

UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS**

**Estudio de la Calidad del Aire Respecto de Partículas
Suspendidas Totales (PST) y Metales Pesados (Cu, Cr y
Mo), en la Ciudad de Cananea, Sonora, México.**

TESIS PROFESIONAL PRÁCTICA

Que para obtener el Título de:

QUÍMICO EN ALIMENTOS

Presenta:

Evangelina Palomares Morales

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

FORMA DE APROBACIÓN

Los miembros del Jurado designado para revisar la Tesis Profesional de Evangelina Palomares Morales, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el título de Químico en Alimentos.

M. en C. Arturo Villalba Atondo
Director de tesis

Dra. María Engracia Arce Corrales
Secretario

Dr. Agustín Gómez Álvarez
Vocal

Dra. Clara Rosalía Álvarez Chávez
Suplente

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora y al Departamento de Ciencias Químico-Biológicas por su aportación y apoyo a mi desarrollo académico.

Al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS), por su gran apoyo en la realización de esta investigación.

A mis sinodales M.C. Arturo Israel Villalba Atondo, Dr. Agustín Gómez Álvarez, Dra. María Engracia Arce Corrales y Dra. Clara Rosalía Álvarez Chávez; gracias por su paciencia, dedicación, motivación y oportuna instrucción. Ha sido un privilegio poder contar con su experiencia.

A quien participó en la fase experimental; Q.B. Ana María Pérez Villalba y al Dr. Agustín Gómez Álvarez, por su invaluable aporte en el presente trabajo.

De igual forma: a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

¡Gracias a todos ustedes!

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres, que a pesar de que ya no están conmigo, siento su presencia espiritual, y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ellos como lo es para mí. Y, sobre todo, gracias a mi familia directa por estar incondicionalmente conmigo durante este proceso: mis hijos; Jesús, Alejandro y Melissa, y mi esposo; Gudberto.

CONTENIDO

FORMA DE APROBACIÓN	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICATORIA.....	4
LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS	13
Objetivo General.....	13
Objetivos Específicos.....	13
HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	14
Hipótesis de Trabajo.....	14
Hipótesis de Nulidad.....	14
ANTECEDENTES	15
Calidad del Aire	15
Fuentes de Contaminación del Aire	16
Tipos de Contaminantes del Aire	17
Partículas.....	18
Metales	19
Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire.....	19
Partículas.....	20
Metales	20
Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire	21
Valores Máximos Permisibles para Partículas Suspendidas Totales (PST).....	22
Valores Máximos Permisibles para Metales	23
ÁREA DE ESTUDIO.....	24
Ubicación Geográfica.....	24

Caso de estudio: Cananea, Sonora	24
MATERIALES Y MÉTODOS	27
Procedimiento de Muestreo	27
Análisis de Laboratorio.....	28
Partículas Suspendidas Totales (PST).....	28
Metales Pesados Totales (Cu, Cr y Mo).....	29
Control de Calidad en el Análisis de las Muestras de Filtros	29
Indicadores de Calidad de los Datos.....	30
Precisión	30
Exactitud	31
Límite de Detección del Instrumento (L.D)	32
Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire, Utilizados en la Investigación.....	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
Partículas Suspendidas Totales (PST).....	33
Promedio por Mes.....	35
Percentil 98.....	36
Distribución de Días con Calidad del Aire Buena, Regular y Mala.....	37
Comportamiento de las Partículas Suspendidas Totales (PST)	
Respecto a Datos Climatológicos.....	38
Metales (Cu, Cr, Mo).....	49
Comparación de los Resultados de Metales Respecto a los Valores Máximos	
Permisibles	53
Cobre	53
Cromo	53
Molibdeno	53
Comparación de los Resultados Obtenidos con Otros Estudios.....	54
CONCLUSIONES	56

Metales	56
RECOMENDACIONES.....	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59
APÉNDICES.....	63
APÉNDICE 1. Resultados del Control de Calidad durante el Análisis de Metales en filtros	64
APÉNDICE 2. Concentraciones de PST en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, México, durante el periodo de julio 2014 a junio 2015.....	68
APÉNDICE 3. Direcciones preferenciales de los vientos en el sitio en estudio.....	72
APÉNDICE 4. Resultados de metales (Cu, Cr, Mo) en aire ambiente en Cananea, Sonora, México en un período anual.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Interpretación del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).	17
2	Determinación del percentil 98 para concentración de PST en la ciudad de Cananea, y su comparación con las ciudades de Nogales y Hermosillo, Sonora México.	40
3	Porcentaje al año de días con buena, regular y mala calidad del aire respecto a PST en siete ciudades de Sonora, México.	41
4	Precipitación y día de monitoreo de polvos durante el proyecto en el periodo julio-diciembre 2014.	47
5	Precipitación y día de monitoreo de polvos durante el proyecto durante el periodo enero-Junio 2015.	48
6	Datos climatológicos en el trimestre julio-septiembre de 2014.	49
7	Datos climatológicos en el trimestre octubre-diciembre de 2014.	50
8	Datos climatológicos en el trimestre enero-marzo de 2015.	51
9	Datos climatológicos en el trimestre abril-junio de 2015.	52
10	Concentraciones promedio y máxima de metales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en aire ambiente detectadas en la ciudad de Cananea, Sonora, en comparación con otras ciudades del estado de Sonora.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Muestreador de alto volumen (HI-VOL).	27
2	Ubicación de monitores de partículas en aire ambiente, donde se muestra el monitor Instituto Minerva, motivo del presente estudio.	30
3	Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre julio-septiembre (2014).	36
4	Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre octubre-diciembre (2014).	37
5	Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre enero-marzo (2015).	37
6	Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre abril-junio (2015).	38
7	Valor promedio mensual de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Cananea, Sonora, en comparación con otros sitios de la entidad.	39
8	Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre julio-septiembre, 2014.	42
9	Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre octubre-diciembre, 2014.	43
10	Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre enero-marzo, 2015.	44
11	Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre abril-junio, 2015.	45
12	Relación de PST con cobre ($r = 0.68$), en el trimestre julio-septiembre 2014.	54
13	Relación de PST con cobre ($r = 0.85$), en el trimestre octubre-diciembre 2014.	54
14	Relación de PST con cobre ($r = 0.78$), en el trimestre enero-marzo 2015.	55
15	Relación de PST con cobre ($r = 0.80$), en el trimestre abril-junio 2015.	55

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la calidad del aire para la ciudad de Cananea, Sonora, México, respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Cu, Cr y Mo) durante el período julio 2014 a junio 2015. Para el análisis de PST se utilizó el método de alto volumen (HI-Vol) establecido en la NOM-035-ECOL-1993. Los metales se analizaron a través del procedimiento de la determinación de plomo en partículas suspendidas, recomendada en el CFR 40 (1992), utilizando la técnica de Espectroscopia de absorción atómica. 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. Para evaluar la calidad del aire respecto a metales se utilizaron los siguientes criterios: cobre y cromo el Criterio de Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente de Ontario, Canadá. Para molibdeno la Occupational Safety Health Administration, reporta un valor límite permisible para lugares industrializados en general, de 15 mg/m³. Los resultados obtenidos en el presente estudio indican que en relación con los metales (Cu, Cr y Mo), las concentraciones detectadas se encuentran por debajo de los máximos permisibles por las instancias señaladas. Por lo tanto, las concentraciones detectadas de dichos metales no representaron peligro a la salud; sin embargo, la calidad del aire, en lo que se refiere a las concentraciones de material particulado, no cumple la Normatividad Mexicana en cuanto a los indicadores correspondientes. Se recomienda la continuidad en el monitoreo de los parámetros de calidad del aire debido a que el propósito del monitoreo es brindar los datos necesarios para que las instancias tomen decisiones que permitan mejorar la calidad del aire en beneficio de la salud de la población y el ambiente.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los contaminantes del aire han impactado de manera importante la salud de los seres humanos, lo que ha disminuido sus expectativas de vida al aumentar las afecciones en los sistemas respiratorio y cardiovascular. Los contaminantes del aire se pueden encontrar en forma gaseosa, líquida o sólida. Por lo tanto, en la atmósfera existen polvos, materia en partículas, aerosoles, vapor, neblina, humos, entre otros, excluyendo el vapor de agua (Jaramillo y col., 2009). Tan pronto como son introducidos en el aire, los contaminantes quedan sometidos al proceso general de dispersión ejercido por la atmósfera. Simultáneamente, con su transporte por el viento y su mezcla turbulenta tienen lugar una serie de reacciones químicas que transforman los contaminantes primarios en secundarios (John, 1978).

Ciertos contaminantes son muy solubles, los cuales al ser absorbidos rápidamente producen un aumento en la secreción de mucosidad, afectando la resistencia de las vías respiratorias del pulmón. Los contaminantes químicos atmosféricos más comunes son los óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, oxidantes, fotoquímicos y las partículas cuyos componentes pueden ser muy diversos (metales pesados, silicatos, sulfatos, entre otros). Estas fuentes de emisión provienen del uso de combustibles fósiles tanto como fuente de energía doméstica e industrial como en el sector del transporte. Una fuente importante de contaminación por plomo es la nafta con tetraetilo de plomo como aditivo antidetonante (Montiel, 2006).

Una buena o mala calidad del aire tiene que ver con el grado de pureza del aire ambiente. Esta pureza del aire viene determinada por una mayor o menor concentración de sustancias o elementos indeseables presentes en la atmósfera (<http://www.isciii.es/>).

El aire puro es una mezcla gaseosa compuesta por un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y un 1% de diferentes compuestos tales como el argón, el dióxido de carbono y el ozono. Se entiende por contaminación atmosférica la inclusión de otros elementos, lo cual altera las propiedades físicas y/o químicas del aire. Los efectos de la contaminación del aire varían desde la irritación transitoria en el sistema respiratorio, mucosas y ojos; hasta enfermedades agudas, malformaciones, cáncer o incluso la muerte, en función de la magnitud de los niveles de concentración y de los períodos de exposición de la población afectada (Montiel, 2006).

La contaminación atmosférica, debido a la presencia de partículas suspendidas, no solo tiene un efecto en la salud humana, sino que también puede provocar un efecto negativo sobre el medioambiente. Los efectos negativos de las partículas suspendidas en la salud humana parecen haber existido desde tiempos muy remotos. La primera evidencia documentada del

impacto de este contaminante sobre la salud se remonta al año 1800 antes de nuestra era, cuando al examinar la momia encontrada en el desierto de Gobi, conocida como Beaty de Loulan, se observó que sus pulmones estaban muy dañados. Los arqueólogos atribuyeron su muerte a problemas respiratorios causados por emisiones de combustión de madera y por partículas de arena. (<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/695/importancia.pdf>).

Las partículas, solas o en combinación con otros contaminantes, representan un peligro grave para la salud, ya que ingresan al cuerpo humano por las vías respiratorias y pueden tener un efecto tóxico ya sea por su composición o por interferir con uno o más de los mecanismos de defensa del cuerpo humano. (<http://www.bdigital.unal.edu.co/750/1/mauriciovelascogarcia.2005.pdf>).

En lo referente a los metales presentes en el aire, se catalogan como contaminantes primarios, ya que son sustancias que provienen directamente de las fuentes de emisión, y se mueven por el medio ambiente con independencia de las actividades humanas. Como resultado, los seres vivos están expuestos a ligeras concentraciones. Los metales no pueden degradarse desde el punto de vista biológico o químico en la naturaleza. Los compuestos que contienen metales pueden alterarse, pero los metales indeseables prevalecen (Stoker y Seager, 1981).

En general, el objetivo de la lucha contra la contaminación del aire consiste en alcanzar una serie de estándares de calidad de aire basados en efectos en la salud, así como en factores estéticos y económicos. No existen hasta el momento conocimientos suficientes como para poder establecer una relación inequívoca y cuantitativa entre los niveles de contaminantes atmosféricos y sus efectos en la salud y en otros factores (John, 1978). Los efectos de la contaminación pueden detectarse en la salud humana, en la vegetación, los animales o los materiales; sin embargo, con base en estas observaciones no se puede determinar, en todos los casos, de qué contaminantes se trata. Por lo tanto, es de suma importancia contar con un equipo analítico cualitativo y cuantitativo que no sólo especifique cuál es el contaminante, sino también su concentración en el ambiente. Los métodos y los instrumentos para la medición de contaminantes atmosféricos deben ser cuidadosamente seleccionados, evaluados y normalizados (Gutiérrez y col., 1997).

Debido a que en la ciudad de Cananea existe un complejo industrial minero antropogénico que induce a la presencia de contaminantes al aire ambiente y a la falta de estándares de control de estas partículas, existen detonaciones para el manejo del mineral que pudiera ser transportado a la ciudad, actividad de trituradora, gran movimiento vehicular y calles que generan gran cantidad de polvo debido a que no se cuenta con pavimentación aumentando los posibles riesgos en la salud de los ciudadanos. Por lo que se buscan soluciones que conduzcan al mejoramiento de la calidad del medio ambiente y por consiguiente, de la calidad de vida de los seres que lo habitan.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la calidad del aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, México, respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Cu, Cr, Mo), durante el periodo anual julio 2014 a junio 2015.

Objetivos Específicos

- Determinar la concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Cu, Cr, Mo) en la ciudad de Cananea, Sonora, México, durante el periodo anual julio 2014 a junio 2015.
- Determinar la calidad del aire respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Cu, Cr, Mo), en base a la normatividad mexicana vigente.
- Comparar el comportamiento espacial y temporal de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Cu, Cr, Mo) en el aire ambiente de la ciudad de Cananea, Sonora, en comparación con otras ciudades de la entidad y del país, durante un período anual.

HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Hipótesis de Trabajo

La concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales (Cu, Cr, Mo) en el aire ambiente de la ciudad de Cananea, Sonora, México, excedieron los máximos permisibles en la Normatividad Mexicana vigente dando como resultado una mala calidad del aire para un periodo anual que comprende de julio de 2014 a junio de 2015.

Hipótesis de Nulidad

La calidad del aire en la ciudad de Cananea, Sonora, México, respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Cu, Cr, Mo) para un periodo anual fue satisfactoria, cumpliendo con la Normatividad Mexicana vigente.

ANTECEDENTES

Calidad del Aire

La calidad del aire está determinada por su composición. La presencia o ausencia de varias sustancias y sus concentraciones son los principales factores determinantes de la calidad del aire. Debido a esto, la calidad del aire se expresa mediante la concentración o intensidad de contaminantes, la presencia de microorganismos o la apariencia física. Ejemplos de contaminantes que son importantes indicadores de la calidad del aire son el dióxido de azufre y las partículas de polvo y suciedad (<http://www.lenntech.es/faq-calidad-del-aire.htm>).

La administración de la calidad del aire implica el establecimiento de sistemas de monitoreo de la calidad del mismo y la utilización de herramientas matemáticas para la generación de información clara y confiable, que pueda proporcionar a la población en general. La manera más adecuada para informar a la población, de modo permanente, del nivel de calidad del aire que respira es mediante el índice de calidad del aire, el cual es un valor o un número que indica posibles efectos de la contaminación atmosférica a la salud y debe ser de fácil comprensión para el público (Gutiérrez y col., 1997).

Toda la información que se recibe del Sistema de Monitoreo Atmosférico se comunica cada hora a la población a través de los reportes del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). El IMECA consta de un algoritmo de cálculo para la obtención de los subíndices correspondientes a diferentes indicadores de la calidad del aire, este algoritmo involucra la utilización de funciones segmentadas basadas en dos puntos, los cuales se obtuvieron a partir de los criterios mexicanos de calidad del aire que especifican las concentraciones para las cuales existen evidencias de provocar daños significativos a la salud, al primer subíndice se le asigna el valor de 100 y al segundo el valor de 500; entre dos valores extremos del IMECA se tiene una serie de valores intermedios para los cuales se han detectado en estudios realizados en otros países, desde efectos en la salud en personas sensibles, hasta molestias ligeras a la población en general. Los diferentes valores del IMECA y las descripciones correspondientes se muestran en la Tabla 1 (Gutiérrez y col., 1997).

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

Interpretación del IMECA		
IMECA	Condición	Efectos en la Salud
0-100	Dentro de la norma	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades.
101-200	No satisfactoria	Molestias menores en personas sensibles; ojos, nariz y garganta.
201-300	Mala	Aumento de molestias en personas con posibles problemas respiratorios.
301-500	Muy mala	Se agudizan los síntomas anteriores en personas sensibles y quienes fuman o padecen enfermedades crónicas.

Fuente: Gutiérrez y col., (1997).

La función principal del IMECA es mantener informada a la población sobre la calidad de aire, así como observar el comportamiento de los distintos contaminantes y comparar la calidad del aire entre las diferentes zonas (www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliaire/mexicon/R-0037.pdf).

Fuentes de Contaminación del Aire

Las fuentes generadoras de contaminantes a la atmósfera pueden ser de origen natural o antropogénicas, las primeras consisten en las erupciones volcánicas y los incendios forestales que pueden representar hasta el 39.9% de las emisiones anuales de macropartículas, se reporta también entre éstas, la emisión de polen de las plantas y las tolvánicas. Por otro lado, como parte de las actividades antropogénicas se generan emisiones a la atmósfera a través de los procesos industriales que generan subproductos gaseosos, los automóviles generan gases de desecho, los procesos de manufactura, la combustión de la basura y las plantas productoras de energía generan gases y humos. En los Estados Unidos de Norteamérica se estima que se liberan más de 200 millones de toneladas de contaminantes atmosféricos al año (<http://www.tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4066/Capitulo4.pdf>).

La mayoría de las fuentes antropogénicas de partículas finas; es decir, aquellas con un diámetro aerodinámico menor de 2,5 mm, implican algún tipo de combustión. Los materiales de origen biológico (por ejemplo, la madera, el carbón y el petróleo) se queman en el aire debido a su contenido de carbono. Si una sustancia que contiene sólo compuestos de hidrocarburo se inflama con total eficiencia, producirá sólo agua y CO₂.

Este tipo de combustión requiere una razón estequiométrica de oxígeno para la combustión, lo cual es imposible en la práctica. Los fragmentos del material combustible no

quemado, los compuestos orgánicos semivolátiles que se vaporizan y que, por consiguiente, se vuelven a condensar en forma de gotitas, y la materia no combustible generalmente se emite como compuestos de humo durante y después del proceso de combustión. La mejora de la mezcla de aire y combustible y la remoción previa de compuestos volátiles pueden reducir la producción de humo. De esta manera, el combustible se prepara y quema sin humo. Cuando el suministro de oxígeno es inadecuado, la producción de CO aumenta significativamente. (<http://documents.mx/documents/modelacion-de-dispersion-espacial-de-contaminantes-del-aire-en-la-ciudad.html>).

En la mayoría de los países, los vehículos automotores, la actividad industrial y la generación de electricidad representan un gran porcentaje de la producción antropogénica de los óxidos de nitrógeno y de azufre. Estos, junto con el CO, las partículas y los COV, se describen como contaminantes primarios debido a que se producen directamente por el proceso de combustión. Las reacciones que tienen lugar en la tropósfera generan contaminantes secundarios como el clásico O₃. El NO₂ se descompone fotoquímicamente bajo la acción de la luz ultravioleta para generar NO y oxígeno atómico. Este último se mezcla con el oxígeno molecular para producir O₃. La presencia de los radicales peróxidos derivados de las reacciones atmosféricas de HC y de otros compuestos orgánicos asegura que el NO vuelva a oxidarse a NO₂ sin pérdida de O₃. Por lo tanto, se produce una serie de reacciones que generan O₃. El O₃ generalmente se produce a medida que el aire contaminado se aleja de los sitios de producción incluidas las áreas urbanas. Esto significa que el O₃ se puede producir muy lejos de las fuentes de NO₂ y HC (<http://documents.mx/documents/modelacion-de-dispersion-espacial-de-contaminantes-del-aire-en-la-ciudad.html>).

Tipos de Contaminantes del Aire

Los contaminantes del aire se pueden clasificar en dos grupos: Los contaminantes primarios o sustancias directamente vertidas en la atmósfera y que se constituyen por aerosoles (dispersores de partículas sólidas y líquidas), gases (compuestos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, monóxido de carbono y anhídrido carbónico), otras sustancias (metales pesados, sustancias minerales, compuestos halogenados, compuestos orgánicos azufrados, compuestos orgánicos halogenados); y los contaminantes secundarios o sustancias que no se vierten directamente a la atmósfera, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas de los contaminantes primarios en el aire, por ejemplo, contaminantes fotoquímicos (oxidantes como ozono y radicales libres activos) y la acidificación (lluvia ácida) a

partir de los óxidos de azufre o nitrógeno (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4066/Capitulo4.pdf>).

Partículas

Son una mezcla de partículas sólidas y líquidas (vapor) que se encuentran en el aire emitidas directamente desde la fuente (formación directa) o bien son formadas por la condensación de contaminantes gaseosos (formación indirecta). Forman una compleja mezcla de partículas sólidas y vapores con sustancias orgánicas e inorgánicas en suspensión, incluyendo frecuentemente sustancias ácidas como sulfatos y nitratos. Todos estos compuestos en el aire tienen la capacidad de ser absorbidos vía nariz/ boca y pasar por el tracto respiratorio, por lo que afectan a más personas que cualquier otro contaminante (<http://www.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2504/tesisUPV2792.pdf>).

Además, es conocido que el potencial de daños a la salud a causa de las partículas suspendidas está directamente relacionado con el tamaño de éstas. Entre más pequeño sea su diámetro aerodinámico, más dañinas están consideradas, ya que penetran con mayor facilidad por el tracto respiratorio llegando a los pulmones, donde permanecen depositadas en los alvéolos pulmonares.

Existen estudios que muestran la relación entre el incremento de muertes o asistencias al médico por problemas respiratorios y cardiovasculares cuando los niveles de partículas suspendidas son altos (<http://www.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2504/tesisUPV2792.pdf>).

Las Partículas Suspendidas Totales (PST) se dividen de acuerdo a su tamaño en partículas menores a 10 μm (PM10) y las menores a 2.5 μm (PM2.5), estas últimas son las de mayor riesgo para la salud humana. La atención sobre las PST se ha concentrado principalmente en las partículas PM10, que pueden ser inhaladas y penetrar con facilidad al sistema respiratorio, causando efectos adversos a la salud de las personas. No obstante que las PM2.5 al ser inhaladas penetran con mayor facilidad al sistema respiratorio humano. Es así como la Norma Oficial Mexicana NOM- 025-SSA1-1993 establece el valor de 210, 120 y 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como límite máximo permisible promedio en 24 horas de PST, PM10 y PM2.5, respectivamente. Esta norma modificó los límites permisibles antes planteados y se agregó la concentración máxima permisible de PM2.5 (DOF, 1993), de la cual se deduce que el tamaño y la composición de la materia particulada suspendida son de gran relevancia en una gran variedad de procesos, lo que ha motivado que actualmente se desarrollen a nivel mundial diversas investigaciones con el objeto de proporcionar información sobre su impacto en los ecosistemas (Alfaro y Barajas, 2008). La

última actualización en México al respecto de calidad de aire ambiente en relación a material particulado se establece en la NOM- 025-SSA1-2014.

Metales

Los metales generalmente son sólidos a temperatura ambiente y son brillantes; además son buenos conductores de calor y de la electricidad. La mayoría son dúctiles y maleables que pueden formar láminas delgadas y alambres (Gutiérrez y col., 1997). Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. En general esto puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares.

Tanto las fuentes naturales como antropogénicas pueden contribuir de manera importante en la emisión de elementos metálicos a la atmósfera. Cabe señalar que, al comparar las emisiones globales, la emisión de elementos como selenio, mercurio y manganeso se realizan en su mayoría por fuentes naturales; sin embargo, en el plano regional las fuentes antropogénicas pueden contribuir de manera importante y estos metales se convierten en contaminantes en la escala local (<http://medioambienteperiodismo.blogspot.mx/2009/11/contaminacion-por-metales-pesados-y-sus.html>).

Una forma opcional de nombrar a este grupo es como “elementos tóxicos”, los cuales, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), incluyen a los siguientes elementos: Arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo. (www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales).

Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire

Los efectos causados por la contaminación del aire son muchos y varía dependiendo de cuál es la fuente del contaminante que hay en el aire con mayor concentración, puede ser desde bloqueo de las vías respiratorias hasta alergias crónicas. La WHO (2000), 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.

Partículas

La exposición a los contaminantes atmosféricos como el material particulado, se asocia con diferentes daños a la salud humana y la magnitud de los efectos depende de las concentraciones que se encuentran en el aire, de la dosis que se inhala, del tiempo y la frecuencia de exposición, así como de las características de la población expuesta. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014. Las vías respiratorias son las más afectadas en los seres humanos y animales. Estudios sobre síntomas diarios de pacientes con enfermedades crónicas de obstrucción pulmonar, muestran una relación entre el grado de la enfermedad y las concentraciones de contaminantes del aire y partículas contaminantes. Los pacientes asmáticos parecen ser más susceptibles a picos de concentración de la contaminación del aire a corto plazo (<http://www.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2504/tesisUPV2792.pdf>).

Metales

Cobre. Inhalación de humos de cobre metálico causa irritación del tracto respiratorio superior, congestión de membranas mucosas nasales, ulceración y perforación del tabique nasal, y congestión de la faringe. Inhalación de humos de cobre pueden producir fiebre de humos metálicos (alta temperatura, sabor metálico, náusea, tos, debilidad general, dolor muscular, y agotamiento). Ingestión: cobre causa náusea, vómito, dolor abdominal, sabor metálico, y diarrea. En grandes dosis puede causar ulceración estomacal e intestinal, ictericia, daño en riñones e hígado, y causa irritación a la piel incluyen enrojecimiento, comezón y dolor. Exposición al polvo de cobre puede causar decoloración de la piel a negro-verdoso, las pequeñas partículas de cobre en los ojos pueden causar irritación, decoloración, y daño visual. Puede resultar por la inhalación de humos de operaciones de fundición de cobre. Sin embargo, este tipo de enfermedades no es muy común debido a las altas temperaturas necesarias para producir humos de cobre (http://www.quantyka.com.mx/catalogo/HDSM/Puros/cobre_polvo.htm).

Cromo. 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). La inhalación de los humos puede causar fiebre de humo- metal, la cual se caracteriza por síntomas como gripe con sabor metálico, fiebre, escalofríos, tos, debilidad, dolor de pecho, dolor de músculos y aumento en el conteo de glóbulos blancos en la sangre, puede causar asma y respiración acortada, pérdida de peso, y neumoconiosis. (<http://www.quantyka.com.mx/catalogo/HDSM/Puros/cromo.htm>).

Molibdeno. Cuando es inhalado como polvo o humo, puede causar neumoconiosis benigna y puede producir edema pulmonar retardado. Además de anomalías en la sangre, y cuando está en contacto con los ojos, causa lagrimación (lagrimeo), visión borrosa, y fotofobia. También provoca conjuntivitis química y daño en la córnea. Su ingestión accidental en exceso puede causar anemia, leucopenia, y trombocitopenia. Además, dolor de cabeza, fiebre, náusea, dolor abdominal, dolor de músculos y orina con sangre. Basado en experimentación animal, el molibdeno y sus compuestos son altamente tóxicos. Se ha informado de alguna evidencia de disfunción hepática con hiperbilirubinemia en trabajadores crónicamente expuestos en una planta soviética de molibdeno y cobre. Además, se han encontrado signos de gota en trabajadores de fábricas y entre los habitantes de zonas de Armenia, ricas en molibdeno. Las características principales fueron dolores de la articulación de las rodillas, manos, pies, deformidades en las articulaciones, eritemas, y edema de las zonas de articulación (http://www.quantyka.com.mx/catalogo/HDSM/Puros/molibdeno_polvo.htm).

Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire

Las normas de calidad del aire, fijan valores máximos permisibles de concentración de los contaminantes comúnmente presentes en las áreas urbanas. Cuando se elaboraron las normas, en México no existían los recursos ni la infraestructura para realizar estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición, ni en animales, ni en seres humanos, por lo que las normas se establecieron fundamentalmente tomando en cuenta los criterios y estándares adoptados en otros países del mundo. Actualmente la Secretaría de Salud realiza estudios epidemiológicos que

valoran la relación dosis/respuesta, entre los diferentes contaminantes y la salud de la población en algunas zonas del país (<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/233/cap4.html>).

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

Valores Máximos Permisibles para Partículas Suspendidas Totales (PST)

La Comunidad Europea ha establecido en la Directiva 1999/30/CE, entre otros, el límite de partículas en el aire ambiente, el cual queda definido como $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 en 24 horas y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 en 1 año. En Estados Unidos de América (EUA), los máximos permisibles han sido publicados como estándares nacionales de calidad del aire o NAAQS (National Ambient Air Quality Standards) por la EPA (1990), y se tiene determinado un máximo permisible de concentración de partículas menores a 10 micras (PM10) de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas y una concentración de como media aritmética anual. (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4066/Capitulo4.pdf>).

En México, los máximos permisibles de calidad del aire para Partículas Suspendidas Totales (PST), partículas menores de 10 micras (PM10) y partículas menores a 2.5 micras (PM2.5) han sido publicados en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005), siendo dicho valor para PST de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas en un período de un año; mientras que para PM10 los valores son de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas en un período de un año y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual, y para PM2.5 los valores son de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas en un período de un año y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual.

Valores Máximos Permisibles para Metales

Cobre. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU. (OSHA, 2012) ha establecido un límite para vapores de cobre en el aire de 0.1 mg/m³ y 1 mg/m³ para polvos de cobre. La Agencia Ambiental Europea tiene en su base de datos (STAR) registrado el estándar de calidad de aire ambiente para cobre con un valor límite de 0.002 µg/m³ según la regulación establecida en el documento GOST 17.2.3.01-86 de protección a la naturaleza, medio ambiente-regulaciones de control de calidad del aire para áreas pobladas de 1986. En México no se cuenta con normatividad de calidad del aire respecto de cobre (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4066/Capitulo4.pdf>).

Cromo. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, 2012), regula la cantidad de cromo en el aire del trabajo. Los límites de exposición ocupacional durante una jornada de 8 horas diarias, 40 horas a la semana son 500 µg de cromo/m³ para sales solubles de cromo (III) y cromo (II), 1,000 µg de cromo/m³ cromo metálico (0) y sales insolubles. Los niveles de trióxido de cromo (ácido crómico) y otros compuestos de cromo (VI) en el aire del trabajo no deben exceder 52 µg de cromo (VI)/m³ durante ningún período de tiempo. Para el cromo (0), cromo (II) y cromo (III), el NIOSH, 2012 recomienda un límite de exposición de 500 µg de cromo/m³ durante una jornada de 10 horas diarias, 40 horas semanales. Esta organización considera a todos los compuestos de cromo (VI) (incluso al ácido crómico) como sustancias son potencialmente carcinogénicas y recomienda un límite de exposición de 1 µg de cromo (VI)/m³ durante una jornada diaria de 10 horas, 40 horas semanales. (http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf).

Molibdeno. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, 2012), reporta un valor límite permisible para lugares industrializados en general, de 15 mg/m³. En México, actualmente no existe una Norma para Molibdeno en aire ambiente.

ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación Geográfica

El presente trabajo se realizó en la ciudad de Cananea, Sonora, México, considerando el análisis de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales (Cu, Cr, Mo) obtenidos del aire ambiente, en la cual se opera un equipo de muestreo de alto volumen (Hi-Vol) de la Red Estatal de Información e Infraestructura sobre Calidad del Aire (Figura 1).

Caso de estudio: Cananea, Sonora

De acuerdo con los datos de INEGI (2005), El municipio de Cananea se localiza entre los paralelos 30° 42' y 31° 16' de latitud Norte; los meridianos 109° 51' y 110° 33' de longitud oeste; altitud entre 800 y 2600 m. Colinda al Norte con los municipios de Santa Cruz y Naco; al Este con los municipios de Naco, Fronteras y Bacoachi; al Sur con los municipios de Bacoachi, Arizpe e Ímuris; al Oeste con los municipios de Ímuris y Santa Cruz. Ocupa el 1.29% de la superficie del estado de Sonora. Cuenta con 155 localidades y una población total de 32 157 habitantes.

Climatología. El municipio de Cananea cuenta con un clima semicálido, subhúmedo con una temperatura media máxima mensual de 23.5° C en los meses de junio a septiembre, y con una temperatura media mínima mensual de 7.4° C en diciembre y enero; la temperatura media anual es de 15.3°C. El periodo de lluvias se presenta en verano en los meses de julio a septiembre, contándose con precipitación media anual de 545 milímetros. En los meses de febrero, marzo y abril se llegan a presentar frecuentemente heladas, granizadas y en ocasiones nevadas. En invierno las lluvias son de menor intensidad, pero de mayor duración llamadas equipatas, cayendo también en forma de nieve (<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26019a.html>).

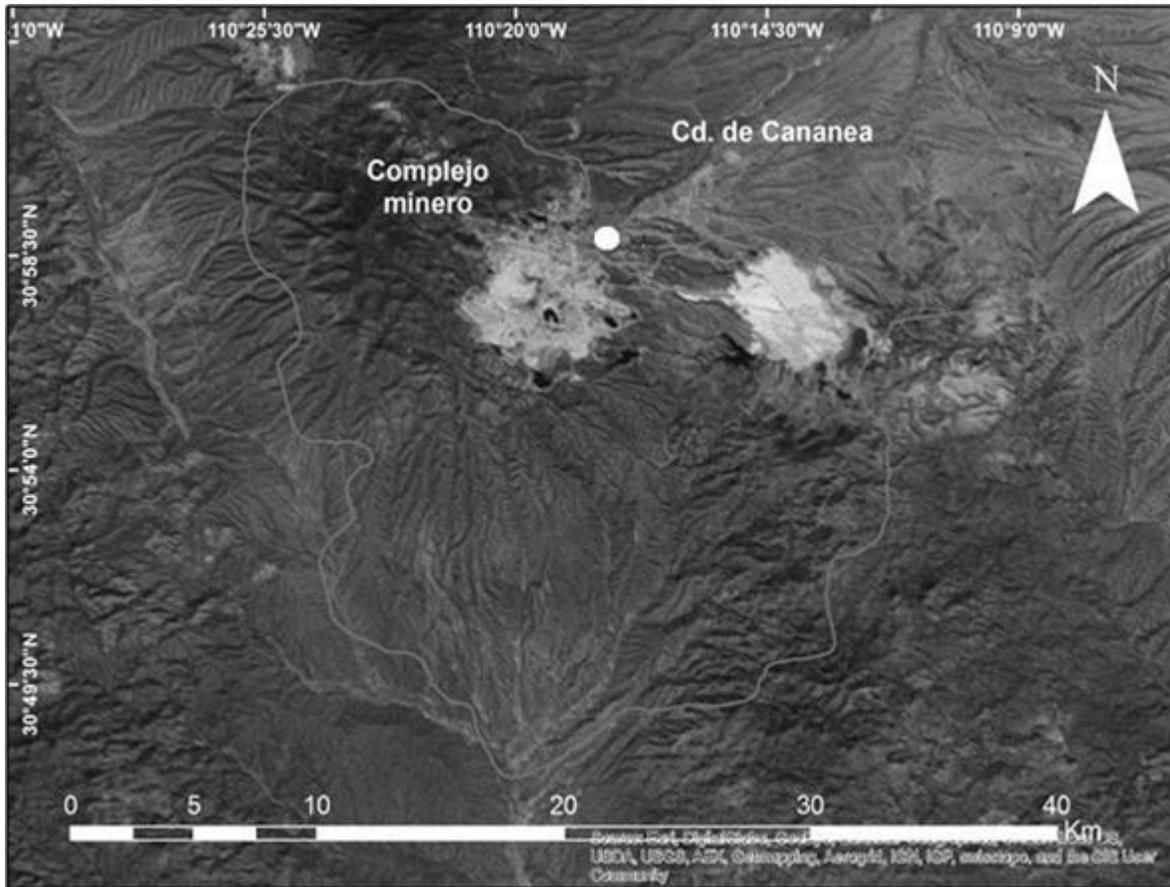


Figura 1. Localización del área de estudio y ubicación del monitor Instituto Minerva en el análisis de partículas en aire ambiente, en la ciudad de Cananea, Sonora, México.

Ecosistemas. Los principales ecosistemas son la flora y la fauna. La vegetación de pastizal es predominante en casi la totalidad de la extensión territorial, en donde existe también una gran parte del territorio formado por bosque de encino y en las partes más altas, en las limitaciones con Santa Cruz e Imuris, existen pequeñas áreas de bosque de pino-encino. Son escasas las áreas para agricultura de riego.

En lo referente a la fauna, la componen básicamente las siguientes especies: sapo, salamandra, rana verde, tortuga de agua, camaleón, cachora, víbora sorda, víbora de cascabel, venado cola blanca, puma, lince, coyote, jaguar, jabalí, liebre, conejo, ardilla, entre otros (<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26019a.html>).

Características y Uso de Suelo. En el municipio de Cananea se localizan los siguientes tipos de suelo:

- a. Feozem: se localiza en el noreste del municipio, presenta fase física pedregosa, tiene una cara superficial obscura, suave y rica en materias orgánicas y nutrientes.
- b. Litosol: se localiza en la parte central y se extiende hacia el sureste del municipio; presenta diversos tipos de vegetación que se encuentran en mayor o menor proporción en laderas, barrancas, lomeríos y algunos terrenos planos.
- c. Regosol: se localiza en el noroeste presentando fase física pedregosa. (<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26019a.html>).

Población. Según datos del INEGI (2010), El municipio de Cananea cuenta con una población de 32,936 habitantes, donde 16,415 son hombres y 16,521 mujeres. (<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/Son/Poblacion/default.aspx?tema=ME&e=26>).

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedimiento de Muestreo

La Red Estatal de Infraestructura e Información sobre Calidad del Aire (por sus siglas, REICA) estableció una frecuencia de muestreo cada 6 días en las estaciones de la red, con el objetivo de analizar y evaluar la calidad del aire respecto de PST, las cuales consideran (cada una) un máximo de 60 muestras en el año. En el presente estudio se utilizó la información y filtros de dichos muestreos realizados durante el período julio 2014 a junio 2015, para el análisis de PST y metales (Cu, Cr, Mo).

En una de las 5 estaciones de la red, denominada Instituto Minerva, ubicada en Cananea, Sonora, México; se analizaron metales (Cu, Cr, Mo). Adicionalmente se compararon los resultados con los existentes en las ciudades de Agua Prieta y Hermosillo, y otras ciudades de Sonora. Para este muestreo se utilizaron los filtros del monitor de partículas suspendidas totales localizado en el Instituto Minerva (Figura 2).

Para la ubicación de los cinco monitores se optó por el método de muestreo orientado a fuentes con base en lo establecido por Espinosa-Rubio (2007). Éste aplica cuando el objetivo sea estudiar partículas y contaminantes en aire ambiente de fuentes de emisión específicas, cuando el estudio se enfoque a recolectar muestras de alguna localidad previamente seleccionada o cuando se conozcan las fuentes de emisión en concordancia con el conocimiento de las principales direcciones de flujo de aire ambiente NOM-035-ECOL- 1993 (DOF, 1993).

Al respecto de la altura de instalación de los monitores, ésta puede ser de 2 a 15 metros en zonas urbanas (EPA, 1999). Para ello deben ser considerados otros criterios como una distancia mínima de 20 m de árboles, no presencia de edificios o cerros cercanos, no cerca de hornos, chimeneas o puntos de incineración de materiales orgánicos o inorgánicos.

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 h (Figura 2). La velocidad de flujo del aire ambiente y la geometría del muestreador son tales que favorecen la recolección de partículas hasta de 50 micrómetros (μm) de diámetro aerodinámico, dependiendo de la velocidad del viento y su dirección. Los filtros usados tienen una eficiencia de recolección mínima del 99 % para partículas de 0.3 μm . Los filtros pesados antes y después del muestreo son los utilizados para la determinación de concentración de PST y metales pesados.

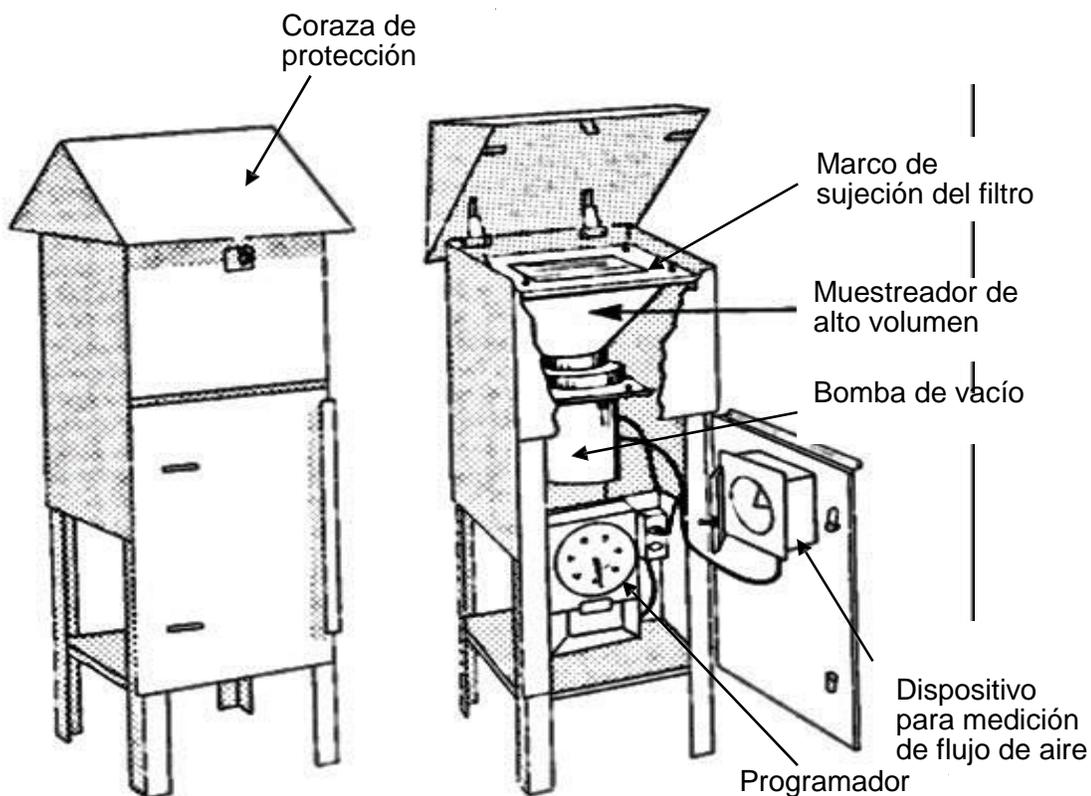


Figura 2. Muestreador de alto volumen (HI-VOL).

Análisis de Laboratorio

El material utilizado en el laboratorio se sometió a un estricto control para evitar una posible contaminación. 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.

Partículas Suspendidas Totales (PST)

Para la determinación de las Partículas Suspendidas Totales (PST), en la atmósfera, se utilizó el método de referencia de alto volumen (Hi-Vol), recomendado 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 pesó 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 determinó a partir del flujo de aire ambiente medido y del tiempo de muestreo.

La concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente se calculó dividiendo la masa de las partículas recolectadas entre el volumen de aire muestreado y se expresó en microgramos por metro cúbico patrón ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{ptn}$), corregidos a las condiciones de referencia.

Metales Pesados Totales (Cu, Cr y Mo)

La metodología para la determinación de metales pesados (Cu, Cr, y Mo) en aire ambiente, es la establecida bajo el procedimiento para la determinación de plomo en partículas suspendidas, establecida en el CFR 40 (1992), cuyo principio se basa en coleccionar las partículas suspendidas en el aire en un filtro de fibra de vidrio, utilizando un muestreador de alto volumen. Una vez secados los filtros y realizados los cálculos para la determinación de la concentración de PST, se realizó la determinación de metales en los filtros limpios (blancos) y en los expuestos (muestras). Los metales del material particulado muestreado son solubilizados por extracción con una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico para posteriormente analizarse por la técnica de espectrometría de absorción atómica por flama utilizando un equipo de absorción atómica PERKIN-ELMER, Modelo AAnalyst 400. La concentración de cada metal se realizó a través de la siguiente ecuación:

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

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

100ml = Volumen de muestra analizada.

Control de Calidad en el Análisis de las Muestras de Filtros

En el presente estudio 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 recomendada en la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-115-SCFI-2001) y la Environmental Protection Agency (EPA). El procedimiento de control de calidad consistió en los siguientes puntos:

1. Limpieza del material de laboratorio y equipos de muestreo. El material utilizado para la preparación (corte del filtro), descomposición y análisis de los filtros (incluyendo el material utilizado en el laboratorio), se sometió a un control estricto para evitar una posible contaminación, principalmente de metales. Para esto, se utilizó la metodología recomendada por la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-115-SCFI-2001). El procedimiento de limpieza consiste en someter el material de laboratorio 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. En la Tabla 1a (Apéndice 1), se pueden apreciar los resultados de los blancos de digestión por muestreo para cada uno de los metales analizados. Se puede apreciar valores no detectables (menor al límite de detección) en la mayor parte de los blancos de digestión. Esto indica que no se presentó contaminación externa por los ácidos utilizados en la digestión de las muestras ni por el material de cristalería utilizado.

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 3 estándares para la determinación de metales, obteniéndose un coeficiente de correlación $r > 0.9990$. Para estimar si los puntos experimentales se ajustaban bien a una línea recta se calculó el coeficiente de correlación (r), el cual mide el grado de asociación entre dos variables (Miller y Miller, 1993).

Indicadores de Calidad de los Datos

Precisión

La precisión se define como el grado de concordancia entre los análisis múltiples de una muestra dada y se evalúa a partir del análisis de réplicas de análisis repetidas de una muestra o estándar (CNA, 1993). Para muestras duplicadas, la precisión se calcula como la diferencia porcentual relativa DPR de la siguiente manera (EPA, 2000):

$$\text{Precisión} = \frac{(a-b)}{\frac{(a+b)}{2}} * 100$$

Donde:

a = Valor mayor del análisis de los dos duplicados

b = Valor menor del análisis de los dos duplicados

La precisión para muestras de campo duplicadas se fijó para un valor menor o igual al 50 % para los parámetros analizados en sedimento (EPA, 2000).

Los resultados obtenidos en lo que respecta a las muestras de sedimento duplicadas colectadas en el campo, el 100 % del total de los valores de precisión obtenidos para metales, expresado como Desviación Porcentual Relativa (% DPR) estuvieron dentro del 50 % recomendado por la EPA (2000) (Apéndice 1; Tabla 1b). Lo anterior indica que la precisión obtenida en el muestreo y análisis de metales fue aceptable.

Exactitud

La exactitud es una medida de qué tan cercanos o parecidos son los valores obtenidos de un valor real o establecido. Mientras más similares sean ambos valores, mayor es la exactitud. Los resultados obtenidos se expresan como porcentaje de recuperación:

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{b}{a} * 100$$

Donde:

a = Concentración teórica adicionada a la muestra

b = Concentración medida en la muestra

Se estableció un límite de aceptación de la recuperación dentro del rango de 80 a 115% para los parámetros contemplados en el sedimento, como lo recomienda la EPA (2000) y la Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-051-SCFI-2001. En el presente trabajo, para verificar la Exactitud de la técnica de descomposición de las muestras de sedimento, así como el rendimiento instrumental, se utilizaron muestras fortificadas con concentraciones conocidas de cada uno de los metales contemplados en el presente estudio. Las muestras fortificadas fueron analizadas con el mismo procedimiento de digestión utilizado en las muestras de los filtros. Los datos se reportan en el Apéndice 1 (Tabla 1c), en donde se puede apreciar que los resultados obtenidos se encuentran en el rango de 85 a 115%. Por lo tanto, se consideran aceptables, ya que indican que el procedimiento de digestión de las muestras (filtros) y el rendimiento instrumental (equipo de absorción atómica) fueron las óptimas.

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):

$$Y = YB + 3SB$$

Los valores del límite de detección del instrumento (absorción Atómica) para cada uno de los metales fueron los siguientes: Cu (0.02 µg/ml), Cr (0.02 µg/ml) y Mo (0.02 µg/ml).

Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire, Utilizados en la Investigación

Con la finalidad de evaluar la calidad del aire respecto de PST, los resultados obtenidos se compararon 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) Cobre: Se señalan los criterios establecidos por la Ontario Ministry of the Environment (MOE) que fijan un valor para Cobre de 50 µg/m³ en 24 hrs.
- b) Cromo: Se señalan los criterios establecidos en la Ontario Ministry of the Environment (MOE) en donde se provee una lista de criterios de calidad del aire ambiente (AAQCs), con valores máximos permisibles de Cromo en aire que fijan un valor de 0.5 µg/m³ para 24 hrs.
- c) Molibdeno: Se señalan los criterios establecidos por la Ontario Ministry of the Environment (MOE) que fijan un valor para Molibdeno de 120 µg/m³ en 24 hrs.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Partículas Suspensas Totales (PST)

En las Figuras de la 3 a la 6, se reportan los resultados de PST para los cuatro trimestres que contempla la presente investigación durante el período julio 2014 a junio 2015. Para el trimestre julio-septiembre de 2014 no se reporta ninguna muestra con valores fuera de norma, es decir por arriba de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el trimestre de octubre-diciembre del mismo año, ocurre una muestra con valor de PST por arriba del valor normado con $254 \mu\text{g}/\text{m}^3$, particularmente para la muestra del día 28 de noviembre de 2014. Para el trimestre de enero-marzo de 2015, ocurren dos fechas en las que el valor permisible es superado: 17 de enero y 24 de marzo. En el último trimestre de abril-junio de 2015 no se reporta ninguna muestra con valores por arriba de la norma.

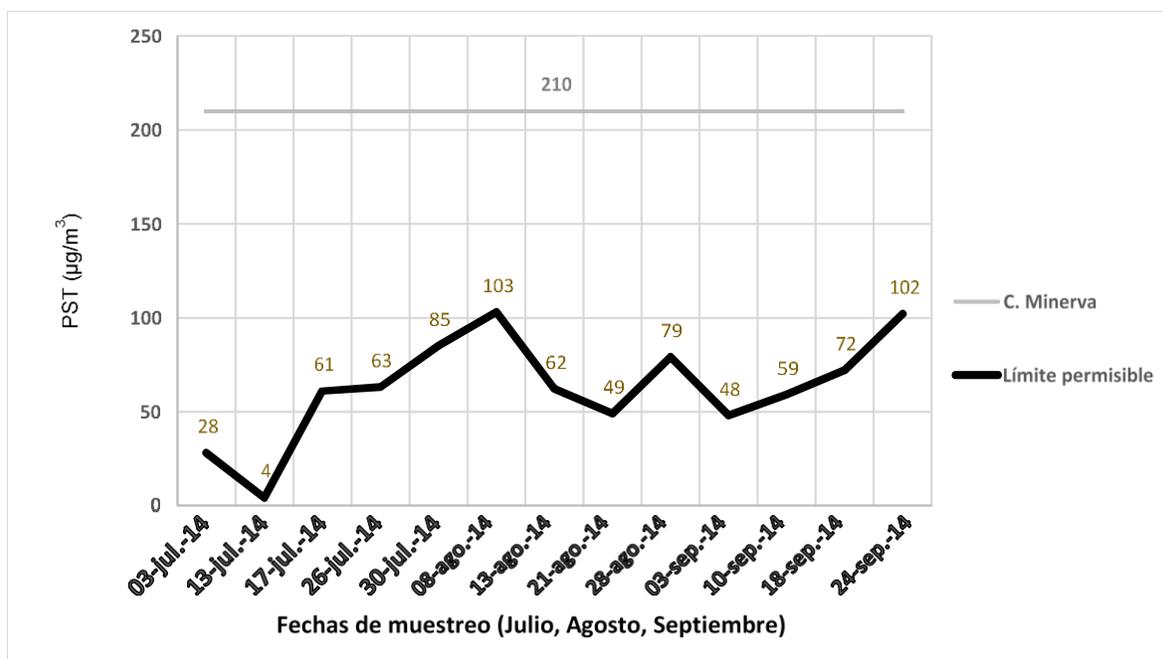


Figura 3. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, en el trimestre julio-septiembre 2014. Valor máximo permisible de PST = $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (NOM- 025- SSA1-1993).

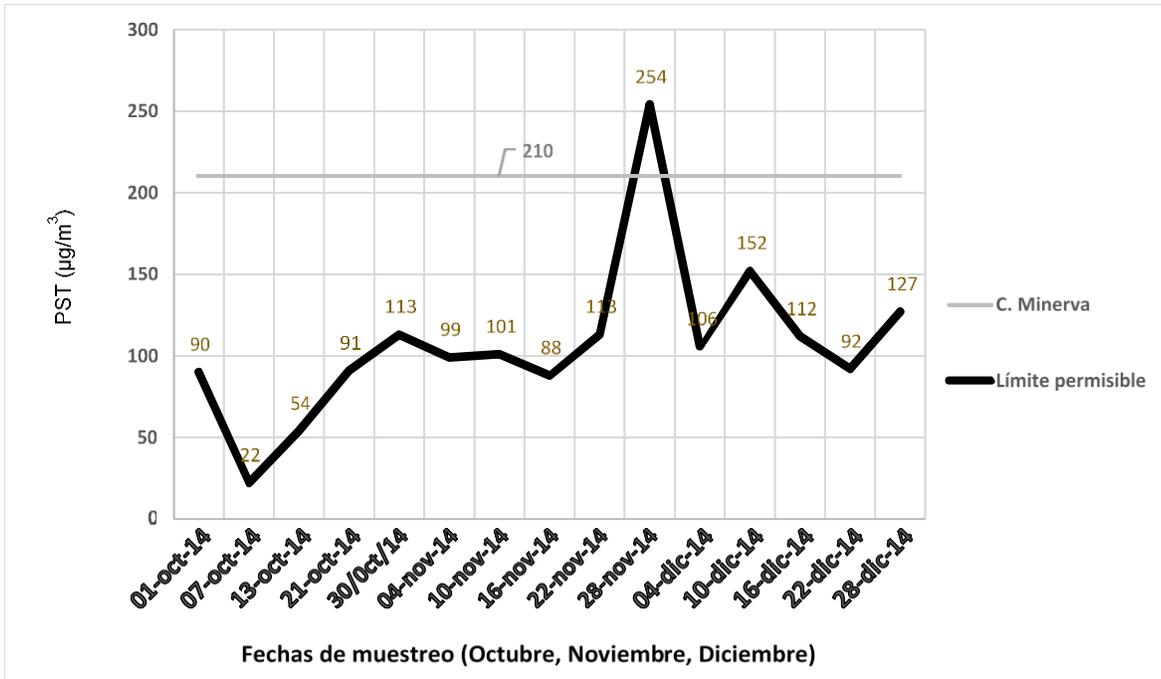


Figura 4. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, en el trimestre octubre-diciembre 2014.

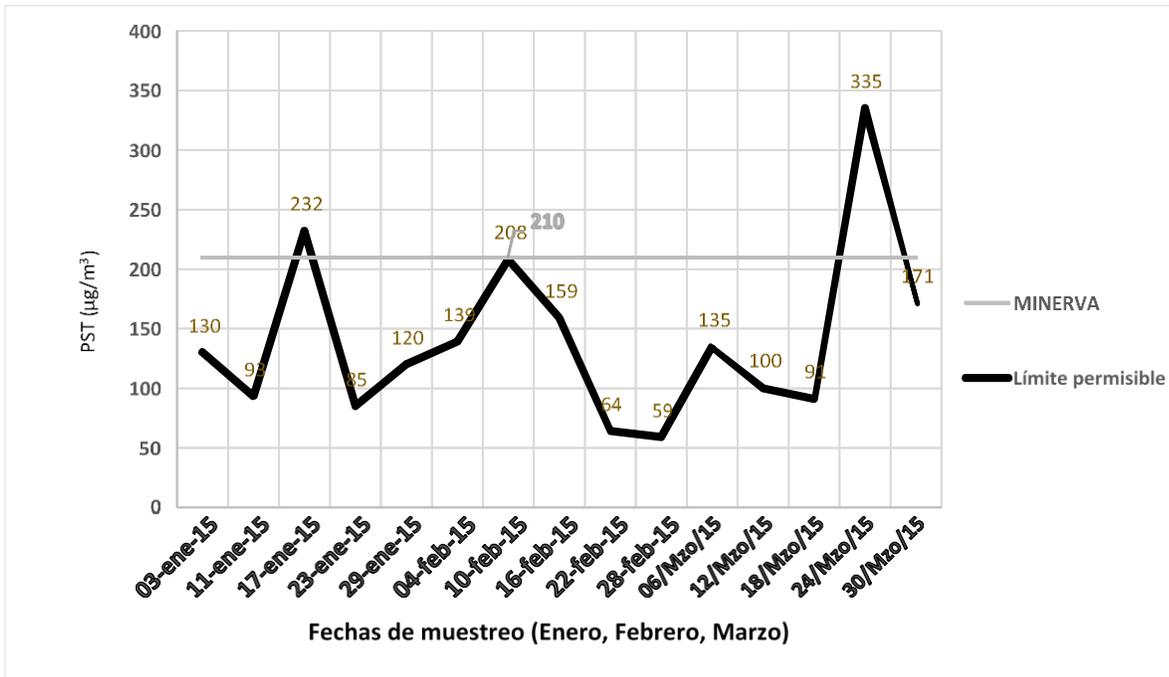


Figura 5. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, en el trimestre enero- marzo 2015.

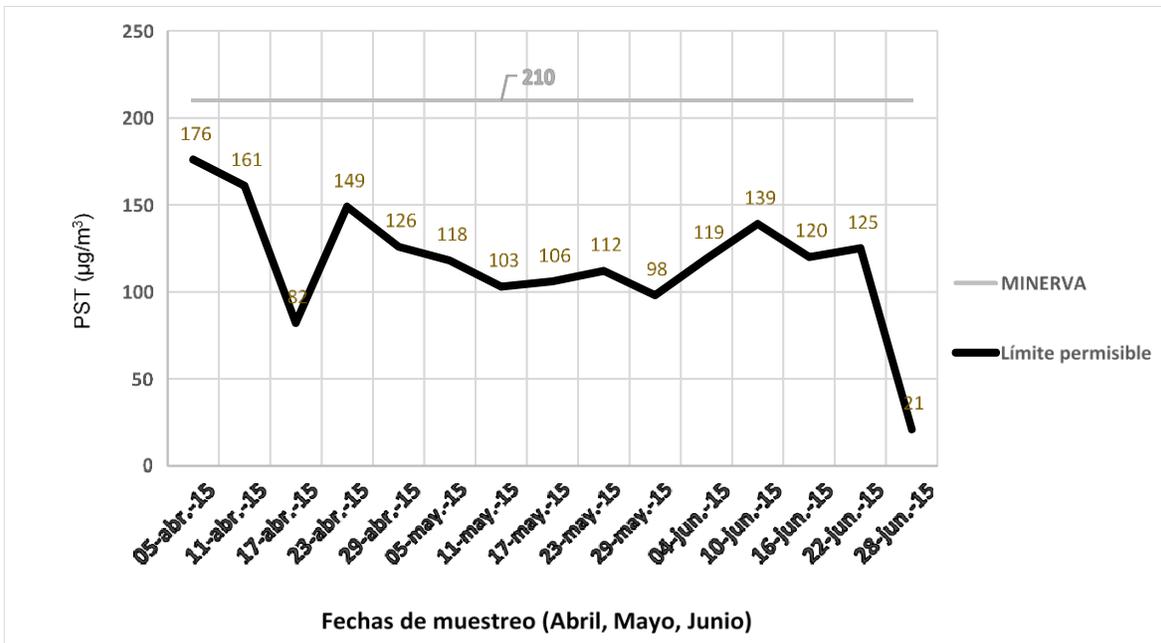


Figura 6. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, en el trimestre abril-junio 2015.

Promedio por 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 diarios de cada mes de un periodo de tiempo, y permite asociar la concentración de los contaminantes con la intensidad de las actividades antropogénicas o patrones meteorológicos.

En la Figura 7, se presenta el comportamiento de la concentración de PST en diferentes ciudades de la entidad referida a lo promediado en los meses del año estudiado. Es de observarse que el promedio mensual en el presente estudio (julio de 2014 a junio de 2015) en ninguno de los casos promedia arriba del valor normado como ocurre para todas las ciudades de la entidad reportadas en este estudio, excepto Guaymas cuyo promedio mensual en todo el año, al igual que en Cananea, se encuentra por abajo del valor normado ($210 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Como dato importante el presente estudio en Cananea, es el que registró los muestreos necesarios para lograr resultados de promedios en todos los meses del año.

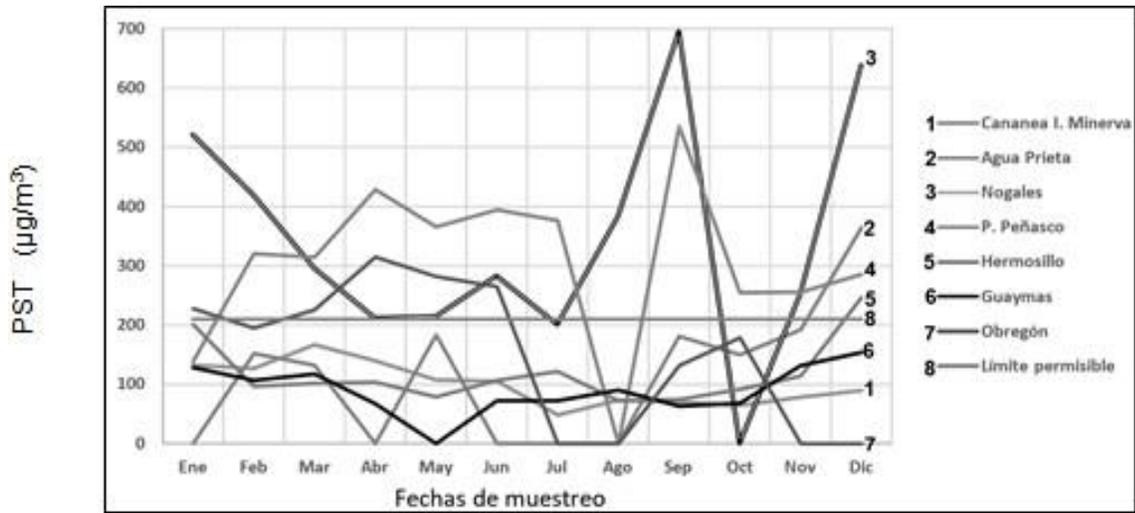


Figura 7. Valor promedio mensual de la concentración PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Cananea, Sonora, en comparación con otras ciudades de la entidad.

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 su observancia se requiere 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 que se permite rebasar el valor límite de PST es del 2 % de las concentraciones diarias en un año (percentil 98), establecido en la NOM-025-SSA1-1993. Para esto se ordenan los valores diarios de concentración obtenidos durante un año en una serie ascendente, en la que cada valor es igual o mayor que el valor anterior. Se multiplica el número total de valores (58 para este estudio) por 0.98. Se toma la parte entera del valor resultante (56 en este caso). Finalmente, el valor del percentil es $56 + 1 = 57$. Para el caso particular, el valor del percentil 98 es la concentración del dato 57 en orden ascendente de los resultados en el estudio, con $254 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabla 2).

Tabla 2. Determinación del percentil 98 para concentración de PST en la ciudad de Cananea, y su comparación con las ciudades de Nogales y Hermosillo, Sonora, México.

Ciudad	Concentración correspondiente al percentil 98 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valor máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cumplimiento con la norma
Nogales	794	210	No
Hermosillo	305	210	No
Cananea	254	210	No

Se observa que el percentil 98 en esta investigación para la ciudad de Cananea es de $254 \mu\text{g}/\text{m}^3$; este valor, aunque no cumple con la NOM-025-SSA1-1993, es mucho menor a lo registrado para la ciudad de Hermosillo ($305 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y más aún respecto para la ciudad de Nogales, que reporta como percentil 98; $794 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta comparación se hace específicamente respecto a las ciudades de Nogales y Hermosillo, debido a que son las únicas de la entidad cuyos muestreos en un ciclo anual cumplen con el criterio de cobertura de datos, en base a lo que especifica la NOM-025-SSA1-1993.

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). Se define 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 base a lo anterior, se observa que el 52 % de los días monitoreados tienen buena calidad del aire, y 41 % regular calidad. Sólo el 5 % posee mala calidad con base a este indicador. Con esto, la ciudad de Cananea junto con las ciudades de Hermosillo y Guaymas sobresalen, como las ciudades de Sonora que mejor calidad del aire tienen en lo que a PST se refiere (Tabla 3).

Tabla 3. Porcentaje al año de días con buena, regular y mala calidad del aire respecto a PST en siete ciudades de Sonora, México.

CIUDAD	Muestras válidas en el año	% de buena calidad del aire	% de regular calidad del aire	% de mala calidad del aire
Cananea	58	52	41	5
Agua Prieta	20	15	55	30
Nogales	49	2	20	78
P. Peñasco	38	0	24	76
Hermosillo	50	60	34	6
Guaymas	32	59	37	3
Obregón	34	3	35	62

Comportamiento de las Partículas Suspendidas Totales (PST) Respecto a Datos Climatológicos

En las Figuras de la 8 a la 11, dan referencia de la dirección preferencial de los vientos en el sitio en estudio. Particularmente para el trimestre julio-septiembre de 2014, se observa que la dirección de procedencia es preferencialmente del SSW, seguida de WNW-NW y una tercera dirección en la misma proporción NNE-NE y SE. De acuerdo al análisis de esta información se basó en un total de 8754 datos.

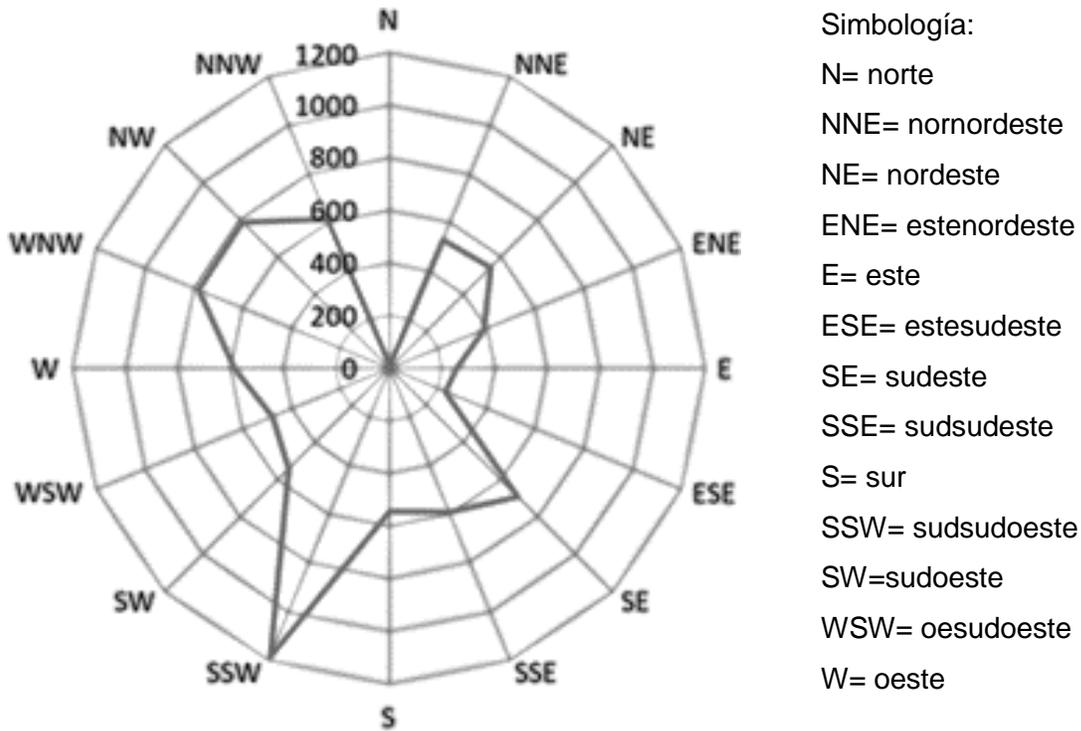
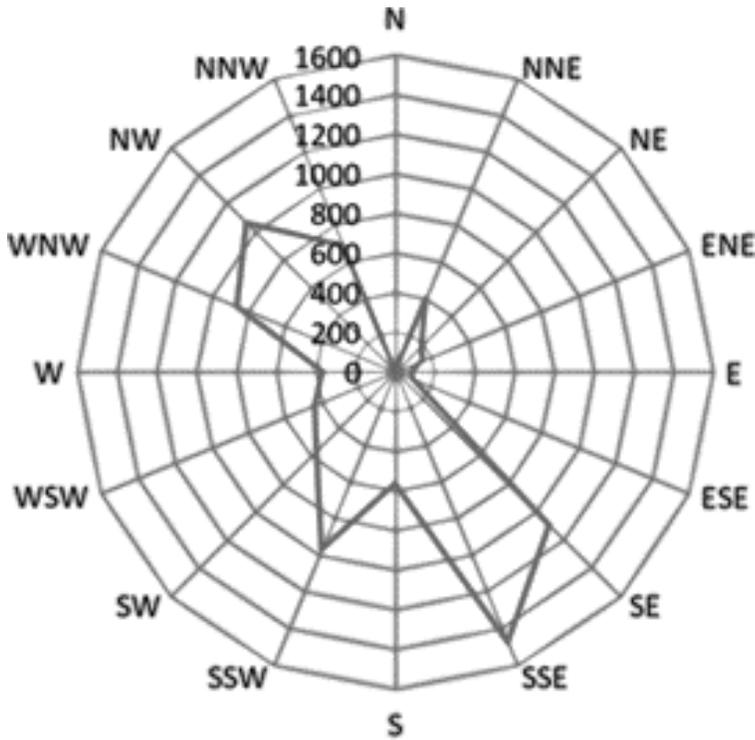


Figura 8. Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre julio-septiembre 2014.

Para este mismo trimestre, las velocidades de viento promedio que se encontraron son del orden de 29.05 m/s en un 29.05 %, seguidas en un 16.65 % las de rangos de 11.5 a 15 m/s, y las de 7.9 a 11.4 m/s en un 25.26 %. Para el trimestre octubre-diciembre de 2014, se observa una dirección preferencial de procedencia del SSE, seguida de una NW y una tercera dirección SSW. El análisis de esta información se basó en un total de 8999 datos. Las velocidades de viento promedio para este trimestre son mayores a 15.1m/s, seguidas en un 16.83% las de rangos de 11.5 a 15 m/s.

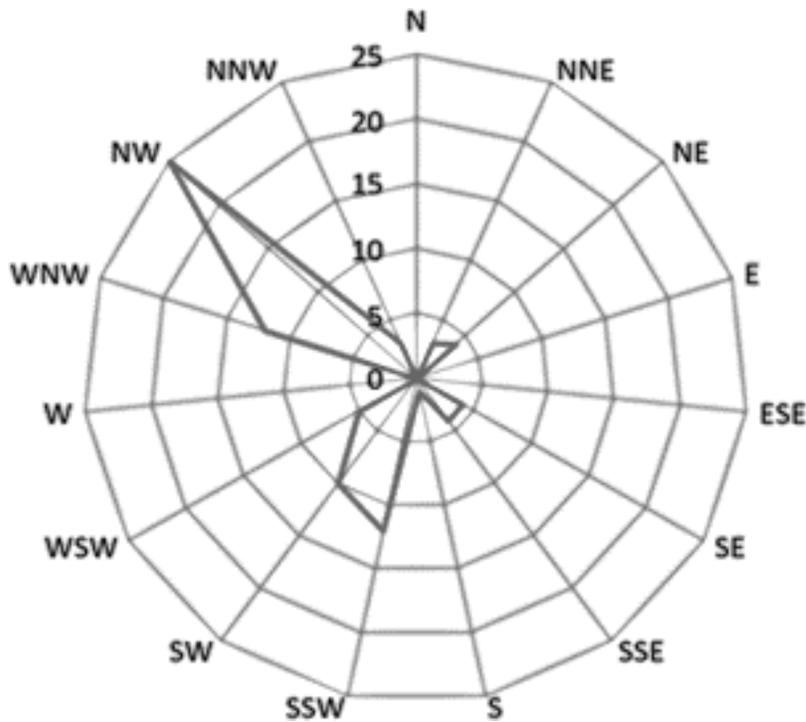


Simbología:

- N= norte
- NNE= nornordeste
- NE= nordeste
- ENE= estenordeste
- E= este
- ESE= estesudeste
- SE= sudeste
- SSE= sudsudeste
- S= sur
- SSW= sudsudoeste
- SW=sudoeste
- WSW= oesudoeste
- W= oeste
- WNW= oesnoroeste
- NW= noroeste
- NNW= nornoroeste

Figura 9. Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre octubre-diciembre 2014.

Las velocidades de viento que presentan mayor promedio (31%) para este trimestre se encuentran entre 7.9 a 11.4 m/s, seguidas en un 24.1% las de rangos de 4.2 a 7.8 m/s. En el trimestre de enero a marzo del 2015, la dirección preferencial de procedencia de los vientos es del NW en un 30%, seguida de las WNW en un 14%, y por último una tercera dirección SSW a SW con porcentajes de 14 y 12 respectivamente (Figura 10). El análisis de esta información se basó en un aproximado de 8950 datos.



Simbología:

N= norte

NNE= nornordeste

NE= nordeste

ENE= estenordeste

E= este

ESE= estesudeste

SE= sudeste

SSE= sudsudeste

S= sur

SSW= sudsudoeste

SW= sudoeste

WSW= oesudoeste

W= oeste

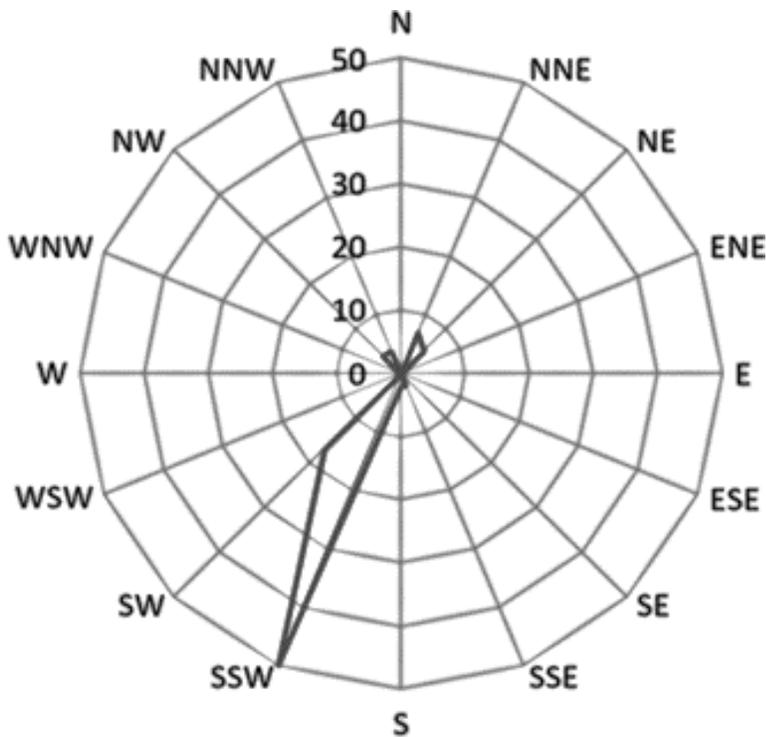
WNW= oesnoroeste

NW= noroeste

NNW= nornoroeste

Figura 10. Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre enero-marzo 2015.

Para el trimestre abril-junio de 2015, el 74% de los datos se observa una dirección preferencial de procedencia de la dirección SSW-SW, seguida de un porcentaje muy bajo en dirección a NNE (Figura 11). El análisis de esta información se basó en un total de datos mayor a 8500. Las velocidades de viento que presentan mayor promedio (40%) para este trimestre se encuentran entre 7.9 a 11.4 m/, seguidas en un 34% las de rangos de 4.2 a 7.8 m/s.



Simbología:

- N= norte
- NNE= nornordeste
- NE= nordeste
- ENE= estenordeste
- E= este
- ESE= estesudeste
- SE= sudeste
- SSE= sudsudeste
- S= sur
- SSW= sudsudoeste
- SW= sudoeste
- WSW= oesudoeste
- W= oeste
- WNW= oesnoroeste
- NW= noroeste
- NNW= nornoroeste

Figura 11. Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre abril-junio 2015.

Cabe mencionar que la información climatológica reportada en la rosa de vientos de los trimestres del año estudiado, no ayuda mucho para ser discutida en su relación con los componentes particulados en aire ambiente. Esto debido a que, si bien establecen las direcciones y velocidades preferenciales, no dan idea del momento en que éstas ocurren por lo que su relación con los días específicos de monitoreo no es posible. Por tal motivo se contemplan los parámetros como la precipitación, humedad, dirección del viento y velocidad del mismo día y los días anteriores más próximos al momento del monitoreo. Esta información se reporta en las Tablas 4, 5, 6, 7, 8 y 9. Los resultados obtenidos son los siguientes: Sólo se tienen tres días marcados con PST fuera de norma, esto es el 28 de noviembre de 2014 ($254 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ese día en particular se reporta sin precipitación, con dirección preferencial del viento del SE, con velocidad de 21.74 m/s, humedad relativa de 19.48 % en una condición de temperatura de 16.50 °C. El 17 de enero de 2015 con $232 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no presentó precipitación, dirección del viento predominantemente del SW, humedad relativa de 39.4 %, velocidad del viento 8.62 m/s y temperatura de 11.6 °C. El 24 de marzo (335

$\mu\text{g}/\text{m}^3$), tampoco registra precipitación, la dirección preferente del viento es del SSW con una velocidad de 7.07 m/s y una temperatura media de 17.06 °C.

En base a lo anterior, los resultados indican que en las fechas en que se superó el máximo permisible de PST se asocia a que la velocidad del viento era de mediana a alta (mayor de 7 m/s), por lo que no parece haber relación con la dirección desde el origen del viento, esto en virtud de que en las fechas en cuestión éste tiene inicios diversos representados como SE, WNW, NW, SSW. Algunos como SE y NW justamente en sentido contrario, el primero del complejo minero a la ciudad y el segundo de la ciudad a la mina. La humedad relativa no parece tampoco guardar una relación con la incidencia de material particulado; la fecha del 28 de noviembre, reporta un valor de 19.48 % en tanto que el resto de las fechas con presencia de material particulado fuera de norma tienen una humedad relativa mucho más alta (entre 39.82 y 61.98 %). Respecto a la precipitación se espera que no haya incidencia importante de material particulado en aire ambiente en momentos de ocurrencia de esta variable climatológica; en general, sí se observa, una baja incidencia de material particulado en los días de monitoreo que coinciden con la presencia de precipitación. Incluso en la fecha del 13 de julio, el resto de los monitores registra una baja incidencia de material particulado en aire ambiente. La observación inversa se evidencia en los trimestres de enero-marzo y abril-junio, en los que la precipitación es baja con alta incidencia de días con material particulado alto.

Tabla 4. Precipitación y día de monitoreo de polvos en el periodo julio-diciembre 2014.

Día	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	-	-	-	-	-	-
2	4.06	8.88	-	-	-	-
3	3.28	-	0.76	-	-	-
4	9.88	-	-	-	-	2.2
5	-	-	15.49	-	-	-
6	6.85	8.11	29.93	-	-	0.2
7	20.32	-	-	4.05	-	-
8	5.56	-	7.1	27.42	-	-
9	14.2	1.5	-	0.25	-	-
10	1.77	1.02	-	-	-	-
11	24.12	-	-	-	-	-
12	12.43	3.56	-	-	-	-
13	12.95	-	-	-	-	0.2
14	-	0.5	-	-	-	-
15	-	13.96	1	-	-	-
16	-	-	16.22	-	-	-
17	-	42.42	118.35	-	-	-
18	-	0.5	22.59	-	-	0.2
19	-	2.55	-	-	-	0.2
20	-	8.88	-	-	-	-
21	-	-	11.93	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-
24	5.59	-	-	-	-	-
25	3.3	6.08	-	-	-	4.4
26	8.12	2.8	25.39	-	-	0.2
27	39.35	-	2.27	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-
30	4.31	-	-	-	-	-
31	9.89	-	-	-	-	-

Tabla 5. Precipitación y día de monitoreo de polvos durante el periodo enero-junio 2015.

Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	0.06	-	-	-
3	-	-	0.04	-	-	-
4	-	-	0.03	-	-	-
5	-	-	-	-	-	0.04
6	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	0.10	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	13.0	-	-
14	-	-	-	-	3.0	-
15	-	0.01	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	2.2
18	-	-	0.13	-	-	-
19	-	-	0.02	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	24.4
24	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
26	0.11	-	-	-	-	5.2
27	-	-	-	0.40	-	5.0
28	-	-	-	-	-	-
29	0.21	-	-	-	-	-
30	0.508	-	-	-	-	6.0
31	0.14	-	-	-	-	3.0

Tabla 6. Datos climatológicos durante el trimestre julio-septiembre de 2014.

Día	Dirección del viento	Velocidad m/s	Humedad (%)	Temperatura (°C)
03Jul14	S	15.25	40.49	25.10
13Jul14	WNW	11.67	61.98	21.58
17Jul14	WSW	10.35	57.84	22.67
26Jul14	SSW	7.43	63.04	23.53
30Jul14	SE	10.94	49.73	26.06
08Ago14	NE	8.04	67.54	21.72
13Ago14	SSW	9.66	72.06	21.68
21Ago14	SSW	7.84	66.51	20.51
28Ago14	NNW	10.65	64.51	22.36
03Sep14	NW	12.14	46.73	23.80
10Sep14	WNW	8.45	45.94	21.99
18Sep14	SSW	10.85	90.08	18.49
24Sep14	NW	9.82	61.42	22.81

Tabla 7. Datos climatológicos durante el trimestre octubre-diciembre de 2014.

Día	Dirección del viento	Velocidad m/s	Humedad (%)	Temperatura (°C)
01Oct14	SSW	13.63	37.30	19.24
07Oct14	SSW	8.45	68.68	18.99
13Oct14	WNW	8.11	43.17	18.29
21Oct14	WNW	9.11	51.14	16.71
30Oct14	WNW	8.62	35.89	19.79
04Nov14	NEW	21.91	71.74	9.45
10Nov14	SSW	18.36	43.33	16.15
16Nov14	NW	13.99	62.42	10.24
22Nov14	NW	10.81	39.84	10.47
28Nov14	SE	8.98	19.48	16.50
04Dic14	NW	6.64	80.96	11.59
10Dic14	SSW	9.84	39.82	11.38
16Dic14	SSE	20.27	46.47	9.62
22Dic14	WNW	10.74	49.48	11.61
28Dic14	NW	11.68	41.22	5.03

Tabla 8. Datos climatológicos durante el trimestre enero-marzo de 2015.

Día	Dirección del viento	Velocidad m/s	Humedad (%)	Temperatura (°C)
03Ene15	SSWW	5.40	52.85	2.02
11Ene15	SSE	12.07	62.23	10.26
17Ene15	SW	8.62	39.47	11.69
23Ene15	NW	26.15	46.22	2.95
04Feb15	NW	9.52	26.38	14.51
10Feb15	WSWW	10.88	22.42	17.03
16Feb15	WNW	1.12	90.27	9.62
22Feb15	-	-	-	-
28Feb15	-	-	-	-
06Mar15	NW	13.54	46.74	10.66
12Mar15	NW	4.02	31.41	15.64
18Mar15	SSW	5.92	79.61	12.20
24Mar15	SSW	7.07	20.35	17.66
30Mar15	NW	5.94	21.57	21.28

Tabla 9. Datos climatológicos durante el trimestre abril-junio de 2015.

Día	Dirección del viento	Velocidad m/s	Humedad (%)	Temperatura (°C)
05Abr15	SSW	10.57	25.43	18.1
11Abr15	SSW	10.64	38.40	15.75
17Abr15	NNW	8.60	16.34	13.34
23Abr15	S	17.0	41.52	15.02
29Abr15	NNE	9.80	22.61	17.58
05May15	SSW	10	47	16
11May15	NW	10	21	19
17May15	SSW	8	31	18
23May15	SW	8	33	15
29May15	SW	6	20	24
04Jun15	SSW	11	21	24
10Jun15	SW	8	55	24
16Jun15	NW	9	27	27
22Jun15	SSW	9	25	26
28Jun15	NNW	6	50	26

Metales (Cu, Cr, Mo)

En la Figura 12 se desprende que para el trimestre julio-septiembre de 2014, el Cr y Mo no registran concentraciones mayores al límite de detección. Para el trimestre octubre-diciembre del mismo año en la figura 13, se observa este mismo criterio para Cr, Mo. Este último comportamiento también se cumple para el tercer y cuarto trimestre del año 2015 de estudio; es decir, sólo el cobre se encuentra presente en todas las muestras de filtros de aire ambiente en la ciudad. De estos tres metales, el único que se registra con presencia en todas las muestras del año en estudio es el Cu, razón por la cual ha sido estudiado en su relación con la presencia de material particulado, concepto que se reporta en el numeral correspondiente (7.4). En virtud de que nuestro país no tiene valores normativos de su máximo permisible, se ha comparado con referentes internacionales concluyéndose que, al igual que el Cr y Mo, no representa riesgos a la salud, por encontrarse muy por debajo de estas referencias (numeral 7.5.1). Se tiene referencia

de Cr y Cu en otras ciudades de Sonora, observándose que ambos, en la ciudad de Guaymas, se encuentran en una cantidad mayor a la registrada en Cananea; al parecer debido a la presencia de la generación de electricidad por medio de hidrocarburos, y a actividades propias de procedimientos portuarios marítimos. Afortunadamente, en esta ciudad (Guaymas) tampoco representa valores que pudieran potencializar un problema a la salud (numeral 7.6).

Relación de Metales Pesados con PST

Los resultados de metales pesados en aire ambiente se reportan en las Figuras de la 12 a la 15. Excepto el Cu, Cr y Mo se encuentran por debajo del límite de detección del método de cuantificación. Para el caso del Cr, se observa un rango de presencia de $0.022 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la muestra del día 13 de julio de 2014, a un máximo en la muestra del día 08 de agosto de 2014 con $0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con presencia de este metal en todos los días programados para el muestreo en este trimestre.

El caso particular del cobre se encuentra en todos los días de muestreo del trimestre julio-septiembre, lo que favorece la correlación de este metal con la variación de partículas suspendidas totales (PST). Este índice (r) se encuentra de manera positiva con un valor de $0.6753 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 12). Esta relación directa se evidencia en fechas como la del 13 de julio, en la que los PST son de $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una baja presencia de cobre de $0.022 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En tanto que si la incidencia de PST aumenta en las fechas 30 de julio y 24 de septiembre (103.0 y $102.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), así como el contenido de cobre con 0.36 y $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el trimestre octubre-diciembre se tiene el cobre como metal con registro arriba del límite de detección. El valor máximo se observó el día 28 de noviembre con $0.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en tanto que su valor mínimo el día 07 de octubre con $0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con presencia de este metal en todos los días programados de muestreo. En este trimestre la asociación directa de los PST con la presencia de cobre es más conveniente con un índice de $0.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 13). Los trimestres de enero-marzo y el de abril-junio de 2015, poseen el mismo criterio con valores de r de 0.78 y $0.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

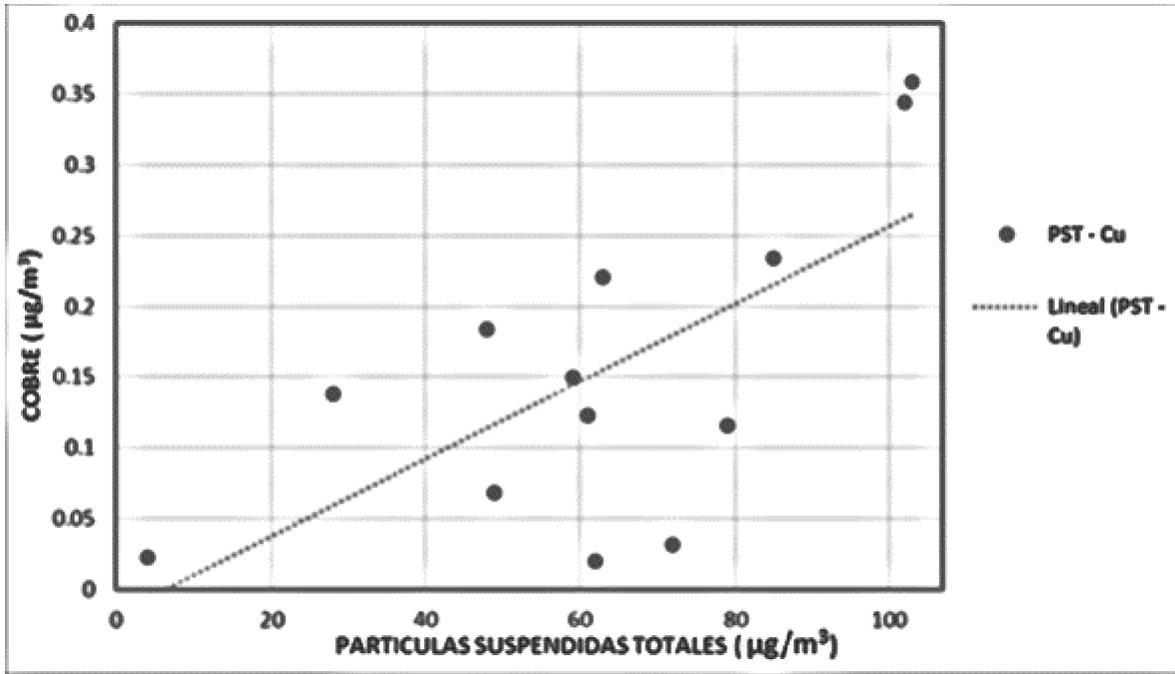


Figura 12. Relación de PST con cobre ($r = 0.6753$), en el trimestre julio-septiembre 2014.

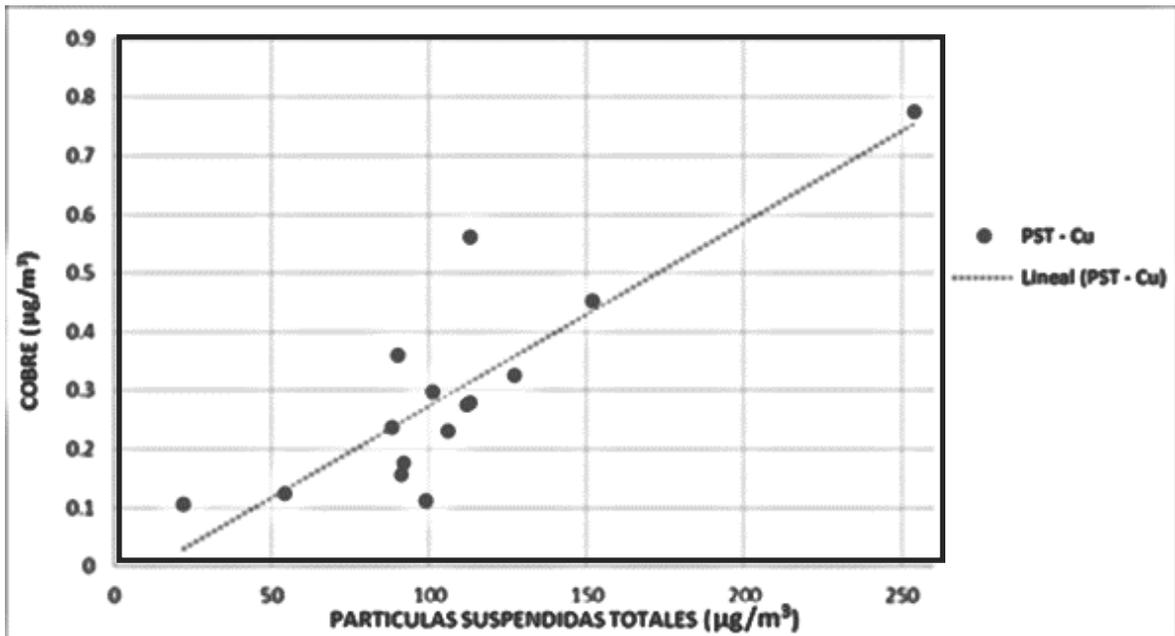


Figura 13. Relación de PST con cobre ($r = 0.8543$), en el trimestre octubre-diciembre 2014.

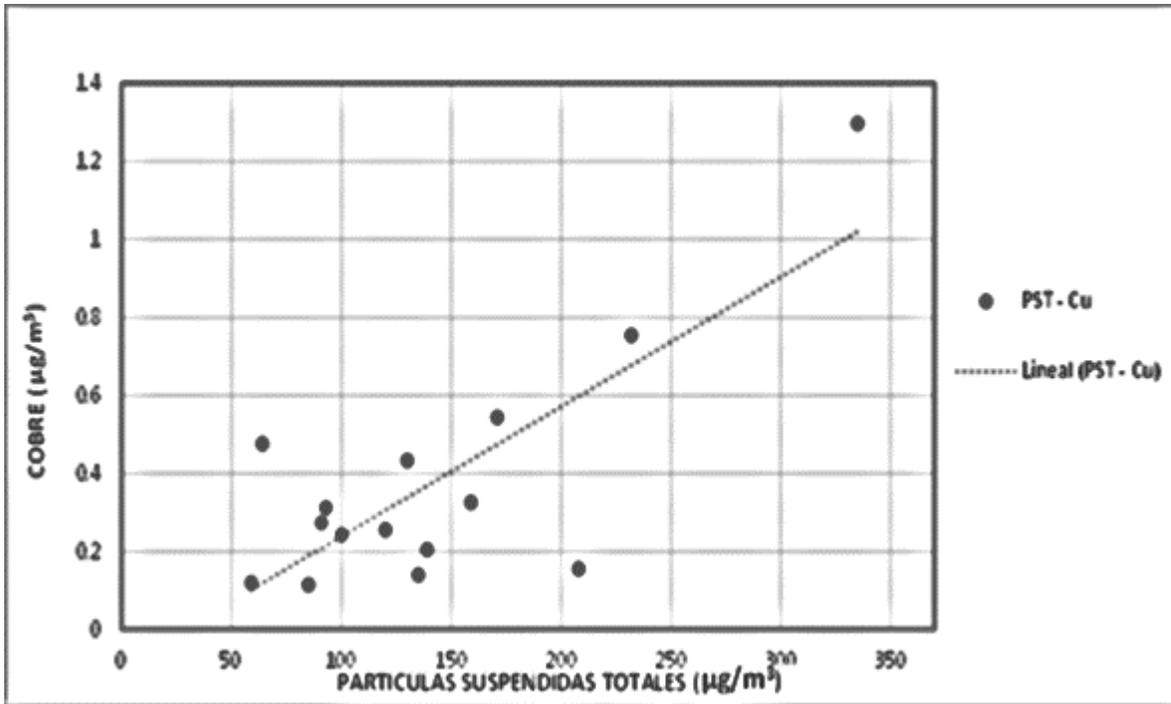


Figura 14. Relación de PST con cobre ($r = 0.7812$), en el trimestre enero-marzo 2015.

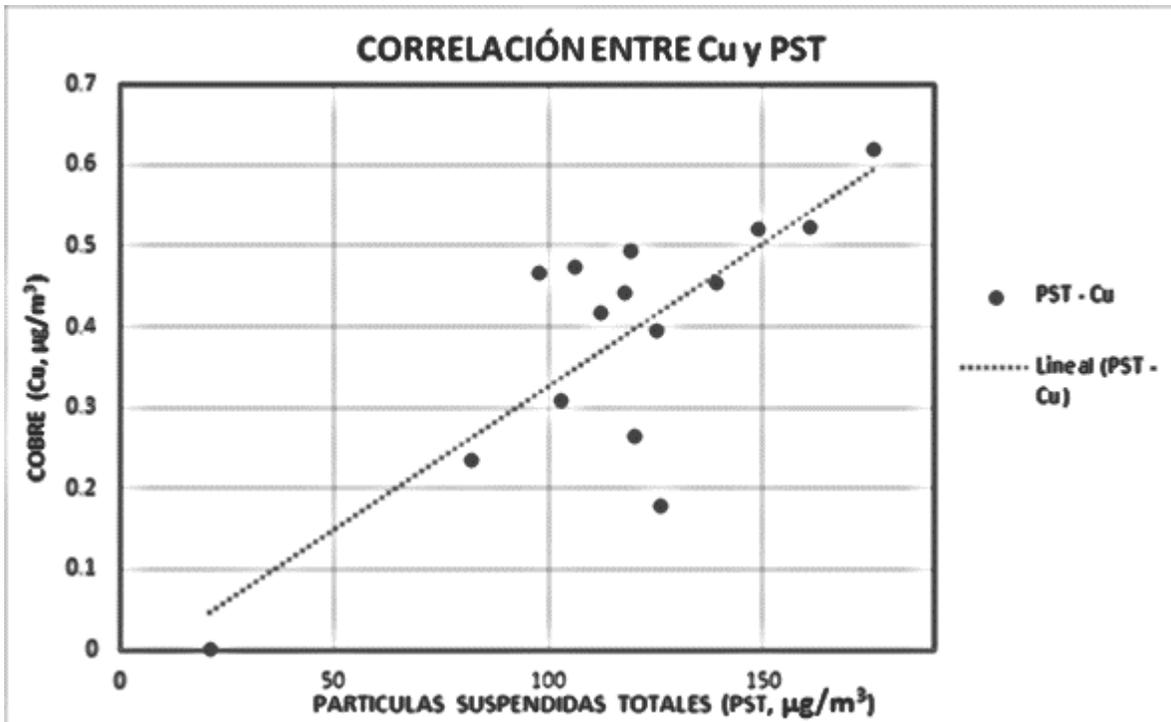


Figura 15. Relación de PST con cobre ($r = 0.7953$), en el trimestre abril-junio 2015.

Comparación de los Resultados de Metales Respecto a los Valores Máximos Permisibles

Cobre

En México no existen normas de calidad del aire para este metal, debido a esto se utilizó el criterio de Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente de Ontario, Canadá (OME, 2012), el cual fija un valor máximo permisible de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 24 hrs. Con base a esta referencia los resultados de cobre en Cananea obtenidos en el trimestre julio-septiembre de 2014, no rebasan para Cananea, el valor normado. A pesar de que este metal se detectó en todos los días de muestreo del presente estudio, el máximo registrado es de $1.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para la muestra del día 24 de marzo de 2015, la cual se reporta muy saturada de material particulado. Dicha concentración se ubica muy por debajo de lo establecido en el criterio utilizado de calidad del aire, por lo que se asume que no existe riesgo a la salud de la población por este metal. Lo mismo ocurre para el trimestre octubre-diciembre en el que el valor máximo fue de $0.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cromo

En México no existe normatividad para este metal, por lo que se utilizó el Criterio de Calidad del Aire Ambiente del Ministerio de Ambiente de Ontario, Canadá (OME, 2012), el cual establece un valor máximo permisible de cromo en aire de $0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 h. En el presente estudio este metal presentó valor no detectable en las muestras de material particulado de aire ambiente en Cananea, por lo que se asume que no existe riesgo a la salud por este elemento.

Molibdeno

Este metal se reporta inferior al límite de detección para los trimestres del año que ampara el presente estudio (julio de 2014 a junio de 2015). No existe en México valor normativo para este metal. La Occupational Safety & Health Administration (2000), reporta un valor límite permisible para lugares industrializados de $15 \text{mg}/\text{m}^3$. En virtud de que este metal no se registra por arriba del límite de detección ($0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y a su vez, es mucho menor al valor internacional de referencia, puede establecerse que el área de estudio está libre del riesgo a la salud por exposición de este elemento.

Comparación de los Resultados Obtenidos con Otros Estudios

En la Tabla 10, se presenta la concentración promedio y máxima del período anual estudiado para los metales de Cu, Cr, Mo en aire ambiente de la ciudad de Cananea, en comparación con los metales Cu, Cr reportados por Cruz-Campa, (2015), para otras ciudades del estado de Sonora. Los promedios fueron obtenidos únicamente con los días en que se detectaron concentraciones por arriba del límite de detección de cada metal. Para el caso del cobre, el valor máximo reportado ocurre en la ciudad de Guaymas con $2.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo mucho mayor a lo registrado en la ciudad de Cananea. Para el cromo, el valor mayor reportado corresponde también a la ciudad de Guaymas con $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en tanto que para Cananea se registra un dato por debajo del límite de detección ($<0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El molibdeno no es reportado por Cruz-Campa, (2015), notándose que, en el presente estudio para Cananea, se registran valores por debajo del límite de detección. En cualquiera de los casos el valor reportado se presupone no representan riesgo a la salud por no rebasar los límites permisibles en México.

Tabla 10. Concentraciones promedio y máxima de metales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en aire ambiente detectadas en la ciudad de Cananea, Sonora, en comparación con otras ciudades del estado de Sonora (Fuente. Cruz-Campas 2015).

Ciudad	Dato	Cu	Cr	Mo
Cananea	Promedio	0.33		
	Máxima	1.29	ND	ND
Agua Prieta	Promedio	0.01		
	Máxima	0.16	ND	
Nogales	Promedio	0.08	0.016	
	Máxima	0.17	0.016	
P. Peñasco	Promedio	0.10		
	Máxima	0.31	ND	
Hermosillo	Promedio	0.04		
	Máxima	0.12	ND	
Guaymas	Promedio	0.21	0.019	
	Máxima	2.08	0.030	
Obregón	Promedio	0.04	0.013	
	Máxima	0.12	0.013	

CONCLUSIONES

Partículas Suspendidas Totales (PST)

- Para la ciudad de Cananea, Sonora, de los 58 muestreos en el año en estudio, 3 resultaron por arriba del valor con un porcentaje de 5.16%, sólo superada por Guaymas con resultado negativo, a partir de un muestreo que no cumplió la norma NOM-025-SSA1-1993 (SSA, 2005) en lo que a cobertura de datos mínimos se refiere.
- Con respecto al promedio mensual en el año de estudio julio 2014 a junio 2015, la ciudad de Cananea, se encuentra dentro de los valores permisibles, a diferencia de las otras 6 ciudades con que se comparó; mismas que uno de sus meses superó el valor normativo; por ejemplo, la ciudad de Nogales que lo superó en 11 de los 12 meses durante el periodo de estudio.
- Respecto al indicador Percentil 98, la ciudad de Cananea incumple la normatividad con 254 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; sin embargo, con base a este indicador la calidad del aire en esta ciudad es mejor que lo que se reporta para las ciudades de Hermosillo y Nogales; únicas ciudades con que se pudo comparar, con base al cumplimiento de cobertura de datos mínimos a ser cubiertos en el año.
- En relación al Índice de Calidad del Aire Anualizado, Cananea, al igual que las 6 ciudades de la entidad con las que se comparó, resulta no conveniente, con la diferencia de que la ciudad Cananea es la que más días al año reporta con calidad del aire de regular a buena, en lo que a PST se refiere.

Metales

- Para el trimestre julio-septiembre el Cr y Mo se encuentran por debajo del límite de detección del método de cuantificación, excepto para Cu. Se observó un rango de presencia de 0.022 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a un máximo de 0.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con presencia de este metal en todos los días programados. Para el trimestre octubre-diciembre no se observa detección para el Cr y Mo. El cobre se encuentra presente en todos los días monitoreados para este trimestre con un contenido mínimo de 0.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a un máximo de 0.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En los trimestres de 2015 el único metal que se detectó fue el Cu con un mínimo de 0.11 y máximo de 1.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (trimestre de enero-marzo), y ND a 0.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como rango para el trimestre de abril-junio.
- En ninguno de los casos los valores detectados de Pb y Cu se encuentran arriba de los valores máximos permisibles establecidos en México (Pb) y/o normatividad de otros países (Pb y Cu).

- En el caso particular del Cu, se encuentra en todos los días de muestreo del año en estudio, lo que favorece observar la correlación (r) de este metal con la variable partículas suspendidas totales (PST). Para el trimestre julio-septiembre este índice (r) se encuentra de manera positiva con un valor de $0.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este mismo criterio se observa para (PST-Cu), en el trimestre octubre diciembre, 2014, pero con un índice aún mejor con $0.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta relación prevalece para los trimestres de enero-marzo y abril-junio de 2015 con $0.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

RECOMENDACIONES

1. Asegurar la disponibilidad de recursos tanto humanos como económicos para el programa, ya que éste debe tener carácter permanente, al catalogarse la calidad del aire como un indicador de la salud y bienestar de la población.
2. Es conveniente considerar el riego de calles como una medida conveniente para el control de partículas suspendidas en el aire ambiente. Esta recomendación se extiende al hecho de que no se usen las aguas negras, debido a los efectos secundarios que estas puedan representar en términos de salud a la población.
3. Se recomienda utilizar los resultados obtenidos en esta investigación para correlacionarlos con la morbilidad reportada por estudios epidemiológicos alternos y finalmente, involucrar a profesionistas que desarrollen medidas preventivas, como desarrollo de productos que eviten la generación de polvos, reforestación acelerada, construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, etc.
4. Se requiere realizar un programa de monitoreo constante que cumpla con la normatividad establecida, lo cual conlleva a realizar actividades en colaboración con otras instituciones y a la adquisición de equipo adecuado y al entrenamiento de recursos humanos que hagan expertos en el tema.
5. Con respecto a las actividades de muestreo, análisis 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.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, J.M, Barajas, D.I. 2008. Caracterización Quimiométrica del Material Particulado Suspendido en Zonas Impactadas en el Área Metropolitana de Monterrey. Revista latinoamericana de recursos naturales, 4 (2): 60-67. Monterrey Nuevo León México.
- Alley, E.R. 2001. Manual de control de la calidad del aire. 1ª ed. Ed. McGRAW-HILL. México, D.F. 26.27p.
- CFR (Code of Federal Regulations). 1992. Title 40, Part 50 - 58. Environmental Protection Agency. USA.
- Clavijo, A. 2002. Fundamentos de la química analítica. Equilibrio iónico y análisis químico. Primera Edición. p.69. Preparación editorial e impresión Universidad Nacional de Colombia – UNILIBROS.
- Comisión Nacional del Agua. CNA. 1993. Manual de Aseguramiento de Calidad. Subdirección General de Administración. Programa de Aseguramiento de la Calidad. México. D.F. 146p
- Cruz, C.M.E. 2015. Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en seis ciudades de sonora México, durante un periodo anual. Tesis doctoral. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. 135p.
- De nevers, N. 1998. Ingeniería de control de la Contaminación del Aire. 1a ed. Ed. McGRAW – HILL. INTERAMERICANA EDITORES, S.A de C.V. 546p.
- 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.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2005. Norma MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a material particulado. México, D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2014. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud Ambiental. Valores límites permisibles para la concentración de partículas

suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. 20 de agosto de 2015.

- EEA (Environmental European Agency). 2004. Base de datos (STAR) 1993-2002. (<http://star.eea.eu.int/default.asp>)
- EPA (Environmental Protection Agency). 1990. National Ambient Air Quality Standards, NAAQS.USA.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1992. Test Methods for Evaluating Solid Waste, physical/chemical methods (SW-846) Springfield, Virginia. U.S.A. 1049p.
- EPA (Environmental Protection Agency).1999. Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (SPM) and PM10 using high volumen (HV) sampler. Compendium Method 10-2.1.74p.
- EPA, ADEQ, CAN (Environmental Protection Agency, Arizona Department of Environmental Quality y Comisión Nacional del Agua). 1998. Binacional Nogales Wash United Status/México Groundwater Monitoring Program. The United States Environmental Protection Agency Region IX (USEPA). U.S.A. 68p.
- EPA, (Environmental Protection Agency), 2000. Quality Assurance Project Plan for Surface Impoundment Study Field Sampling and Analysis Program. Arlington, United States.
- Espinoza R.M.E. 2007. Revisión y estructuración de los manuales de monitoreo atmosférico para fortalecer la operación y mantenimiento de las redes de monitoreo de la calidad del aire que operan en México. INE-ADE-037/2007 312p.
- Gutiérrez JH. Romieu I, Corey G, Fortoul T. 1997. Contaminación del Aire; Riesgos para la Salud. Ed. El manual Moderno S.A. de C.V. México D.F. 452p.
- http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf
- <http://www.bdigital.unal.edu.co/750/1/mauriciovelascogarcia.2005.pdf>
- <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/california/mexicon/R-0037.pdf>
- <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/Son/Poblacion/default.aspx?tema=ME&e=26>
- <http://documents.mx/documents/modelacion-de-dispersion-espacial-de-contaminantes-del-aire-en-la-ciudad.html>
- http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014
- <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26019a.htm>
- <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/695/importancia.pdf>
- <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/233/cap4.html>
- <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre- metales>

- <http://www.isciii.es/...directiva/...subdireccion...ambiental/...ambiental/Analisi>
- <http://www.lenntech.es/faq-calidad-del-aire.htm>
- <http://mapserver.inegi.org.mx/mgn2k/>; 30 de noviembre de 2009
- <http://medioambienteperiodismo.blogspot.mx/2009/11/contaminacion-por-metales-pesados-y-sus.html>
- http://www.quantyka.com.mx/catalogo/HDSM/Puros/cobre_polvo.htm
- <http://www.quantyka.com.mx/catalogo/HDSM/Puros/cromo.htm>
- http://www.quantyka.com.mx/catalogo/HDSM/Puros/molibdeno_polvo.htm
- <http://www.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2504/tesisUPV2792.pdf>
- <http://www.scielosp.org/pdf/spm/v41n3/41n3a08.pdf>
- <http://www.tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/>
- <http://www.tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4066/Capitulo4.pdf>
- <http://www.tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/1695/Capitulo6.pdf>
- Jaramillo, J. F y col. 2009. Toxicología Ambiental. Ed. Corporativo Gráfico. Universidad Autónoma de Aguascalientes. 395p.
- John, H. S. 1978. Contaminación Atmosférica Fundamentos Físicos y Químicos. 1a ed. Ed. McGraw-Hill. Madrid. 558 p.
- Miller, J.C y Miller, J.N. 1993. Estadística para Química Analítica. Ed. Addison-Wiley Iberoamericana, Wilmington, Delaware, U.S.A. 211 p.
- Montiel, P. S. 2006. Análisis de la Calidad del Aire en el Valle de México a partir del año 1986. Universidad Nacional Autónoma de México. 85p.
- Norma Oficial Mexicana (NMX. AA_115-SCFI-2001). Análisis de agua-criterios para el control de la calidad de resultados analíticos. Secretaría de Economía, México, D.F.
- Romero, A. A. A. 1996. Estudio de la Contaminación por Metales Pesados en Aguas y Sedimentos del Rio San Pedro. Universidad de Sonora. México. 117p.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2003. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2002. Compendio de Estadísticas Ambientales. 382p.
- 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.
- Spiro, G. T. Stigliani, M. W. 2004. Química Medioambiental. 2a ed. Ed. Pearson Prentice Hall. Madrid. 504p.

- Lacasaña, N. M. Aguilar, G. C, Romieu, I. 1999. Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina.
- Stoker, S. M. Seager, L. S. 1981. Química Ambiental. Contaminación del aire y del agua. Ed. Blume. España. 320p.
- WHO (World Health Organization). 2000b. Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution. Report EUR/01/5026342 E74256.

APÉNDICES

1. Resultados del Control de Calidad durante el Análisis de Metales en filtros.
2. Concentraciones de PST en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, México, durante el periodo de julio 2014 a junio 2015.
3. Direcciones preferencial de los vientos en el sitio en estudio.
4. Resultados de metales (Cu, Cr y Mo) en aire ambiente en Cananea, Sonora, México en un período anual.

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

Tabla 1a. Resultados del análisis de metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en los blancos de digestión.

Blancos	Cr	Cu	Mo
Julio-Septiembre,2014			
Blanco1	ND<LD	ND<LD	ND<LD
Blanco2	ND<LD	ND<LD	ND<LD
Blanco3	ND<LD	ND<LD	ND<LD
Blanco4	ND<LD	ND<LD	ND<LD
Octubre-Diciembre,2014			
Blanco1	0.023	0.003	ND<LD
Blanco2	0.024	0.002	ND<LD
Blanco3	0.023	0.002	ND<LD
Blanco4	0.024	0.005	ND<LD
Enero-Marzo,2015			
Blanco1	0.012	ND<LD	ND<LD
Blanco2	0.009	ND<LD	ND<LD
Blanco3	0.014	ND<LD	ND<LD
Blanco4	0.015	ND<LD	ND<LD
Abril-Junio,2015			
Blanco1	ND<LD	ND<LD	ND<LD
Blanco2	ND<LD	ND<LD	ND<LD
Blanco3	ND<LD	ND<LD	ND<LD
Blanco4	ND<LD	ND<LD	ND<LD

LD = Limite de Detección, ND = No Detectable

Tabla 1b. Control de calidad en las muestras duplicadas (DPR). Valores de Desviación Porcentual Relativa (DPR) de Cr, Cu y Mo, en las muestras de filtros (A y B).

Metal	Duplicado A	Duplicado B	%DPR	Duplicado A	Duplicado B	%DPR
Julio-Septiembre,2014						
30-jul-14			24-sep-14			
Cr	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*
Cu	0.23	0.24	1.69	0.34	0.34	0.26
Mo	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*
Octubre-Diciembre,2014						
30-oct-2014			28-dic-2014			
Cr	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*
Cu	0.28	0.28	0.32	0.77	0.77	0.57
Mo	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*
Enero-Marzo,2015						
11 Enero2015			24 Marzo2015			
Cr	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*
Cu	0.31	0.31	0.86	1.30	1.30	0.13
Mo	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*
Abril-Junio,2015						
17 Mayo2015			10 Junio2015			
Cr	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*
Cu	0.47	0.47	0.19	0.45	0.45	0.40
Mo	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*

LD = Limite de Detección, ND = No Detectable, DPR = Desviación Porcentual Relativa

Tabla 1c. Resultados de muestras fortificadas para el control de calidad de las muestras estudiadas en los diferentes trimestres.

Metal	PPM	%Recuperación	PPM	%Recuperación
Julio-Septiembre,2014				
Cr	0.5	102.00	1.0	103.00
Cu	0.5	92.46	1.0	97.53
Mo	2.0	99.50	5.0	104.4
Octubre-Diciembre,2014				
Cr	0.5	107.3	1	104.25
Cu	0.5	102.53	1	100.96
Mo	2	95.35	5	99.53
Enero-Marzo,2015				
Cr	0.5	104.46	1	101.9
Cu	0.5	104	1	102.6
Mo	2	108.05	5	101.4
Abril-Junio,2015				
Cr	0.5	104	1	106.33
Cu	0.5	97.66	1	97.33
Mo	2	99.37	5	103.10

APÉNDICE 2. Concentraciones de PST en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, México, durante el periodo de julio 2014 a junio 2015.

Tabla 2a. Calidad del aire ambiente por PST en la Cd. de Cananea, Sonora, México, en los trimestres julio-septiembre y octubre-diciembre de 2014.

Fechas de muestreo Trimestres		PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Minerva	
		Jul-Sep	Oct-Dic
03-jul-14	01-oct-14	28	90
13-jul-14	07-oct-14	4	22
17-jul-14	13-oct-14	61	54
26-jul-14	21-oct-14	63	91
30-jul-14	30/oct/14	85	113
08-ago-14	04-nov-14	103	99
13-ago-14	10-nov-14	62	101
21-ago-14	16-nov-14	49	88
28-ago-14	22-nov-14	79	113
03-sep-14	28-nov-14	48	254
10-sep-14	04-dic-14	59	106
18-sep-14	10-dic-14	72	152
24-sep-14	16-dic-14	102	112
	22-dic-14		92
	28-dic-14		127

Tabla 2b. Calidad del aire ambiente PST en la Cd. de Cananea, Sonora México, en los trimestres enero- marzo y abril-junio de 2015.

Fechas de muestreo Trimestres		PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Minerva	
		Ene-Mar	Abr-Jun
03-ene-15	05-abr-15	130	176
11-ene-15	11-abr-15	93	161
17-ene-15	17-abr-15	232	82
23-ene-15	23-abr-15	85	149
29-ene-15	29-abr-15	120	126
04-feb-15	05-may-15	139	118
10-feb-15	11-may-15	208	103
16-feb-15	17-may-15	159	106
22-feb-15	23-may-15	64	112
28-feb-15	29-may-15	59	98
06-mar-15	04-jun-15	135	119
12-mar-15	10-jun-15	100	139
18-mar-15	16-jun-15	91	120
24-mar-15	22-jun-15	335	125
30-mar-15	28-jun-15	171	21

Tabla 2c. Valor promedio mensual de la concentración de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Cananea, Sonora, México, en comparación a otras ciudades del estado de Sonora.

Mes	Cananea (I. Minerva)	Agua prieta	Nogales	Puerto Peñasco	Hermosillo	Guaymas	Obregón
Enero	132	-	520	139	201	128	228
Febrero	126	152	418	321	97	106	195
Marzo	166	132	295	315	102	117	226
Abril	139	-	211	429	104	67	315
Mayo	107	183	214	366	79	-	282
Junio	105	-	282	395	107	72	265
Julio	48	-	200	377	122	72	-
Agosto	73	-	383	-	73	90	-
Septiembre	70	181	694	536	75	63	132
Octubre	64	150	-	255	92	68	179
Noviembre	78	192	252	256	114	131	-
Diciembre	89	364	637	286	246	153	-

APÉNDICE 3. Direcciones preferenciales de los vientos en el sitio en estudio.

Tabla 3a. Velocidades del viento y su correspondiente porciento de incidencia en Cananea, Sonora, México, en el trimestre julio-septiembre 2014.

Intervalos de velocidades	Total de datos	Porcentaje
<0.5	613	6.94
0.51-4.1	812	9.2
4.2-7.8	1047	11.86
7.9-11.4	2230	25.26
11.5-15	1470	16.65
>15.1	2564	29.05

Tabla 3b. Velocidades del viento y su correspondiente porciento de incidencia en Cananea, Sonora México, en el trimestre octubre-diciembre2014.

Intervalos de velocidades	Total de datos	Porcentaje
<0.5	309	3.56
0.51-4.1	607	6.84
4.2-7.8	781	8.80
7.9-11.4	2334	26.32
11.5-15	1492	16.83
>15.1	3342	37.69

Tabla 3c. Velocidades del viento y su correspondiente porciento de incidencia en Cananea, Sonora México, en el trimestre enero-marzo2015.

Intervalos de velocidades	Total de datos	Porcentaje
<0.5	1	1.2
0.51-4.1	6	7.2
4.2-7.8	20	24.1
7.9-11.4	26	31.3
11.5-15	15	18.1
>15.1	15	18.1

Tabla 3d. Velocidades del viento y su correspondiente porciento de incidencia en Cananea, Sonora, México, en el trimestre abril-junio2015.

Intervalos de velocidades	Total de datos	Porcentaje
<0.5	0	0
0.51-4.1	4	5
4.2-7.8	31	34
7.9-11.4	36	40
11.5-15	15	17
>15.1	4	4

APENDICE 4. Resultados de metales (Cu, Cr, Mo) en aire ambiente en Cananea, Sonora, México en un período anual.

Tabla 4a. Metales pesados en PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre julio-septiembre 2014.

Fecha de muestreo	Metales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Cr	Cu	Mo
4 Julio2014	ND<LD	0.14	ND<LD
13 Julio2014	ND<LD	0.02	ND<LD
17 Julio2014	ND<LD	0.12	ND<LD
26 Julio2014	ND<LD	0.20	ND<LD
30 Julio2014	ND<LD	0.23	ND<LD
Duplicado 30Julio	ND<LD	0.24	ND<LD
8 Agosto2014	ND<LD	0.36	ND<LD
13 Agosto2014	ND<LD	0.02	ND<LD
21 Agosto2014	ND<LD	0.07	ND<LD
28 Agosto2014	ND<LD	0.12	ND<LD
3 Septiembre2014	ND<LD	0.18	ND<LD
10 Septiembre 2014	ND<LD	0.15	ND<LD
18 Septiembre2014	ND<LD	0.03	ND<LD
24 Septiembre 2014	ND<LD	0.34	ND<LD
Duplicado 24Sept.	ND<LD	0.34	ND<LD
Límite de Detección (LD)	0.02	0.02	0.02

ND = No detectable

Tabla 4b. Metales pesados en PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre octubre-diciembre 2014.

Fecha de muestreo	Metales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Cr	Cu	Mo
1 Octubre2014	ND<LD	0.36	ND<LD
7 Octubre2014	ND<LD	0.11	ND<LD
13 Octubre2014	ND<LD	0.12	ND<LD
21 Octubre2014	ND<LD	0.16	ND<LD
30 Octubre2014	ND<LD	0.28	ND<LD
Duplicado 30Octubre	ND<LD	0.28	ND<LD
4 Noviembre2014	ND<LD	0.11	ND<LD
10 Noviembre2014	ND<LD	0.30	ND<LD
16 Noviembre2014	ND<LD	0.24	ND<LD
22 Noviembre2014	ND<LD	0.56	ND<LD
28 Noviembre2014	ND<LD	0.77	ND<LD
Duplicado 28Noviembre	ND<LD	0.77	ND<LD
4 Diciembre2014	ND<LD	0.23	ND<LD
10 Diciembre 2014	ND<LD	0.45	ND<LD
16 Diciembre 2014	ND<LD	0.28	ND<LD
22 Diciembre 2014	ND<LD	0.18	ND<LD
28 Diciembre 2014	ND<LD	0.33	ND<LD
Límite de Detección (LD)	0.02	0.02	0.02

ND = No Detectable

Tabla 4c. Metales pesados en PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el tercer trimestre enero-marzo 2015.

Fecha de muestreo	Metales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Cr	Cu	Mo
3 Enero2015	ND<LD	0.43	ND<LD
11Enero2015	ND<LD	0.31	ND<LD
Duplicado 11Enero	ND<LD	0.31	ND<LD
17 Enero2015	ND<LD	0.75	ND<LD
23 Enero2015	ND<LD	0.11	ND<LD
29 Enero2015	ND<LD	0.26	ND<LD
4 Febrero2015	ND<LD	0.20	ND<LD
10 Febrero2015	ND<LD	0.16	ND<LD
16 Febrero2015	ND<LD	0.33	ND<LD
22 Febrero2015	ND<LD	0.48	ND<LD
28 Febrero2015	ND<LD	0.12	ND<LD
6 Marzo2015	ND<LD	0.14	ND<LD
12 Marzo2015	ND<LD	0.24	ND<LD
18 Marzo2015	ND<LD	0.27	ND<LD
24 Marzo2015	ND<LD	1.30	ND<LD
Duplicado24Marzo	ND<LD	1.30	ND<LD
30 Marzo2015	ND<LD	0.54	ND<LD
Límite de Detección (ND)	0.02	0.02	0.02

ND = No Detectable

Tabla 4d. Metales pesados en PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre abril-junio 2015.

Fecha de muestreo	Estación de muestreo I. Minerva		
	Metales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Cr	Cu	Mo
05-abr-15	ND<LD	0.62	ND<LD
11-abr-15	ND<LD	0.52	ND<LD
17-abr-15	ND<LD	0.24	ND<LD
23-abr-15	ND<LD	0.52	ND<LD
29-abr-15	ND<LD	0.18	ND<LD
05-may-15	ND<LD	0.44	ND<LD
11-may-15	ND<LD	0.31	ND<LD
17-may-15	ND<LD	0.48	ND<LD
Duplicado 17Mayo	ND<LD	0.47	ND<LD
23-may-15	ND<LD	0.42	ND<LD
29-may-15	ND<LD	0.47	ND<LD
04-jun-15	ND<LD	0.50	ND<LD
10-jun-15	ND<LD	0.45	ND<LD
Duplicado 10Junio	ND<LD	0.45	ND<LD
16-jun-15	ND<LD	0.27	ND<LD
22-jun-15	ND<LD	0.40	ND<LD
28-jun-15	ND<LD	ND<LD	ND<LD
Límite de Detección (LD)	0.02	0.02	0.02

ND = No Detectable