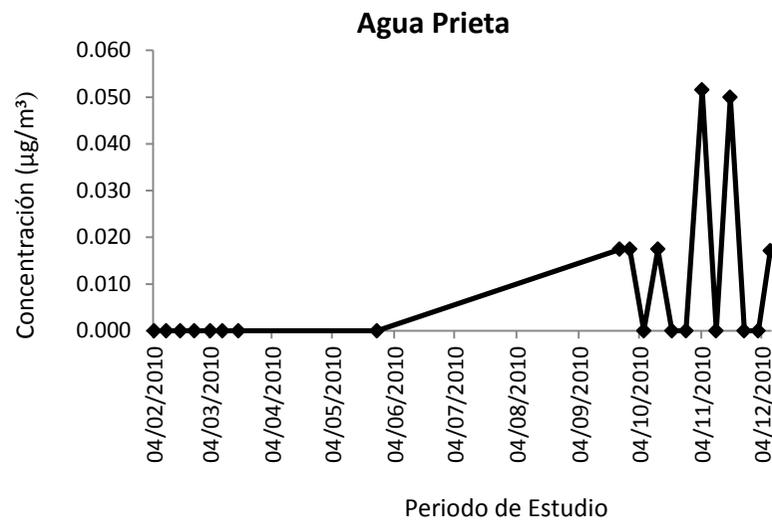
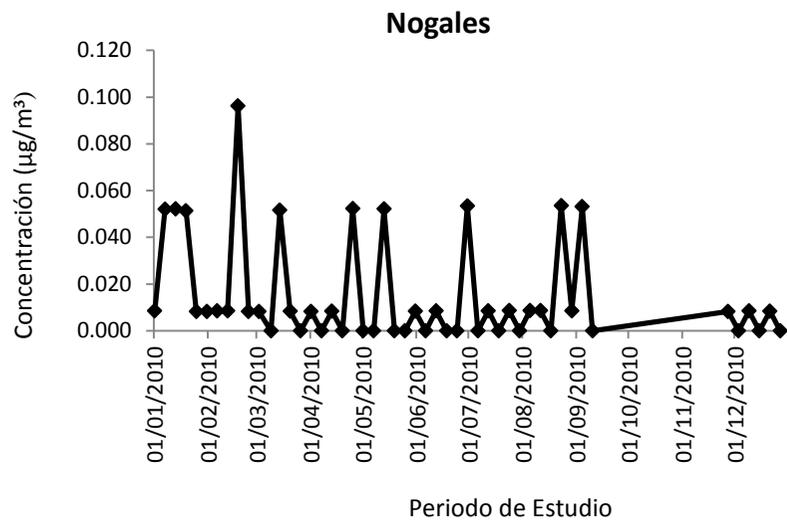
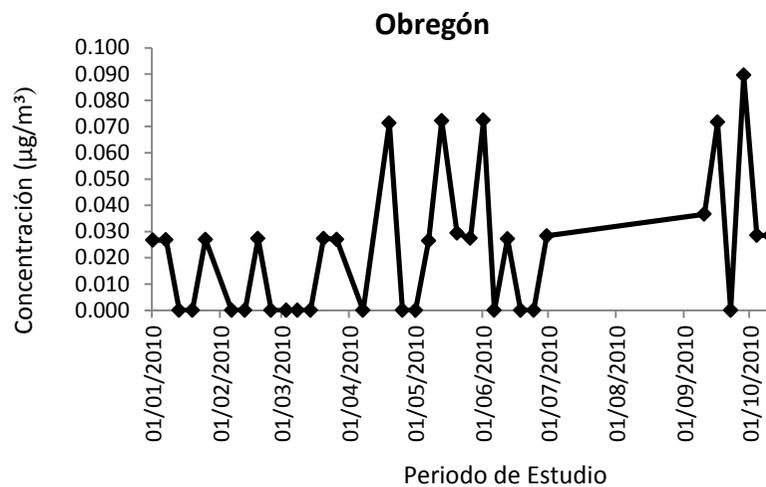
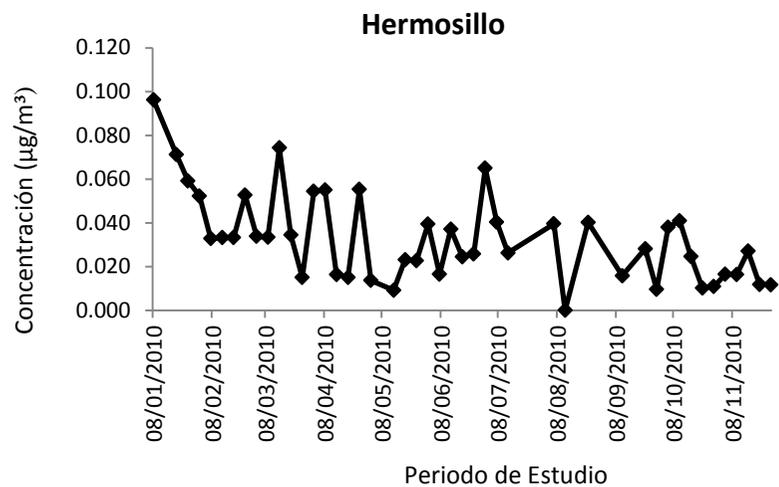


Figura 12. Distribución de concentración de plomo en aire ambiente para las cuatro estaciones de monitoreo durante el año 2010.

7.3.2 Cadmio. En México no existe normatividad para 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 Comunidad Europea (CE, 2010). Es importante señalar que en el presente trabajo no se obtuvieron concentraciones que pudieran detectarse con la metodología analítica utilizada, de tal forma que todos los análisis de Cd, se reportan menores del límite de detección ($0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

7.3.3 Níquel. En México no existen normas respecto de valores máximos permisibles de este metal en el aire. 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 Comunidad Europea (CE, 2010), que fijan un valor para níquel de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual. De acuerdo a la Tabla 10, los promedios obtenidos de concentración de níquel en el periodo anual analizado fueron $0.014 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Hermosillo, $0.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Agua Prieta, $0.010 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Obregón y $0.026 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Nogales, por lo que ésta última no cumplió con dicho criterio. En la Figura 13, se presenta la gráfica de distribución de concentración de níquel detectadas para las cuatro estaciones de monitoreo a lo largo del período de estudio. Las estaciones en Obregón y Agua Prieta presentan concentraciones bajas y estables como se puede apreciar en la figura 13. Pero en Hermosillo las concentraciones estuvieron oscilando entre el máximo permisible anual de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, al final se tuvo un promedio que se encuentra por debajo de este. La estación en Nogales tuvo concentraciones por encima de los $0.040 \mu\text{g}/\text{m}^3$ las cuales son muy altas y recurrentes a lo largo del periodo de estudio. La más sobresaliente es un solo día el cual se elevó mucho la concentración alcanzando unos $0.284 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de febrero. Como ya se dijo antes solo la estación de Nogales no cumplió con el criterio establecido.

7.3.4 Cobre. En México no existen normas referentes a valores máximos permisibles de Cobre en el aire. Por lo tanto, para fines de establecer la calidad del aire basado en las concentraciones detectadas de este metal, en el presente trabajo se señalan los Criterios de Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente de Ontario, Canadá (AAQCs Regulación 419/05, 2005), que fijan un valor para cobre de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 hrs.

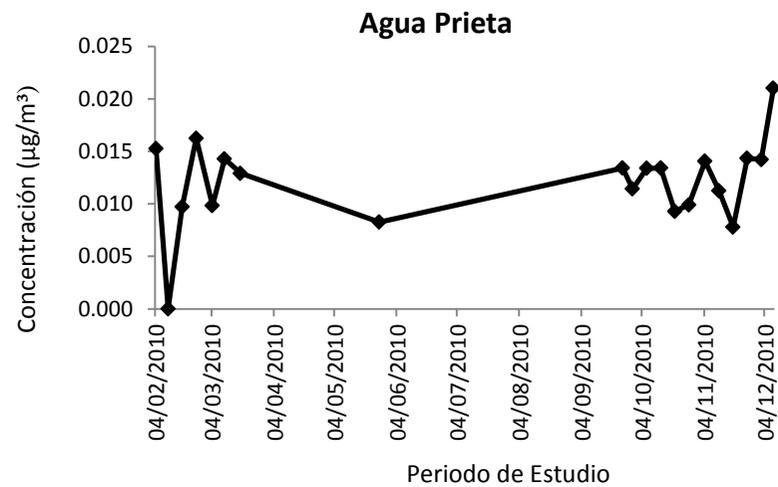
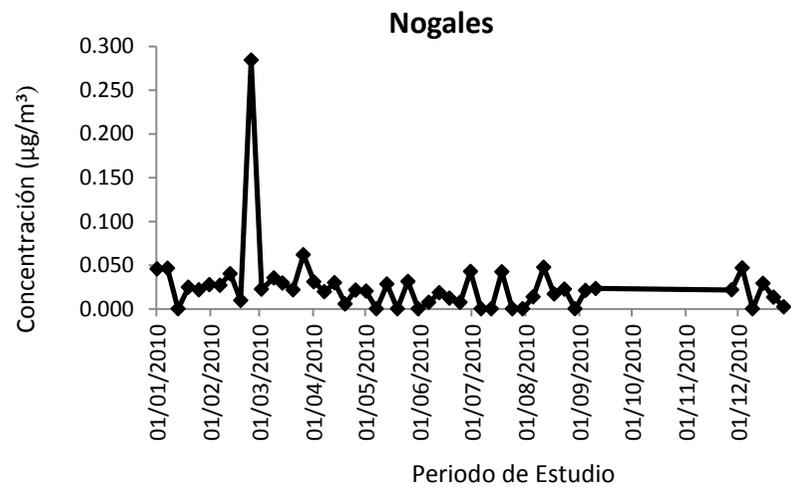
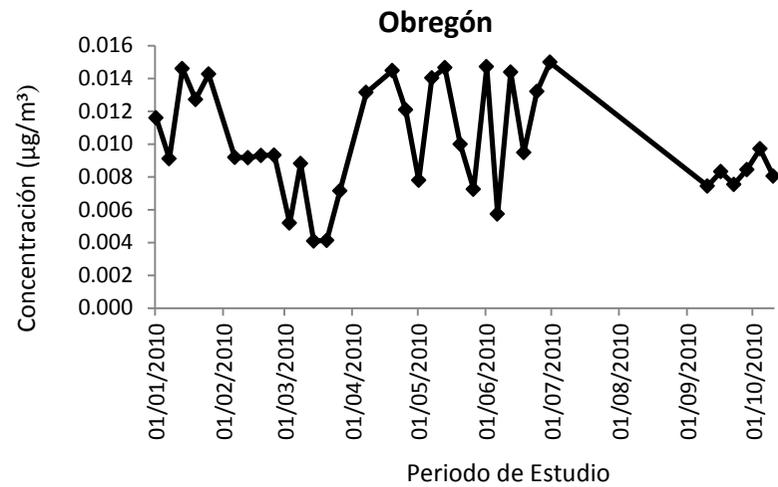
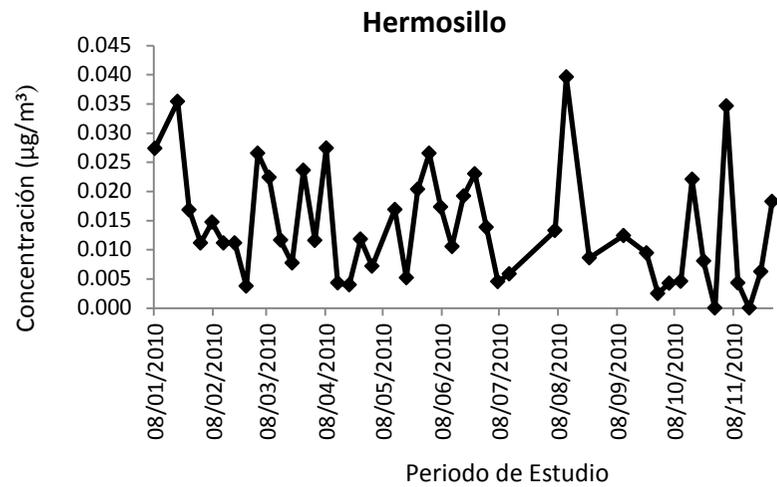


Figura 13. Distribución de concentración de níquel en aire ambiente para las cuatro estaciones de monitoreo durante el año 2010.

De acuerdo a la Tabla 10 y el Apéndice 3 (Tabla 3a), el valor máximo de concentración de cobre que se registró en el periodo anual analizado en las cuatro ciudades fue de $0.175 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual se presentó en la estación de Nogales y se encuentra por debajo del límite permisible, lo cual indica que las cuatro ciudades cumplieron con el criterio establecido. En la Figura 14, se presenta la gráfica de distribución de concentración de cobre detectadas para las cuatro estaciones de monitoreo a lo largo del período de estudio. De acuerdo al máximo permisible diario las concentraciones para las cuatro estaciones son relativamente bajas y estables a lo largo del periodo de estudio, como se puede apreciar en la figura 14, lo mas destacable es el crecimiento de las concentraciones los meses de climas fríos, pero se puede observar, que en la estación de Nogales se incrementan en los meses de julio y agosto, lo cual coincide con un alto trafico vehicular en esos meses para esa ciudad.

7.3.5 Cromo. En México no existe normatividad sobre este metal, sin embargo el Ministerio de Ambiente de Ontario provee una lista de Criterios de Calidad del Aire Ambiente (AAQCs, 2012) con valores máximos permisibles de Cromo en aire que fijan un valor de $0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas. Es importante señalar que en el presente trabajo no se obtuvieron concentraciones que pudieran detectarse con la metodología analítica utilizada, de tal forma que todos los análisis de Cr, se reportan menores del límite de detección ($0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

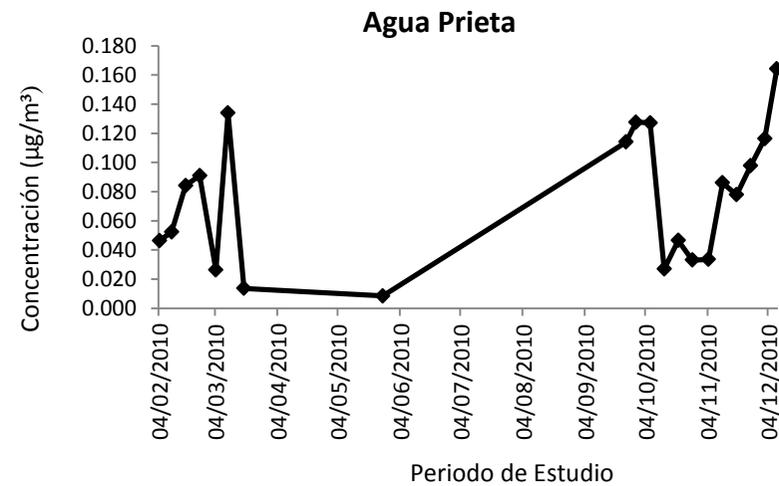
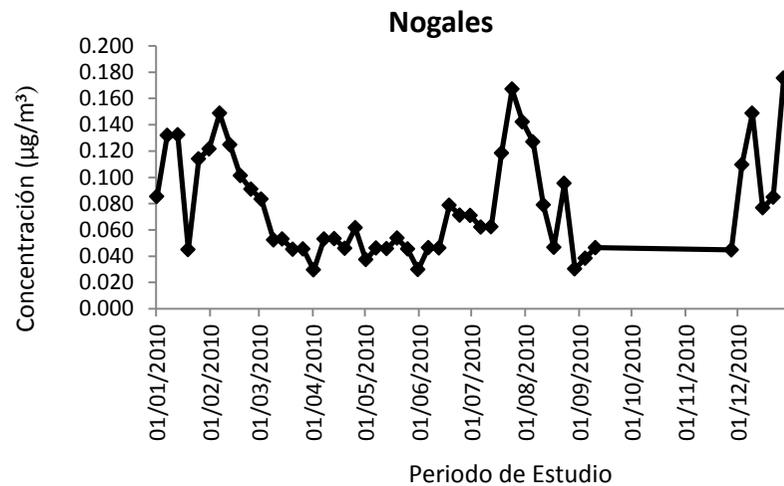
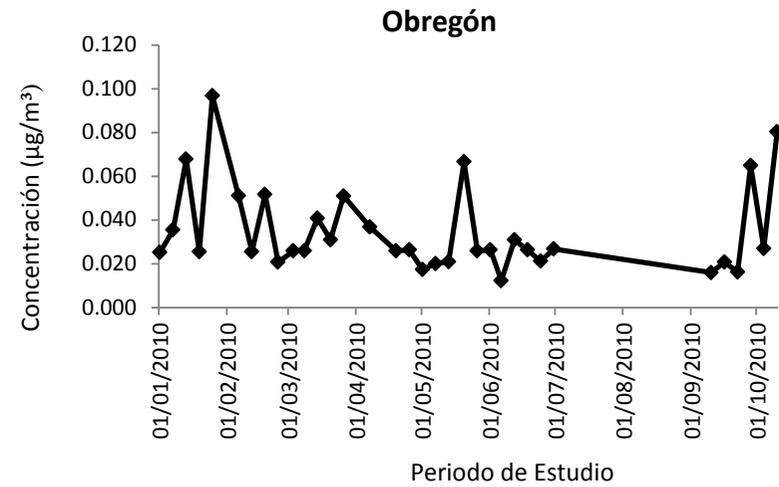
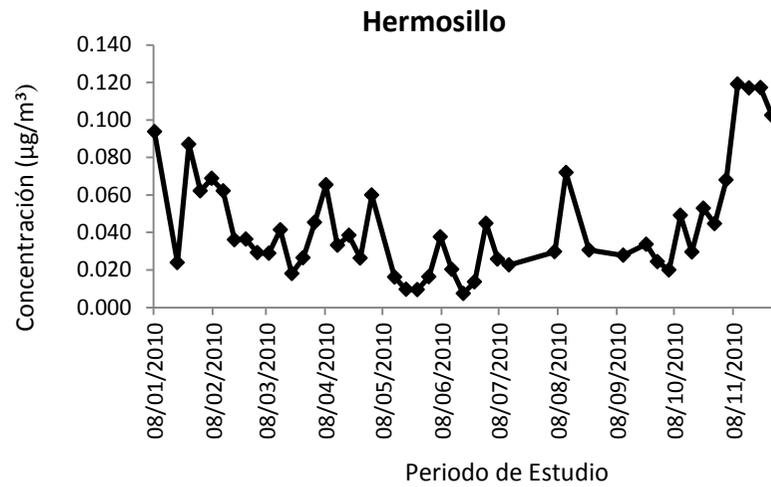


Figura 14. Distribución de concentración de cobre en aire ambiente para las cuatro estaciones de monitoreo durante el año 2010.

7.4 Comparación de resultados con otros estudios relacionados.

En la tabla 11 se puede ver que todas las ciudades registran concentraciones que rebasan el máximo permisible para PST de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en al menos un día, probablemente hubo riesgos a la salud de la población en algunos días en los que se desarrollaron estos estudios. Las ciudades de Nogales y Puerto Peñasco tuvieron los peores escenarios de contaminación en aire en cuanto a partículas. En cuanto a los metales, en particular a plomo, se destaca Tabasco con una concentración de $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, muy por encima de las otras ciudades. Otra observación importante en cuanto a cromo, son las concentraciones registradas por Guaymas y Hermosillo, ya que este metal es cancerígeno, que incluso concentraciones bajas pueden repercutir irreversiblemente en la salud de la población.

Tabla 11. Comparación de resultados de concentraciones máximas de PST y metales en aire ambiente.

| Ciudad | Concentracion maxima de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Concentracion máxima de metales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | | | |
|-----------------------------------|--|--|----|-------|-------|-------|
| | | Pb | Cd | Ni | Cu | Cr |
| Nogales (2010) | 1047.28 | 0.096 | ND | 0.284 | 0.175 | ND |
| Agua Prieta (2010) | 410.44 | 0.052 | ND | 0.021 | 0.164 | ND |
| Obregon (2010) | 350.23 | 0.090 | ND | 0.015 | 0.097 | ND |
| Hermosillo (2010) | 305.38 | 0.096 | ND | 0.040 | 0.119 | ND |
| Guaymas (2010) ¹ | 244.56 | 0.420 | ND | 0.390 | 2.080 | 0.030 |
| Puerto Peñasco(2010) ¹ | 1239.13 | 0.110 | ND | 0.040 | 0.390 | ND |
| Hermosillo (2001) ² | 610.82 | 0.080 | ND | 0.030 | 0.210 | 0.028 |
| Coatzacoalcos (2011) ³ | 300.00 | NA | NA | NA | NA | NA |
| Tabasco (2011) ⁴ | NA | 8.700 | NA | NA | NA | NA |
| Cd. Mexico (2011) ⁵ | 325.00 | NA | NA | NA | NA | NA |
| Torreon (2007) ⁶ | 335.00 | NA | NA | NA | NA | NA |

NA= No analizado

ND= No detectado

1. Quintana-Aguamea, 2013

2. Cruz-Campas, 2005

3. <http://www.eltonacapan.com/nota/20679/respira-coatza-aire-de-mala-calidad.html>

4. <http://ddt.mx/metales-pesado-en-el-aire-de-tabasco/>

5.SMA, 2011.

6. SEMARNAT, 2007.

8. CONCLUSIONES

8.1 Partículas Suspendidas Totales (PST).

En base a la información obtenida en el presente trabajo, la estación ubicada en la ciudad de Hermosillo presentó concentraciones de PST considerablemente bajas, solo un día se encontró fuera de norma, el cual fue la razón para que no se cumpla la norma en el periodo de estudio. Por lo tanto la calidad del aire no fue satisfactoria.

Para la estación de muestreo en Obregón, Sonora, más del 60% de los días muestreados se encontraron fuera del máximo permisible para PST, lo que indica sin duda alguna, que la población cercana a dicha estación estuvo expuesta gran parte del año a daños a la salud. En esta ubicación se obtuvo una calidad no satisfactoria durante el año 2010.

En base a los indicadores de la calidad del aire utilizados en este estudio para PST se obtuvo que para la estación de Agua Prieta, Sonora, casi un tercio de los días muestreados se encontraron fuera de norma, por lo cual la calidad del aire no fue satisfactoria.

La estación ubicada en Nogales, Sonora, repercutió muy negativamente en la calidad del aire, ya que se encontraron las mayores concentraciones de PST y más del 75 % de los días se identificaron como fuera de norma. Por lo tanto la calidad del aire no fue satisfactoria.

8.2 Metales

De acuerdo al máximo permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993 (DOF, 1994) de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio aritmético trimestral y considerando que el valor más alto detectado de plomo en el aire ambiente fue de $0.096 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es posible establecer que las concentraciones de este metal no representaron peligro a la salud de la población durante el periodo de estudio.

En cuanto al cadmio, no se obtuvieron concentraciones que pudieran detectarse con la metodología analítica utilizada.

El criterio propuesto para níquel por la Comunidad Europea (EC, 2003) de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual, no fue rebasado en Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, lo que establece que este contaminante del aire no representó peligro a la salud de la población. Para la estación ubicada en Nogales se determinó una concentración promedio anual de $0.026 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que ésta última no cumplió con dicho criterio, presentando una mala calidad del aire respecto de níquel.

Los Criterios de Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente de Ontario, Canadá (AAQCs Regulación 419/05, 2005), fijan un valor para Cobre de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas. El valor máximo de concentración de Cobre que se registró en el periodo anual analizado en las cuatro ciudades fue de $0.175 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual se encuentra muy por debajo del límite permisible, lo cual indica que las cuatro ciudades cumplieron con el criterio establecido.

En cuanto al cromo, no se obtuvieron concentraciones que pudieran detectarse con la metodología analítica utilizada.

9. RECOMENDACIONES

Realizar una ampliación de la cobertura del programa de monitoreo de los contaminantes en aire (Pb, PST, PM10 y PM2.5) los cuales están normados en México, para evaluar su evolución y poder tomar acciones ante este fenómeno de la contaminación de aire en el estado de Sonora, México.

Con respecto a las actividades de muestreo de PST y metales, se recomienda que se implemente un programa de control de calidad a fin de garantizar la calidad de los resultados del monitoreo en aire ambiente.

Que las instancias de salud realicen estudios para investigar las causas y efectos de la contaminación del aire en la población Sonorense.

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

Se recomienda realizar estudios acerca del origen de los contaminantes atmosféricos en las Ciudades de Obregón, Hermosillo, Agua Prieta y principalmente en Nogales.

10. BIBLIOGRAFÍA

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

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

Cruz – Campas, M. E (2005). Evaluación 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. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. Pág. 81, 1995.

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-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.

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

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

Martínez, E.J., 2010. Química II. Con enfoque en competencias. p. 73-74. Editorial CENGAGE Learning.

Molina, L.T y Molina, M.J. 2005. La calidad del aire en la megaciudad de México: Un Enfoque Integral. Primera Edición en Español 2005. Editorial Fondo de Cultura Económica.

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

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

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2007. Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Región de la Comarca Lagunera 2010-2015.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2011. Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. pp. 362-363, 410 p.

SEMARNAP (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1996. Delegacion Federal en el Estado de Sonora. Concentracion de particulas en aire ambiente para la ciudad de Hermosillo, Sonora, Mexico durante el periodo 1990-1996. Reporte

Secretaria del Medio Ambiente (SMA). Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2011.

Trejo-Vázquez, R. (2006). El IMECA: Indicador del grado de contaminación de la atmósfera. *Conciencia Tecnológica*, Ene-Jun, No 031. Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México. Pp. 50-53.

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). 2006. Guías de la calidad del aire. Actualización mundial 2005. Resumen de evaluación de riesgos.

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

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

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

EEA (Environmental European Agency), 2011. Air quality in Europe, 2011 technical report.

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.

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

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/

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

Summary of O. Reg. 419/05 Standards and Point of Impingement Guidelines & Ambient Air Quality Criteria (AAQCs). Ontario Ministry of the Environment. December, 2005.

Ontario's Ambient Air Quality Criteria (AAQCs). Standards Development Branch
Ontario Ministry of the Environment. April 2012.

11. APÉNDICES

1. Resultados del Control de Calidad durante el Análisis de Metales en Filtros.

Tabla 1a.- Indicadores de calidad. Porcentaje de recuperación de metales y precisión en el análisis químico.

2. Concentraciones de PST en aire ambiente en Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora durante al año 2010.

Tabla 2a.- Concentraciones de PST para la ciudad de Nogales, Sonora durante al año 2010.

Tabla 2b.- Concentraciones de PST para la ciudad de Agua Prieta, Sonora durante al año 2010.

Tabla 2c.- Concentraciones de PST para la ciudad de Obregón, Sonora durante al año 2010.

Tabla 2d.- Concentraciones de PST para la ciudad de Hermosillo, Sonora durante al año 2010.

3. Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora durante el año 2010.

Tabla 3a.- Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Nogales, Sonora, durante al año 2010.

Tabla 3b.- Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Agua Prieta, Sonora, durante al año 2010.

Tabla 3c.- Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Obregón, Sonora, durante al año 2010.

Tabla 3d.- Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Hermosillo, Sonora, durante al año 2010.

APÉNDICE 1. Resultados del Control de Calidad durante el Análisis de Metales en Filtros.

Tabla 1a.- Indicadores de calidad. Porcentaje de recuperación de metales y precisión en el análisis químico.

Estándar: 0.5ppm

| Parámetros | $(\bar{x} \pm DE)$ | Recuperación (%) |
|------------|---------------------|------------------|
| Cu | 0.487 ± 0.01581 | 97.5 |
| Cd | 0.492 ± 0.01581 | 98.5 |
| Ni | 0.483 ± 0.0141 | 96.75 |
| Cr | 0.46 ± 0.01549 | 92 |
| Pb | 0.477 ± 0.0271 | 95.5 |

DE =Desviación estándar

Estándar: 1ppm

| Parámetros | $(\bar{x} \pm DE)$ | Recuperación (%) |
|------------|--------------------|------------------|
| Cu | 0.99 ± 0.01 | 99.0 |
| Cd | 1.00 ± 0.00 | 99.8 |
| Ni | 0.96 ± 0.03 | 96.1 |
| Cr | 0.97 ± 0.07 | 96.7 |
| Pb | 0.98 ± 0.3 | 97.5 |

DE =Desviación estándar

Estándar: 2ppm

| Parámetros | $(\bar{x} \pm DE)$ | Recuperación (%) |
|------------|--------------------|------------------|
| Cu | 1.99 ± 0.011 | 100 |
| Cd | 1.98 ± 0.023 | 99 |
| Ni | 1.96 ± 0.036 | 98 |
| Cr | 1.91 ± 0.100 | 96 |
| Pb | 1.97 ± 0.059 | 98.5 |

DE =Desviación estándar

APÉNDICE 2. Concentraciones de Partículas Suspendidas Totales (PST) en aire ambiente en Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora durante al año 2010.

Tabla 2a.- Concentraciones de PST para la ciudad de Nogales, Sonora durante el año 2010.

| Fecha | Filtro | Peso inicial del filtro | Peso final del filtro | Volumen de aire | Concentración de PST en aire |
|-----------|--------|-------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| | Numero | g | g | m ³ | µg/m ³ |
| 01-ene-10 | 55 | 2.765 | 3.703 | 1520.63 | 616.85 |
| 07-ene-10 | 56 | 2.766 | 3.909 | 1528.99 | 747.55 |
| 13-ene-10 | 57 | 2.776 | 3.874 | 1524.94 | 720.03 |
| 19-ene-10 | 58 | 2.755 | 3.023 | 1548.77 | 173.04 |
| 25-ene-10 | 59 | 2.76 | 3.444 | 1557.45 | 439.18 |
| 31-ene-10 | 60 | 2.749 | 3.408 | 1559.98 | 422.44 |
| 06-feb-10 | 143 | 2.782 | 3.403 | 1518.23 | 409.03 |
| 12-feb-10 | 144 | 2.768 | 3.283 | 1520.47 | 338.71 |
| 18-feb-10 | 145 | 2.758 | 3.687 | 1518.89 | 611.63 |
| 24-feb-10 | 146 | 2.757 | 3.244 | 1557.60 | 312.66 |
| 02-mar-10 | 147 | 2.766 | 3.482 | 1553.62 | 460.86 |
| 09-mar-10 | 61 | 2.751 | 3.13 | 1560.31 | 242.90 |
| 14-mar-10 | 62 | 2.753 | 3.176 | 1540.65 | 274.56 |
| 20-mar-10 | 63 | 2.748 | 3.125 | 1537.14 | 245.26 |
| 26-mar-10 | 64 | 2.754 | 3.142 | 1530.57 | 253.50 |
| 01-abr-10 | 65 | 2.741 | 2.954 | 1549.09 | 137.50 |
| 07-abr-10 | 66 | 2.766 | 3.082 | 1540.26 | 205.16 |
| 13-abr-10 | 67 | 2.762 | 3.101 | 1532.06 | 221.27 |
| 19-abr-10 | 68 | 2.763 | 3.081 | 1516.52 | 209.69 |
| 25-abr-10 | 69 | 2.759 | 3.19 | 1520.01 | 283.55 |
| 01-may-10 | 70 | 2.752 | 3.018 | 1544.09 | 172.27 |
| 07-may-10 | 71 | 2.76 | 3.135 | 1504.57 | 249.24 |
| 13-may-10 | 74 | 2.768 | 3.187 | 1526.69 | 274.45 |
| 19-may-10 | 75 | 2.76 | 3.111 | 1519.74 | 230.96 |
| 25-may-10 | 76 | 2.759 | 3.058 | 1532.39 | 195.12 |
| 31-may-10 | 94 | 2.672 | 2.923 | 1537.90 | 163.21 |
| 06-jun-10 | 95 | 2.657 | 3.004 | 1496.98 | 231.80 |
| 12-jun-10 | 96 | 2.763 | 3.11 | 1509.02 | 229.95 |
| 18-jun-10 | 97 | 2.761 | 3.389 | 1491.79 | 420.97 |
| 24-jun-10 | 98 | 2.772 | 3.133 | 1482.73 | 243.47 |
| 30-jun-10 | 99 | 2.742 | 3.166 | 1489.03 | 284.75 |
| 06-jul-10 | 100 | 2.748 | 3.076 | 1507.84 | 217.53 |
| 12-jul-10 | 92 | 2.662 | 2.923 | 1501.55 | 173.82 |
| 18-jul-10 | 93 | 2.744 | 3.059 | 1500.79 | 209.89 |
| 24-jul-10 | 211 | 2.739 | 3.238 | 1494.28 | 333.94 |
| 30-jul-10 | 212 | 2.728 | 2.828 | 1503.08 | 66.53 |
| 05-ago-10 | 213 | 2.722 | 3.529 | 1495.03 | 539.79 |
| 11-ago-10 | 214 | 2.714 | 2.99 | 1489.32 | 185.32 |
| 17-ago-10 | 215 | 2.713 | 3.064 | 1490.00 | 235.57 |
| 23-ago-10 | 216 | 2.719 | 3.704 | 1485.65 | 663.01 |
| 29-ago-10 | 217 | 2.727 | 3.169 | 1510.96 | 292.53 |
| 04-sep-10 | 218 | 2.736 | 3.628 | 1498.81 | 595.14 |
| 10-sep-10 | 219 | 2.702 | 3.889 | 1495.90 | 793.50 |
| 27-nov-10 | 88 | 2.774 | 3.165 | 1553.75 | 251.65 |
| 03-dic-10 | 89 | 2.769 | 4.353 | 1512.49 | 1047.28 |
| 09-dic-10 | 90 | 2.759 | 4.242 | 1516.87 | 977.67 |
| 15-dic-10 | 91 | 2.786 | 3.514 | 1533.79 | 474.64 |
| 21-dic-10 | 92 (1) | 2.778 | 3.456 | 1528.78 | 443.49 |
| 27-dic-10 | 93 (1) | 2.784 | 3.164 | 1560.06 | 243.58 |

Tabla 2b.- Concentraciones de PST para la ciudad de Agua Prieta, Sonora durante el año 2010.

| Fecha | Filtro | Peso inicial del filtro | Peso final del filtro | Volumen de aire | Concentración de PST en aire |
|-----------|--------|-------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| | Numero | g | g | m ³ | µg/m ³ |
| 04-feb-10 | 248 | 2.741 | 2.96 | 1810.2 | 120.98 |
| 10-feb-10 | 249 | 2.74 | 2.792 | 1839.4 | 28.27 |
| 17-feb-10 | 250 | 2.765 | 3.213 | 1854.5 | 241.58 |
| 24-feb-10 | 251 | 2.763 | 3.161 | 1846.2 | 215.58 |
| 04-mar-10 | 252 | 2.763 | 2.953 | 1831.3 | 103.75 |
| 10-mar-10 | 253 | 2.724 | 3.004 | 1344.6 | 208.24 |
| 18-mar-10 | 254 | 2.723 | 2.872 | 1765.4 | 84.40 |
| 26-may-10 | 332 | 2.747 | 3.729 | 5373.2 | 182.76 |
| 24-sep-10 | 352 | 2.781 | 2.998 | 1790.3 | 121.21 |
| 29-sep-10 | 331 | 2.762 | 3.194 | 1787.1 | 241.73 |
| 06-oct-10 | 328 | 2.774 | 3.069 | 1793.3 | 164.50 |
| 13-oct-10 | 327 | 2.752 | 2.997 | 1790.2 | 136.86 |
| 20-oct-10 | 353 | 2.791 | 3.048 | 1807.6 | 142.18 |
| 27-oct-10 | 351 | 2.774 | 3.059 | 1817.4 | 156.82 |
| 04-nov-10 | 330 | 2.777 | 3.089 | 1793.3 | 173.98 |
| 11-nov-10 | 354 | 2.794 | 3.116 | 1814.1 | 177.50 |
| 18-nov-10 | 329 | 2.773 | 3.068 | 1850.1 | 159.45 |
| 25-nov-10 | 356 | 2.766 | 3.24 | 1842.5 | 257.26 |
| 02-dic-10 | 355 | 2.777 | 3.365 | 1856.6 | 316.71 |
| 08-dic-10 | 403 | 2.799 | 3.549 | 1827.3 | 410.44 |

Tabla 2c.- Concentraciones de PST para la ciudad de Obregón, Sonora durante el año 2010.

| Fecha | Filtro | Peso inicial del filtro | Peso final del filtro | Volumen de aire | Concentración de PST en aire |
|-----------|--------|-------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| | Numero | g | g | m ³ | µg/m ³ |
| 01-ene-10 | 262 | 2.732 | 3.082 | 1863.7 | 187.80 |
| 07-ene-10 | 270 | 2.726 | 3.082 | 1855.8 | 191.83 |
| 13-ene-10 | 246 | 2.756 | 3.295 | 1799.8 | 299.48 |
| 19-ene-10 | 247 | 2.723 | 3.130 | 1845.8 | 220.50 |
| 25-ene-10 | 241 | 2.775 | 3.216 | 1843.1 | 239.27 |
| 06-feb-10 | 257 | 2.725 | 3.199 | 1840.2 | 257.58 |
| 12-feb-10 | 258 | 2.725 | 2.940 | 1843.8 | 116.61 |
| 18-feb-10 | 260 | 2.729 | 3.136 | 1816.9 | 224.01 |
| 24-feb-10 | 259 | 2.740 | 3.067 | 1811.5 | 180.51 |
| 03-mar-10 | 243 | 2.795 | 3.064 | 1813.2 | 148.36 |
| 08-mar-10 | 282 | 2.810 | 3.103 | 1811.7 | 161.73 |
| 14-mar-10 | 287 | 2.795 | 3.154 | 1840.0 | 195.11 |
| 20-mar-10 | 288 | 2.786 | 3.423 | 1818.8 | 350.23 |
| 26-mar-10 | 281 | 2.819 | 3.321 | 1842.5 | 272.46 |
| 19-abr-10 | 290 | 2.802 | 3.334 | 1815.3 | 293.06 |
| 25-abr-10 | 285 | 2.794 | 3.311 | 1785.4 | 289.57 |
| 01-may-10 | 286 | 2.793 | 3.393 | 2170.4 | 276.45 |
| 07-may-10 | 289 | 2.783 | 3.282 | 1874.8 | 266.16 |
| 13-may-10 | 284 | 2.778 | 3.308 | 1793.9 | 295.45 |
| 20-may-10 | 315 | 2.830 | 3.334 | 1691.7 | 297.93 |
| 26-may-10 | 317 | 2.789 | 3.287 | 1814.4 | 274.47 |
| 01-jun-10 | 316 | 2.797 | 3.226 | 1786.8 | 240.09 |
| 06-jun-10 | 318 | 2.802 | 3.790 | 4590.9 | 215.21 |
| 12-jun-10 | 319 | 2.778 | 3.332 | 1826.8 | 303.26 |
| 18-jun-10 | 320 | 2.799 | 3.295 | 1785.1 | 277.86 |
| 24-jun-10 | 333 | 2.675 | 3.202 | 1778.1 | 296.39 |
| 30-jun-10 | 334 | 2.669 | 3.115 | 1754.6 | 254.19 |
| 10-sep-10 | 358 | 2.810 | 3.251 | 3533.9 | 124.79 |
| 16-sep-10 | 357 | 2.790 | 3.105 | 1806.1 | 174.41 |
| 22-sep-10 | 359 | 2.803 | 2.898 | 1743.4 | 54.49 |
| 28-sep-10 | 360 | 2.796 | 3.047 | 1446.0 | 173.58 |
| 04-oct-10 | 361 | 2.756 | 3.027 | 1741.0 | 155.66 |
| 10-oct-10 | 362 | 2.781 | 3.136 | 1751.8 | 202.65 |

Tabla 2d.- Concentraciones de PST para la ciudad de Hermosillo, Sonora durante el año 2010.

| Fecha | Filtro | Peso inicial del filtro | Peso final del filtro | Volumen de aire | Concentración de PST en aire |
|-----------|--------|-------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| | Numero | g | g | m ³ | µg/m ³ |
| 08-ene-10 | 180 | 2.7400 | 3.2759 | 1754.86 | 305.38 |
| 20-ene-10 | 1690 | 2.7923 | 2.9990 | 2371.23 | 87.17 |
| 26-ene-10 | 1697 | 2.8000 | 3.1614 | 2853.31 | 126.66 |
| 01-feb-10 | 1705 | 2.7921 | 3.0460 | 3230.28 | 78.60 |
| 07-feb-10 | 1708 | 2.7957 | 3.0699 | 3265.06 | 83.98 |
| 13-feb-10 | 1716 | 2.7623 | 3.1374 | 3230.56 | 116.11 |
| 19-feb-10 | 1725 | 2.7638 | 3.0300 | 3230.58 | 82.40 |
| 25-feb-10 | 1729 | 2.7480 | 3.1480 | 3204.87 | 124.81 |
| 03-mar-10 | 1739 | 2.7425 | 3.0779 | 3169.53 | 105.82 |
| 09-mar-10 | 1749 | 2.7808 | 3.0521 | 3212.93 | 84.44 |
| 15-mar-10 | 1753 | 2.9175 | 3.2585 | 3100.56 | 109.98 |
| 21-mar-10 | 1760 | 2.9303 | 3.1944 | 3118.43 | 84.69 |
| 27-mar-10 | 1764 | 2.9369 | 3.3246 | 3047.72 | 127.21 |
| 02-abr-10 | 1774 | 2.9324 | 3.1535 | 3100.98 | 71.30 |
| 08-abr-10 | 1783 | 2.9256 | 3.3510 | 3066.39 | 138.73 |
| 14-abr-10 | 1784 | 2.9374 | 3.2150 | 2791.91 | 99.43 |
| 20-abr-10 | 1785 | 2.9196 | 3.2012 | 3030.24 | 92.93 |
| 26-abr-10 | 1803 | 2.9093 | 3.2629 | 3053.80 | 115.79 |
| 02-may-10 | 1807 | 2.9086 | 3.2144 | 3347.56 | 91.35 |
| 14-may-10 | 1812 | 2.9054 | 3.2739 | 4973.01 | 74.10 |
| 20-may-10 | 1808 | 2.9206 | 3.2354 | 4633.50 | 67.94 |
| 26-may-10 | 1818 | 2.9118 | 3.3009 | 4717.51 | 82.48 |
| 01-jun-10 | 1825 | 2.9073 | 3.2564 | 2713.77 | 128.64 |
| 07-jun-10 | 1829 | 2.9025 | 3.2515 | 2772.92 | 125.86 |
| 19-jun-10 | 1834 | 2.9208 | 3.2562 | 4379.73 | 76.58 |
| 25-jun-10 | 1839 | 2.8909 | 3.4123 | 4170.87 | 125.01 |
| 01-jul-10 | 1842 | 2.8907 | 3.2926 | 2595.92 | 154.82 |
| 07-jul-10 | 1846 | 2.8996 | 3.2765 | 2655.91 | 141.91 |
| 13-jul-10 | 1854 | 2.9216 | 3.2030 | 4093.09 | 68.75 |
| 06-ago-10 | 1850 | 2.8959 | 3.1715 | 2712.06 | 101.62 |
| 12-ago-10 | 1860 | 2.9099 | 3.1056 | 2122.10 | 92.22 |
| 24-ago-10 | 1864 | 2.9051 | 3.1418 | 4195.32 | 56.42 |
| 11-sep-10 | 1900 | 2.8850 | 3.2250 | 2896.33 | 117.39 |
| 23-sep-10 | 1911 | 2.8965 | 3.0945 | 3814.29 | 51.91 |
| 29-sep-10 | 1913 | 2.9096 | 3.1963 | 4784.71 | 59.92 |
| 05-oct-10 | 1919 | 2.9074 | 3.1047 | 2821.39 | 69.93 |
| 11-oct-10 | 1923 | 2.9337 | 3.2799 | 2617.18 | 132.28 |
| 17-oct-10 | 1927 | 2.9230 | 3.1828 | 4353.22 | 59.68 |
| 23-oct-10 | 1930 | 2.9163 | 3.2772 | 4474.89 | 80.65 |
| 29-oct-10 | 1935 | 2.9110 | 3.4024 | 4216.22 | 116.55 |
| 04-nov-10 | 1939 | 2.9261 | 3.2368 | 2773.36 | 112.03 |
| 10-nov-10 | 1973 | 2.9065 | 3.2948 | 2791.12 | 139.12 |
| 16-nov-10 | 1989 | 2.9159 | 3.3471 | 3969.07 | 108.64 |
| 22-nov-10 | 1992 | 2.9212 | 3.3132 | 3859.03 | 101.58 |
| 28-nov-10 | 1994 | 2.9193 | 3.3491 | 3948.92 | 108.84 |

APÉNDICE 3. Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo, Sonora durante el año 2010.

Tabla 3a.- Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Nogales, Sonora, durante el año 2010.

| Fecha | Cobre $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Cadmio $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Cromo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Níquel $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Plomo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 01-ene-10 | 0.085 | 0.000 | 0.000 | 0.046 | 0.008 |
| 07-ene-10 | 0.132 | 0.000 | 0.000 | 0.046 | 0.052 |
| 13-ene-10 | 0.132 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.052 |
| 19-ene-10 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.025 | 0.051 |
| 25-ene-10 | 0.114 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.008 |
| 31-ene-10 | 0.122 | 0.000 | 0.000 | 0.028 | 0.008 |
| 06-feb-10 | 0.149 | 0.000 | 0.000 | 0.027 | 0.008 |
| 12-feb-10 | 0.125 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 0.008 |
| 18-feb-10 | 0.101 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.096 |
| 24-feb-10 | 0.091 | 0.000 | 0.000 | 0.284 | 0.008 |
| 02-mar-10 | 0.083 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.008 |
| 09-mar-10 | 0.052 | 0.000 | 0.000 | 0.035 | 0.000 |
| 14-mar-10 | 0.053 | 0.000 | 0.000 | 0.030 | 0.052 |
| 20-mar-10 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.008 |
| 26-mar-10 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.062 | 0.000 |
| 01-abr-10 | 0.029 | 0.000 | 0.000 | 0.031 | 0.008 |
| 07-abr-10 | 0.053 | 0.000 | 0.000 | 0.019 | 0.000 |
| 13-abr-10 | 0.053 | 0.000 | 0.000 | 0.030 | 0.008 |
| 19-abr-10 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.000 |
| 25-abr-10 | 0.062 | 0.000 | 0.000 | 0.021 | 0.052 |
| 01-may-10 | 0.037 | 0.000 | 0.000 | 0.020 | 0.000 |
| 07-may-10 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 13-may-10 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.028 | 0.052 |
| 19-may-10 | 0.054 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 25-may-10 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.031 | 0.000 |
| 31-may-10 | 0.030 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.008 |
| 06-jun-10 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.000 |
| 12-jun-10 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.018 | 0.008 |
| 18-jun-10 | 0.079 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.000 |
| 24-jun-10 | 0.071 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.000 |
| 30-jun-10 | 0.071 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.053 |
| 06-jul-10 | 0.062 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 12-jul-10 | 0.062 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.009 |
| 18-jul-10 | 0.118 | 0.000 | 0.000 | 0.042 | 0.000 |
| 24-jul-10 | 0.167 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.009 |
| 30-jul-10 | 0.142 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 05-ago-10 | 0.127 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.009 |
| 11-ago-10 | 0.079 | 0.000 | 0.000 | 0.048 | 0.009 |
| 17-ago-10 | 0.047 | 0.000 | 0.000 | 0.017 | 0.000 |
| 23-ago-10 | 0.095 | 0.000 | 0.000 | 0.023 | 0.053 |
| 29-ago-10 | 0.030 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.008 |
| 04-sep-10 | 0.038 | 0.000 | 0.000 | 0.021 | 0.053 |
| 10-sep-10 | 0.047 | 0.000 | 0.000 | 0.023 | 0.000 |
| 27-nov-10 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.008 |
| 03-dic-10 | 0.109 | 0.000 | 0.000 | 0.047 | 0.000 |
| 09-dic-10 | 0.149 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.008 |
| 15-dic-10 | 0.077 | 0.000 | 0.000 | 0.029 | 0.000 |
| 21-dic-10 | 0.085 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.008 |
| 27-dic-10 | 0.175 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Tabla 3b.- Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Agua Prieta, Sonora, durante el año 2010.

| Fecha | Cobre $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Cadmio $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Cromo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Níquel $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Plomo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 04-feb-10 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.000 |
| 10-feb-10 | 0.052 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 17-feb-10 | 0.084 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.000 |
| 24-feb-10 | 0.091 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.000 |
| 04-mar-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.000 |
| 10-mar-10 | 0.134 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.000 |
| 18-mar-10 | 0.014 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.000 |
| 26-may-10 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.000 |
| 24-sep-10 | 0.114 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.017 |
| 29-sep-10 | 0.128 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.017 |
| 06-oct-10 | 0.127 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.000 |
| 13-oct-10 | 0.027 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.017 |
| 20-oct-10 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.000 |
| 27-oct-10 | 0.033 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.000 |
| 04-nov-10 | 0.033 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.052 |
| 11-nov-10 | 0.086 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.000 |
| 18-nov-10 | 0.078 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.050 |
| 25-nov-10 | 0.098 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.000 |
| 02-dic-10 | 0.116 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.000 |
| 08-dic-10 | 0.164 | 0.000 | 0.000 | 0.021 | 0.017 |

Tabla 3c.- Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Obregón, Sonora, durante el año 2010.

| Fecha | Cobre $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Cadmio $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Cromo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Níquel $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Plomo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 01-ene-10 | 0.025 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.027 |
| 07-ene-10 | 0.035 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.027 |
| 13-ene-10 | 0.068 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.000 |
| 19-ene-10 | 0.025 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.000 |
| 25-ene-10 | 0.097 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.027 |
| 06-feb-10 | 0.051 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.000 |
| 12-feb-10 | 0.025 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.000 |
| 18-feb-10 | 0.052 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.027 |
| 24-feb-10 | 0.021 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.000 |
| 03-mar-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.000 |
| 08-mar-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.000 |
| 14-mar-10 | 0.041 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20-mar-10 | 0.031 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.027 |
| 26-mar-10 | 0.051 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.027 |
| 07-abr-10 | 0.037 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.000 |
| 19-abr-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.071 |
| 25-abr-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.000 |
| 01-may-10 | 0.017 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.000 |
| 07-may-10 | 0.020 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.027 |
| 20-may-10 | 0.067 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.029 |
| 26-may-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.027 |
| 06-jun-10 | 0.012 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.000 |
| 12-jun-10 | 0.031 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.027 |
| 18-jun-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.000 |
| 24-jun-10 | 0.021 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.000 |
| 30-jun-10 | 0.027 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.028 |
| 10-sep-10 | 0.016 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.037 |
| 16-sep-10 | 0.021 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.072 |
| 22-sep-10 | 0.016 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.000 |
| 28-sep-10 | 0.065 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.090 |
| 04-oct-10 | 0.027 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.029 |
| 10-oct-10 | 0.080 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.028 |

Tabla 3d.- Concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni y Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente para Hermosillo, Sonora, durante el año 2010.

| Fecha | Cobre $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Cadmio $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Cromo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Níquel $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Plomo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 08-ene-10 | 0.094 | 0.000 | 0.000 | 0.027 | 0.096 |
| 20-ene-10 | 0.024 | 0.000 | 0.000 | 0.035 | 0.071 |
| 26-ene-10 | 0.087 | 0.000 | 0.000 | 0.017 | 0.059 |
| 01-feb-10 | 0.062 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.052 |
| 07-feb-10 | 0.069 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.033 |
| 13-feb-10 | 0.062 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.033 |
| 19-feb-10 | 0.036 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.033 |
| 25-feb-10 | 0.036 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.053 |
| 03-mar-10 | 0.029 | 0.000 | 0.000 | 0.027 | 0.034 |
| 09-mar-10 | 0.029 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.033 |
| 15-mar-10 | 0.041 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.074 |
| 21-mar-10 | 0.018 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.034 |
| 27-mar-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.024 | 0.015 |
| 02-abr-10 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.054 |
| 08-abr-10 | 0.065 | 0.000 | 0.000 | 0.027 | 0.055 |
| 14-abr-10 | 0.033 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.016 |
| 20-abr-10 | 0.038 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 |
| 26-abr-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.055 |
| 02-may-10 | 0.060 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.014 |
| 14-may-10 | 0.016 | 0.000 | 0.000 | 0.017 | 0.009 |
| 20-may-10 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.023 |
| 26-may-10 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.020 | 0.023 |
| 01-jun-10 | 0.016 | 0.000 | 0.000 | 0.027 | 0.039 |
| 07-jun-10 | 0.038 | 0.000 | 0.000 | 0.017 | 0.016 |
| 13-jun-10 | 0.020 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.037 |
| 19-jun-10 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.019 | 0.024 |
| 25-jun-10 | 0.014 | 0.000 | 0.000 | 0.023 | 0.026 |
| 01-jul-10 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.065 |
| 07-jul-10 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.040 |
| 13-jul-10 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.026 |
| 06-ago-10 | 0.030 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.040 |
| 12-ago-10 | 0.072 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 0.000 |
| 24-ago-10 | 0.031 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.040 |
| 11-sep-10 | 0.028 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.016 |
| 23-sep-10 | 0.034 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.028 |
| 29-sep-10 | 0.024 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 |
| 11-oct-10 | 0.049 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.041 |
| 17-oct-10 | 0.029 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.025 |
| 23-oct-10 | 0.053 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.010 |
| 29-oct-10 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.011 |
| 04-nov-10 | 0.068 | 0.000 | 0.000 | 0.035 | 0.016 |
| 10-nov-10 | 0.119 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.016 |
| 16-nov-10 | 0.117 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.027 |
| 22-nov-10 | 0.117 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.012 |
| 28-nov-10 | 0.102 | 0.000 | 0.000 | 0.018 | 0.012 |