



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA

# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
Y METALURGIA

## ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE CON RESPECTO A $PM_{2.5}$ , METALES (Cu, Cr, Mo, Zn), EN LA CIUDAD DE CANANEA, SONORA, MÉXICO

Tesis

Que para obtener el título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Presenta

**SANTIAGO CISNEROS GONZÁLEZ**

Hermosillo, Sonora

Junio de 2019

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



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

## **AGRADECIMIENTOS**

Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de este trabajo. En primer lugar quiero agradecer a la Dra. Kareen Krizzan Encinas Soto, por su constancia, disposición y paciencia en este camino. A los investigadores Dr. Agustín Gómez Álvarez y Dr. Arturo Israel Villalba Atondo, quienes fueron clave para mi formación, agradezco el tiempo que dedicaron en mí, su sinceridad y disposición. Agradezco a la Dra. Ramona Guadalupe Martínez Meza quien me apoyo en todo momento con observaciones objetivas.

Agradezco al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora por haberme dado la oportunidad de realizar los análisis de laboratorio en sus instalaciones.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mi padre y a mi madre, quienes siempre han creído en mí.

## INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
RESUMEN .....	viii
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1. Objetivo General .....	3
1.2. Objetivos Específicos.....	3
2. ANTECEDENTES .....	4
2.1. Calidad del Aire.....	4
2.2. Fuentes de Contaminación del Aire .....	5
2.3. Tipos de Contaminantes de Aire .....	6
2.3.1. Material Particulado.....	6
2.3.2. Metales Cr, Cu, Mo y Zn.....	7
2.4. Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire .....	9
2.4.1. Material Particulado.....	11
2.4.2. Metales.....	12
2.4.2.1. Cromo .....	13
2.4.2.2. Cobre .....	14
2.4.2.3. Molibdeno.....	15
2.4.2.4. Zinc .....	17
2.5. Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire .....	18
2.5.1. Valores Máximos Permisibles para PM <sub>2.5</sub> .....	19
2.5.2. Valores Máximos Permisibles para Metales.....	20
2.5.2.1. Cromo .....	20
2.5.2.2. Cobre .....	20
2.5.2.3. Molibdeno.....	21
2.5.2.4. Zinc .....	21
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	22
3.1. Localización geográfica del área de estudio .....	22
3.1.1. Cananea, Sonora .....	23
3.1.2. Climatología .....	23
3.1.3. Principales Ecosistemas.....	24
3.1.4. Características y Uso del Suelo.....	24
3.1.5. Población.....	25
3.2. Procedimiento de Muestreo .....	25
3.3. Análisis de Laboratorio.....	27

3.4.	Material Particulado 2.5 Micras .....	27
3.5.	Metales Pesados Totales (Cr, Cu, Mo y Zn) .....	27
3.6.	Control de Calidad en el Análisis de las Muestras de Filtros .....	28
3.7.	Indicadores de Calidad de los Datos.....	29
3.7.1.	Precisión.....	29
3.7.2.	Exactitud.....	30
3.7.3.	Límite de Detección del Instrumento (L.D.) .....	30
3.8.	Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire Utilizados en Metales para la Presente Investigación .....	31
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	32
4.1.	Calidad del Aire Ambiente por PM <sub>2.5</sub> .....	32
4.2.	Comportamiento de los Metales en PM <sub>2.5</sub> .....	35
4.3.	Comparación de Metales con Máximos Permisibles (PM <sub>2.5</sub> ).....	35
4.3.1.	Cromo.....	35
4.3.2.	Cobre.....	36
4.3.3.	Molibdeno.....	37
4.3.4.	Zinc.....	38
4.4.	Direcciones Preferenciales de los Vientos Durante el año 2018.....	39
4.5.	Comparación de PM <sub>2.5</sub> Respecto a Datos Climatológicos.....	43
4.6.	Comparación PM <sub>2.5</sub> en Cananea y otras Ciudades del País y del Mundo.....	47
4.7.	Comparación Metales en Cananea y otras Ciudades del País y del Mundo .....	50
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
5.1.	Material Particulado 2.5 Micras .....	52
5.2.	Metales .....	52
5.3.	Recomendaciones .....	53
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	54
7.	APÉNDICES.....	62
7.1.	Control de Calidad en el Análisis de Metales en Muestras (Filtros).....	62
7.1.1.	Semestre I, 2018 .....	62
7.1.2.	Semestre II, 2018 .....	64
7.2.	Comportamiento de los Metales (µg/m <sup>3</sup> ) en PM <sub>2.5</sub> en Aire Ambiente en Tecnológico, Cananea, Sonora, Durante el Ciclo Anual 2018.....	67
7.3.	Calidad del Aire Ambiente por PM <sub>2.5</sub> para Ciclo Anual 2018.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Pirámide de efectos a la salud por la contaminación del aire.	10
2	Severidad de salud en función de la contaminación del aire y la sensibilidad del sujeto.	10
3	Área de estudio y estación de muestreo.	22
4	Ubicación del monitor Tecnológico de Cananea (TEC).	23
5	Muestreador de alto volumen (Hi-Vol) y monitor Tecnológico de Cananea (TEC).	26
6	Comportamiento de las PM <sub>2.5</sub> en el trimestre enero-marzo.	33
7	Comportamiento de las PM <sub>2.5</sub> en el trimestre abril-junio.	33
8	Comportamiento de las PM <sub>2.5</sub> en el trimestre julio-septiembre.	34
9	Comportamiento de las PM <sub>2.5</sub> en el trimestre octubre-diciembre.	34
10	Concentración de cromo durante el año 2018.	36
11	Concentración de cobre durante el año 2018.	37
12	Concentración de molibdeno durante el año 2018.	38
13	Concentración de zinc durante el año 2018.	39
14	Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre enero-marzo de 2018.	40
15	Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre abril-junio de 2018.	41
16	Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre julio-septiembre de 2018.	42
17	Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre octubre-diciembre de 2018.	43

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
Tabla I	Interpretación del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).	5
Tabla II	Efectos a la salud potencialmente pertinentes para la evaluación del impacto en la salud por la contaminación del aire.	11
Tabla III	Valores referencia para material particulado 2.5 micras según distintas dependencias internacionales.	20
Tabla IV	Información climatológica de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre enero-marzo de 2018.	44
Tabla V	Información climatológica de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre abril-junio de 2018.	45
Tabla VI	Información climatológica de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre julio-septiembre de 2018.	46
Tabla VII	Información climatológica de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre octubre-diciembre de 2018.	47
Tabla VIII	Promedio anual de PM <sub>2.5</sub> , reportado para diferentes ciudades del país y del mundo.	48
Tabla IX	Concentraciones promedio y máxima de metales ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en PM <sub>2.5</sub> en aire ambiente detectadas en el monitor Tecnológico, Cananea, Sonora, en comparación con otros sitios del país y del mundo.	51



## RESUMEN

En la presente investigación se evaluó la calidad del aire en la ciudad de Cananea, Sonora, México, respecto de material particulado ( $PM_{2.5}$ ) y metales pesados (Cr, Cu, Mo y Zn) durante un periodo anual (2018). Para el análisis de  $PM_{2.5}$  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 Espectroscopía de absorción atómica. Para evaluar la calidad del aire respecto de  $PM_{2.5}$ , se utilizó la Norma Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Para valorar la calidad del aire respecto a metales se utilizaron los siguientes criterios: cobre, cromo y zinc el criterio de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2010). El molibdeno se evaluó con el criterio de La Asociación de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR, 2017). Los resultados obtenidos indican que el Cr y Mo se encuentran por abajo del límite de detección del método de cuantificación. Para el caso del Cu y Zn, poseen el valor promedio anual de  $0.0098 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0.0396 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. En relación a los criterios internacionales que se tomaron como referencia para el presente estudio, ningún metal (salvo el caso aislado del zinc) excede los criterios utilizados como referencia de calidad del aire. En lo referente a la concentración de material particulado ( $PM_{2.5}$ ), sí cumple con la Normativa Mexicana en cuanto a los indicadores correspondientes; por lo que se puede establecer que la concentración de dichos metales (Cr, Cu y Mo) y material particulado no representan peligro a la salud. Se recomienda continuar con los estudios de material particulado  $PM_{2.5}$  durante un nuevo ciclo anual, para seguir monitoreando el metal zinc. Asimismo, se sugiere recolectar información sobre las actividades que podrían contribuir al incremento de dicho metal.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La contaminación atmosférica es un fenómeno creciente en nuestra sociedad cada día más industrializada y despreocupada con respecto a la problemática. Hoy en día existe un desconocimiento sobre las consecuencias en la salud y el medio ambiente que desencadena la contaminación del aire, asimismo se desconocen las características de las sustancias peligrosas que se encuentran en el aire, tales como los metales. La influencia de las diversas actividades industriales en zonas urbanas es un factor determinante en la contaminación atmosférica ya que en sus procesos se utilizan y por tanto se generan sustancias que representan un peligro para la población y el ambiente (Pérez y Hernández, 2006).

Es necesario indicar los constituyentes naturales de la atmósfera. Los componentes que aparecen en una mezcla natural son: nitrógeno 78.08%, oxígeno 20.95%, argón 0.93%, dióxido de carbono 0.03% y elementos trazas. En consecuencia, puede señalarse que la contaminación del aire es la presencia en la atmósfera de gases, partículas y vapores que han sido incorporados directa o indirectamente al aire por el ser humano o por fuentes naturales en cantidades suficientes como para afectar negativamente a los animales, vegetación, materiales y al ser humano (Rosario, 1998).

Se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y del bienestar de la humanidad. Sin embargo, su contaminación sigue representando una amenaza importante para la salud en todo el mundo. Según una evaluación de la Organización Mundial de la Salud referente a la carga de enfermedades debido a la calidad del aire, son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la calidad del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados (producida por la quema de combustibles sólidos). Más de la mitad de esta carga de enfermedad recae en las poblaciones de los países en desarrollo (OMS, 2005).

El material particulado es una mezcla compleja de sustancias en estado líquido o sólido, que permanece suspendida en la atmósfera por periodos variables de tiempo. Por su origen, las partículas pueden definirse como primarias (aquellas producidas directamente por alguna fuente contaminante) o secundarias (las que se forman en la atmósfera, como resultado de la interacción química entre gases y partículas primarias). Las partículas pueden tener un origen natural y también antropogénico. De acuerdo con su diámetro aerodinámico éstas pueden clasificarse en menores o iguales a 10 micras ( $PM_{10}$ ), en menores o iguales a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ ) y menores o iguales a 0.1 micras ( $PM_{0.1}$ ) (DOF, 2014). El tamaño es un parámetro importante para caracterizar su comportamiento en la atmósfera y por ende la concentración a la que puede estar expuesta la población; también determina la capacidad de penetración y retención en diversas regiones de las vías respiratorias (DOF, 2014).

Las partículas  $PM_{2.5}$  están formadas primordialmente por gases y por material proveniente de la combustión, una gran proporción de esta fracción son secundarias. Se depositan fundamentalmente en la región traqueobronquial (tráquea hasta bronquiolo terminal), aunque pueden ingresar a los alvéolos (DOF, 2014).

Es importante considerar que los seres vivos requieren pequeñas cantidades de metales, por ejemplo cobre, zinc, hierro, etcétera, para varias funciones biológicas. Sin embargo, una escasa o excesiva concentración de éstos pueden alterar procesos bioquímicos y/o fisiológicos en el organismo. Realmente lo que hace tóxico a los metales pesados no son sólo sus características químicas, sino las concentraciones en las que pueden presentarse, y más importante aún, el tipo de compuesto o metabolito que forman (Muñoz et al., 2016).

Dada la localización del complejo industrial minero Buenavista del Cobre S.A. de C.V., movimiento vehicular, operaciones trituradoras, entre otras

actividades que pudieran provocar la emisión de material particulado a la atmósfera, en el presente estudio se pretende evaluar la calidad del aire ambiente en la región de Cananea, Sonora, México, con respecto al material particulado (PM<sub>2.5</sub>), enfocado a los metales Cr, Cu, Mo y Zn.

### **1.1. Objetivo General**

- Realizar una caracterización con respecto a partículas menores a 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>) y metales (Cr, Cu, Mo, Zn), en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, México, durante un ciclo anual.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a partículas menores a 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>), en base a la Normatividad Mexicana Vigente, en el monitor Tecnológico, Cananea, Sonora, durante el ciclo anual 2018.
- Evaluar la calidad del aire ambiente por metales (Cr, Cu, Mo, Zn), en base a la Normatividad Mexicana Vigente, para PM<sub>2.5</sub>, en el monitor Tecnológico, Cananea, Sonora, durante el ciclo anual 2018.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos tanto de material particulado (PM<sub>2.5</sub>) y metales, respecto a otras ciudades a nivel estatal, nacional e internacional.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1. Calidad del Aire**

La calidad del aire es una forma de medir las condiciones del aire en espacios interiores. El dióxido de carbono es una magnitud objetiva para determinar la calidad del aire. Es el resultado de fenómenos complejos: las características fisiográficas de la zona, la cantidad de contaminantes emitidos y la actividad meteorológica (SEMARNAT, 2011). Aunado a estos fenómenos complejos, también está la combustión proveniente de los hogares, los vehículos de motor de combustión y las instalaciones industriales. De igual forma, los incendios forestales son fuentes comunes de contaminación del aire.

Una de las principales consecuencias de la mala calidad del aire es el daño a la salud de la población. Según la Organización Mundial de la Salud, la contaminación atmosférica provoca al año 3.7 millones de defunciones prematuras en zonas rurales y urbanas de todo el mundo, de éstas el 88% se producen en países de ingresos bajos y medianos (OMS, 2018).

Para evaluar de forma global las concentraciones de los contaminantes, en 1986 se creó un índice de calidad del aire denominado “Índice Metropolitano de Calidad de Aire” (IMECA). Este índice mide la concentración en ppm o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , de acuerdo con el contaminante de que se trate y la convierten a una escala de 0 a 500 puntos en la que un valor de 100 corresponde al valor máximo aceptado por las normas de calidad del aire y el valor de 500 puntos representa niveles de contaminación que producen daños evidentes a la salud (Vallejo et al., 2002). La Tabla I, presenta los Índices Metropolitanos de la Calidad del Aire (IMECA) relacionados con los posibles efectos a la salud humana.

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

IMECA	Calidad del aire	Efectos a la salud humana
0-100	Dentro de la norma Satisfactoria	Ninguno
101-200	No satisfactoria	Molestias en ojos, nariz y garganta en personas sensibles
201-300	Mala	Posibles problemas respiratorios por actividad al aire
301-500	Muy mala	Los síntomas anteriores se agudizan, especialmente en personas sensibles como bebés, personas de la tercera edad, fumadores y personas que padecen enfermedades respiratorias crónicas

Fuente: (Trejo, 2006).

## 2.2. Fuentes de Contaminación del Aire

Los contaminantes en la atmósfera provienen principalmente de dos fuentes: fenómenos naturales y actividades humanas, también llamada antropogénicas. En fuentes naturales se encuentran fenómenos geoquímicos, biológicos y atmosféricos; mientras que en las antropogénicas incluyen procesos industrializados de producción, quema de combustibles para la calefacción y generación de energía eléctrica y el uso de vehículos con motores de combustión interna (Cabanillas y Rodríguez, 2014).

La contaminación del aire representa el mayor riesgo ambiental para la salud. En 2012, una de cada nueve muertes fue el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación del aire. De esas muertes, alrededor de 3 millones son atribuibles únicamente a la contaminación del aire ambiente (exterior). La contaminación del aire afecta a todas las regiones, entornos, grupos socioeconómicos y grupos de edad. Si bien todas las personas que

viven en un área determinada respiran el mismo aire; sin embargo, existen importantes diferencias geográficas en la exposición a la contaminación del aire (WHO, 2016).

### **2.3. Tipos de Contaminantes de Aire**

Los contaminantes del aire se pueden clasificar en dos grupos: Los contaminantes primarios y secundarios. Los contaminantes primarios en la atmósfera son aquellos que se emiten directamente. Un ejemplo de contaminante primario es el dióxido de azufre, que daña directamente la vegetación y es un irritante pulmonar (Cabanillas y Rodríguez, 2014).

Gran parte de los casos son los contaminantes secundarios, que actúan sobre los contaminantes primarios o incluso sobre especies no contaminantes en la atmósfera por medio de procesos químicos atmosféricos. Por lo general, los contaminantes secundarios son producidos por la tendencia natural de la atmósfera a oxidar los gases traza de ella, el ácido sulfúrico, que es un contaminante secundario, se genera por oxidación del contaminante primario  $\text{SO}_2$ , mientras que el contaminante secundario  $\text{NO}_2$ , se produce cuando se oxida el contaminante primario  $\text{NO}$ . Uno de los contaminantes secundarios más importantes en la troposfera es el ozono ( $\text{O}_3$ ), cuya materia prima es el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) (Cabanillas y Rodríguez, 2014).

#### **2.3.1. Material Particulado**

El material particulado es una mezcla compleja de sustancias en estado líquido o sólido, que permanece suspendida en la atmósfera por periodos variables de tiempo. Por su origen, las partículas pueden definirse como primarias (aquellas producidas directamente por alguna fuente contaminante) o secundarias (las que se forman en la atmósfera, como resultado de la interacción química entre gases y partículas primarias) (DOF, 2014).

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 (DOF, 2014).

Parámetros en partículas menores a 10 micrómetros  $PM_{10}$

- Límite de 24 horas:  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , como promedio de 24 horas, y límite anual:  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , como promedio anual.

Partículas menores a 2.5 micrómetros  $PM_{2.5}$

- Límite de 24 horas:  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , como promedio de 24 horas, y límite anual:  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , como promedio anual.

El estudio y la regulación ambiental de las partículas empezó centrándose en las partículas suspendidas totales (PST), las cuales son menores de  $100 \mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico. Posteriormente, la atención se centró en las partículas con diámetros aerodinámicos de menos de  $10 \mu\text{m}$  ( $PM_{10}$ ), y actualmente, en las partículas ultrafinas, es decir, las de menos de  $2.5 \mu\text{m}$  ( $PM_{2.5}$ ) y  $1 \mu\text{m}$  ( $PM_1$ ). En los Estados Unidos de Norteamérica la regulación de las PST empezó en 1971, agregando normas para  $PM_{10}$  en 1987 y para  $PM_{2.5}$  en 1997. En México, la norma que regula los niveles de  $PM_{10}$  entró en vigor en 1994 y fue modificada en 2005, cuando se incluyeron las  $PM_{2.5}$  (Zuk et al., 2007).

### **2.3.2. Metales Cr, Cu, Mo y Zn**

Se considera a los metales como aquellas sustancias que ceden con facilidad los electrones más externos situados alrededor del átomo neutro. En cuanto a sus características, poseen buenas propiedades mecánicas, en las que destacan su alto grado de resistencia a la contracción, a la presión, como a la



tracción, asimismo tienen propiedades de maleabilidad y ductilidad lo que define que son capaces de formar láminas e hilos (Hoyos y Espinoza, 2013).

Los metales pesados constituyen un riesgo de contaminación en el medio ambiente, ya que son sustancias con una gran estabilidad química ante procesos de biodegradación, por lo que no desaparecen del medio ambiente, sino que son transferidos a otros lugares y pueden cambiar de estado o combinarse con otras sustancias, y en algunos casos da lugar a formas más tóxicas de metal, por lo que los seres vivos son incapaces de metabolizarlos (Corro, 2015).

Una forma opcional de nombrar a este grupo es como Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), 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, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Titanio y Zinc (Corro Espino, A., 2015).

La contaminación por metales pesados es un problema que ha ido en aumento debido principalmente a actividades antrópicas. Entre las principales fuentes de contaminación se encuentran la minería, la metalúrgica, la agricultura, los vehículos automotores y el aporte natural en ciertos acuíferos. En México, existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos, donde se ha detectado la acumulación de metales tóxicos en tejidos de peces y moluscos de consumo humano (Covarrubias y Peña, 2017).

La minería es una de las principales causas de la contaminación ambiental por metales pesados, debido principalmente al manejo inadecuado de sus residuos denominados "jales mineros", lo que ocasiona problemas de contaminación en estados como Zacatecas, San Luis Potosí, Guerrero y Sonora (Covarrubias y Peña, 2017).

La contaminación industrial, tecnológica, agropecuaria, minera y el uso indiscriminado de diversos fertilizantes químicos en el suelo con metales pesados, que se incorporan finalmente a ríos, a los vegetales, animales y alimentos alteran la sostenibilidad de la cadena trófica, provocando riesgos potenciales en la naturaleza y en la sociedad, debido a que originan serios problemas en la salud humana y animal. La presencia en un alto porcentaje de metales pesados como: arsénico, cadmio, mercurio, plomo, entre otros, en el ambiente contribuye en aumentar los índices de la problemática mencionada (Londoño et al., 2016).

#### **2.4. Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire**

La exposición al aire contaminado del exterior es asociada a un amplio espectro de salud crónica y aguda. Según la definición de salud por parte de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2000), todas estas consecuencias son potencialmente relevantes para la evaluación del impacto a la salud.

Recientemente un comité de la American Thoracic Society (ATS, 2000) identificó una amplia gama de efectos sobre la salud respiratoria asociados a la contaminación del aire que deberían considerarse “adversos” abarcando consecuencias de muerte por enfermedades respiratorias que reducen la calidad de vida, e incluyen algunos cambios irreversibles en la función fisiológica. En general, la frecuencia de aparición de la consecuencia en la salud está inversamente relacionado con su gravedad. Esto sugiere que el impacto total probablemente exceda lo contribuido por los resultados menos frecuentes, más graves y, en algunos casos, puede estar dominado por los menos graves, pero más frecuentes (WHO, 2000). La Figura 1, representa la proporción de la población afectada por la contaminación del aire; mientras que la figura 2, presenta la severidad de salud en función de la contaminación del aire. En la Tabla II, se presenta los efectos a la salud potencialmente pertinentes para la evaluación del impacto en la salud por la contaminación del aire.

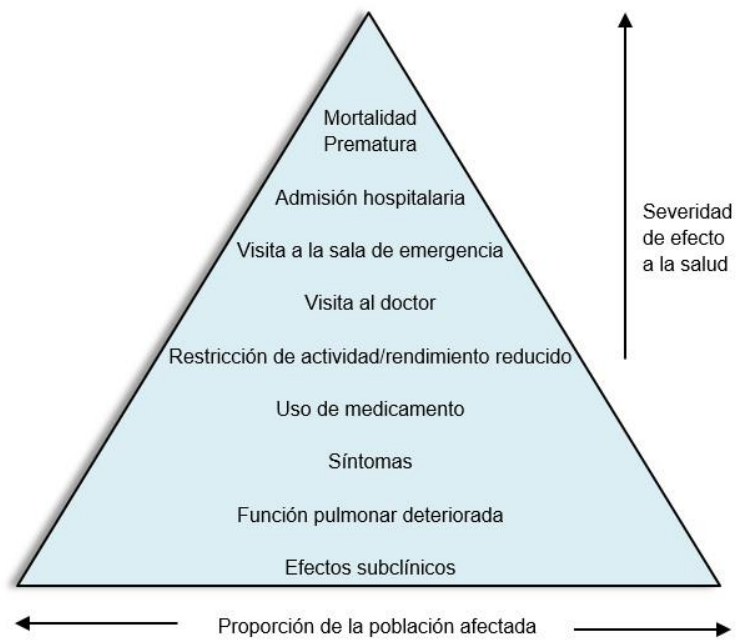


Figura 1. Pirámide de efectos a la salud por la contaminación del aire (WHO, 2000).

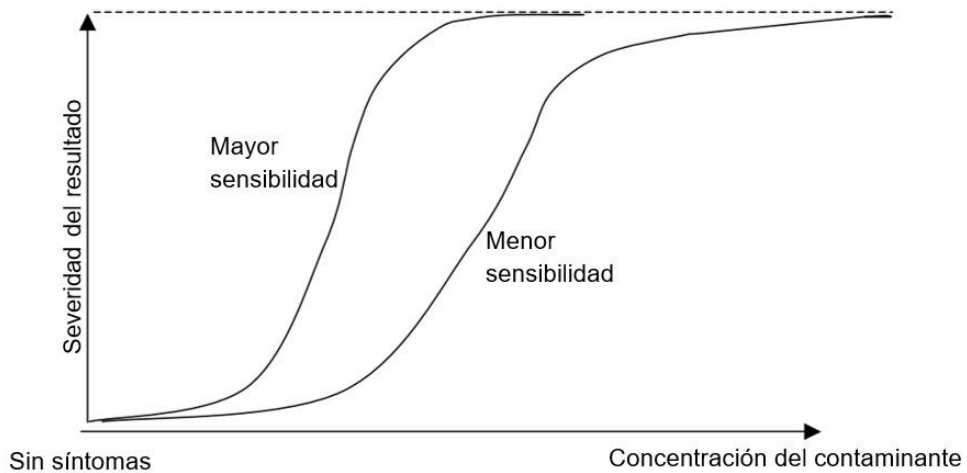


Figura 2. Severidad de salud en función de la contaminación del aire y la sensibilidad del sujeto (WHO, 2000).

Tabla II. Efectos a la salud potencialmente pertinentes para la evaluación del impacto en la salud por la contaminación del aire.

Efectos agudos	Mortalidad diaria
	Admisiones al hospital por problemas respiratorios
	Admisiones al hospital por problemas cardiovasculares
	Visitas de emergencia por condiciones respiratorias y cardiacas
	Uso de medicamento respiratorio y cardiovascular
	Días de actividad restringida
	Ausencia a trabajar
	Ausencia a la escuela
	Automedicación
	Síntomas agudos
	Cambios fisiológicos
Efectos de enfermedades crónicas	Mortalidad (en niños y adultos) por enfermedades crónicas cardio-respiratorias
	Incidencia y prevalencia en enfermedades crónicas respiratorias (incluyendo asma, Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica, cambios crónicos patológicos)
	Cambios crónicos en las funciones fisiológicas
	Cáncer de pulmón
	Enfermedades crónicas cardiovasculares
Efectos reproductivos	Complicaciones en el embarazo (muerte fetal)
	Bajo peso al nacer
	Parto prematuro

Fuente: WHO, 2000.

#### 2.4.1. Material Particulado

La exposición a material particulado en el aire ambiente supone unos de los principales riesgos para la salud humana en el ámbito de la contaminación atmosférica. Para la determinación de sus efectos es fundamental la

distribución de tamaños, ya que las partículas más pequeñas penetran con mayor facilidad en los alvéolos pulmonares, y la composición química de las mismas, que determina diferentes niveles de toxicidad (Santamaría, 2011).

El material particulado penetra en el organismo por las vías respiratorias y las partículas profundizan más o menos en función de su diámetro. Así, las partículas inhalables (diámetro inferior a 100  $\mu\text{m}$ ) quedan retenidas en las vías respiratorias altas (nariz y boca); las partículas torácicas (diámetro inferior a 10 micras, también denominadas  $\text{PM}_{10}$ ) penetran más allá de la laringe y alcanzan la región traqueo bronquial, y las partículas respirables, debido a su pequeño tamaño (diámetro inferior a 4  $\mu\text{m}$ ), son capaces de acceder hasta la región de intercambio de gases (alvéolos pulmonares) (Santamaría, 2011).

Por ejemplo, el material particulado puede recorrer largas distancias en la atmósfera y provocar un amplio espectro de enfermedades y una reducción significativa de la esperanza de vida en la población europea. Los principales efectos vinculados a la exposición al material particulado son aumento en la frecuencia de cáncer pulmonar, muertes prematuras, síntomas respiratorios severos, irritación de ojos y nariz, exacerbación del asma y agravamiento en caso de enfermedades cardiovasculares. Asimismo, su acumulación en los pulmones puede originar enfermedades como la silicosis y la asbestosis (Santamaría, 2011).

#### **2.4.2. Metales**

La evaluación del peligro de metales en el aire ambiente se vuelve difícil por varias razones. Debido a que los organismos siempre han sido expuestos a metales, a diferencia de las sustancias sintéticas orgánicas, por lo que han desarrollado distintos mecanismos de respuesta a los metales. Existen grandes diferencias entre la persistencia de metales o compuestos metálicos inorgánicos en el cuerpo y la persistencia de compuestos orgánicos. Los metales no son creados ni destruidos por procesos químicos o biológicos, pero

pueden ser biotransformados de una especie química a otra. Es decir, el ion metálico que se cree que es responsable por la toxicidad del metal puede persistir en el cuerpo, independientemente de cómo es metabolizado el metal. Algunos metales son considerados esenciales para la función metabólica normal, que es uno de los factores primordiales que diferencian la evaluación de riesgos para metales y compuestos metálicos de los químicos orgánicos sintéticos. La exposición a metales en el aire es capaz de causar una gran cantidad de efectos a la salud humana, estos van desde la inflamación cardiovascular y pulmonar hasta el cáncer y daño de órganos vitales (Geiger y Cooper, 2010).

Investigaciones contemporáneas sobre la contaminación del aire revelan que los componentes metálicos del material particulado están contribuyendo significativamente a efectos adversos a la salud, incluso en concentraciones bajas encontradas en el aire ambiente. Aunque se ha probado la toxicidad de la materia particulada, investigaciones emergentes proporcionan evidencia de que las partículas metálicas pueden resultar más peligrosas que otros componentes del material particulado. De hecho, la evidencia actual nos muestra que la concentración de masa de material particulado sola puede no ser el mejor índice para asociar los efectos sobre la salud por la exposición al material particulado (Geiger y Cooper, 2010).

#### **2.4.2.1. Cromo**

Se encuentra naturalmente en el ambiente, cuya exposición a altos niveles ocurre principalmente por inhalación en el aire por la producción de ferrocromos, refinado de minerales, procesamiento químico y refractario. La ingesta diaria promedio del aire está estimada para ser menos de 200 a 400 nanogramos, en promedio la concentración en el aire es de 3 ng/m<sup>3</sup>, medida en 13 ciudades de los Estados Unidos. El nivel máximo de cromo medido en aire ambiente cerca de una planta de fabricación de cromato en Corpus,

Christi, Texas, fue 5,500 ng/m<sup>3</sup> con una concentración promedio anual en aire ambiente de 400 ng/m<sup>3</sup> (Geiger y Cooper, 2010).

Los efectos a corto plazo de la inhalación de Cromo (VI) incluyen dificultad para respirar, tos, sibilancias y otros efectos en el tracto respiratorio. El Cromo (VI) es mucho más tóxico que el Cromo (III) y tanto su inhalación como ingesta pueden causar efectos gastrointestinales que incluyen dolor abdominal, vómitos y hemorragia (Geiger y Cooper, 2010).

Los efectos a largo plazo de la exposición a la inhalación de cromo (VI) incluyen efectos en el tracto respiratorio, incluyendo perforaciones y ulceraciones del tabique, bronquitis, disminución de la función pulmonar, y neumonía. Asma, picazón nasal y dolor han sido reportado; la exposición al cromo también puede producir efectos en el hígado, riñón, gastrointestinal y los sistemas inmunes, y posiblemente la sangre. La exposición al cromo (VI) puede resultar en complicaciones durante el embarazo y el parto. El Cromo (VI) inhalado está claramente vinculado a un mayor riesgo a sufrir cáncer de pulmón, estudios con animales han demostrado que el cromo (VI) causa tumores pulmonares. Cromo (VI) clasificado como grupo A por la EPA, carcinógeno humano conocido por vía de inhalación (Geiger y Cooper, 2010).

#### **2.4.2.2. Cobre**

El cobre es un metal que se produce naturalmente en todo el medio ambiente, en rocas, suelo, agua y aire. El cobre es un elemento esencial en plantas y animales (incluidos humanos). El promedio de la concentración de cobre medido en 13 ciudades alrededor de los Estados Unidos de América es de 3 ng/m<sup>3</sup>. Los efectos en la salud a corto plazo de la inhalación de polvo, vapores y nieblas de sales de cobre pueden resultar en irritación de las membranas mucosas nasales, irritación ocular, irritación del tracto respiratorio superior; sabor metálico, náuseas y fiebre de humos metálicos. La intoxicación aguda de cobre puede causar daño hepático, metahemoglobinemia y anemia

hemolítica. Efectos de la exposición única seguido de suicidio o la exposición accidental oral se ha reportado como sabor metálico, dolor epigástrico, dolor de cabeza, náuseas, mareos, vómitos, diarrea, taquicardia, dificultad respiratoria, anemia hemolítica, hemorragia gastrointestinal masiva, insuficiencia hepática y renal, y muerte (Geiger y Cooper 2010).

Por otra parte, los mamíferos tienen mecanismos eficientes para regular las reservas de cobre de manera que generalmente están protegidos contra los niveles excesivos de cobre en la dieta; sin embargo, a niveles suficientemente altos, la sobreexposición crónica al cobre puede dañar el hígado y los riñones. La exposición crónica también puede resultar en una anemia. La enfermedad pulmonar del rociador de viñedos, una enfermedad pulmonar y hepática, ocurre en personas expuestas al aerosol de sulfato de cobre durante 2 a 15 años. La enfermedad de Wilson es hereditaria, trastornos genéticos en los cuales el cobre se acumula en el hígado; los síntomas incluyen toxicidad hepática (ictericia, hinchazón, dolor) por lo general no aparecen hasta la adolescencia (Geiger y Cooper 2010).

Aunque algunos estudios de trabajadores expuestos al cobre han mostrado un mayor peligro de cáncer, el cobre actualmente se clasifica como Grupo D, no clasificable como cancerígeno en humanos (Geiger y Cooper 2010).

### **2.4.2.3. Molibdeno**

Toxicidad. Signos tempranos de neumoconiosis fueron encontrados por Mogilevskaja en la radiografía de tórax de una mujer mayor de 44 años y en un hombre adulto de 44 años. Descubrimientos radiológicos completamente desarrollados de neumoconiosis se notaron en un hombre de 34 años después de 7 años de exposición, donde la mayoría de las partículas de polvo se encontraban por debajo de 5 micras de diámetro. Los 3 sujetos, que se encontraban entre 19 trabajadores, tenían problemas respiratorios variables (U. S. Environmental Protection Agency, 1979).



La hiperuricemia inducida por molibdeno fue reportada por Kowalski y otros en 1961 entre los habitantes de una provincia rica en molibdeno en Armenia. Se observaron deformidades articulares, eritema y edema de las áreas articulares; hubo hepatomegalia y también se informaron trastornos renales y gastrointestinales. La hiperuricemia e hiperuricosuria se demostraron en 17 sujetos. Se encontraron elevaciones de los niveles de molibdeno en la sangre en los sujetos enfermos, acompañados por disminuciones en las concentraciones de cobre en la sangre. La hiperuricemia también se menciona en otros dos estudios en los EE. UU. Acompañado por artralgias y elevaciones de los niveles séricos de bilirrubina, colesterol y globulina entre los trabajadores de las plantas de cobre-molibdeno. Muchos trabajadores se quejaron de síntomas no específicos tales como debilidad, fatiga, dolores de cabeza, irritabilidad, falta de apetito, dolores de estómago, pérdida de peso, piel irritada, mareos y temblor. El autor concluyó que la exposición al molibdeno estaba acompañada por el deterioro de las funciones del sistema nervioso central (U. S. Environmental Protection Agency, 1979).

Un estudio de exposición industrial se realizó en una planta de tostado en Denver, donde el sulfuro de molibdeno se convierte en óxidos de molibdeno. Entre los trabajadores siete no tenían quejas; seis habían incurrido en una infección respiratoria superior en las dos semanas anteriores; seis se quejaron de dolores de espalda y articulaciones; otros cuatro se quejaron de dolores en las articulaciones; y otros cuatro de dolores de espalda solos. La diarrea fue mencionada por cinco trabajadores, los dolores de cabeza por cuatro, y los cambios no específicos de cabello o piel por ocho de los trabajadores. La prueba de función pulmonar fue normal en 22 de los 25 trabajadores, pero hubo evidencia de enfermedad pulmonar obstructiva leve en tres sujetos. Los recuentos sanguíneos completos fueron normales, pero los trabajadores industriales demostraron aumentos significativos en la ceruloplasmina sérica y aumentos más leves en los niveles séricos de ácido úrico (U. S. Environmental Protection Agency, 1979).

#### 2.4.2.4. Zinc

El zinc es un oligoelemento esencial, necesario para las plantas, animales y microorganismos. Se reportó una concentración media de zinc de 103 ng/m<sup>3</sup> en aerosol (tamaño de partícula de 0,01 a 1,0 µm) recolectado en Detroit, Michigan, en agosto de 1996. La concentración atmosférica media anual de zinc fue de 5 µg/m<sup>3</sup> cerca de una fundición de plomo en Kellogg, Idaho, y los valores de 24 horas oscilaron entre 0.27 y 15.7 µg/m<sup>3</sup> (Geiger y Cooper, 2010).

Efectos a corto plazo. El zinc es un elemento esencial en nuestra dieta. Muy poco zinc puede causar problemas, pero demasiado zinc también es dañino. Los efectos nocivos generalmente comienzan en niveles 10-15 veces más altos que la cantidad necesaria para una buena salud. Las dosis grandes por vía oral, aunque sea por poco tiempo, pueden causar cólicos estomacales, náuseas y vómitos. La inhalación de grandes cantidades de zinc (como polvo o humo) puede causar una enfermedad específica a corto plazo llamada fiebre por humos metálicos. La exposición aguda al óxido de zinc puede provocar tos, dolor subesternal, irritación de las vías respiratorias superior, estertores, escalofríos, fiebre, náuseas y vómitos. El humo del cloruro de zinc es un irritante de los ojos, la piel, las membranas mucosas y los pulmones en los seres humanos. Los signos y síntomas de la exposición aguda al humo de cloruro de cinc incluyen conjuntivitis, irritación de la nariz y garganta, ronquera, tos, disnea, sibilancias, estertores, roncus, opresión en el pecho y/o dolor, náuseas, vómitos, dolor epigástrico, apatía, aturdimiento, y un sabor metálico en la boca (Geiger y Cooper, 2010).

Efectos a largo plazo. Las concentraciones excesivas de zinc tomadas a largo plazo pueden causar anemia y disminuir los niveles de lipoproteínas de alta densidad. La exposición crónica al óxido de zinc por contacto con la piel puede provocar erupciones cutáneas papular-pustulosas en la axila, el muslo interno, el brazo interno, el escroto y las áreas púbicas. La absorción excesiva de zinc suprime la absorción de cobre y hierro (Geiger y Cooper, 2010).

La Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) ha declarado que el zinc daña los receptores nerviosos en la nariz, lo que puede causar anosmia (pérdida del sentido del olfato). Los estudios epidemiológicos de los trabajadores de las refinerías de zinc no encontraron correlación entre la exposición al zinc industrial y el cáncer de pulmón u otro tipo de cáncer. Sobre la base de información incompleta de estudios en humanos y animales, la EPA ha determinado que el zinc no es clasificable en cuanto a su carcinogenicidad humana (Geiger y Cooper, 2010).

## **2.5. Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire**

Los máximos permisibles son valores de concentración para compuestos o elementos contaminantes, que han sido establecidos para garantizar que mientras las condiciones ambientales se encuentren por abajo de éstos, no existe peligro 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).

### 2.5.1. Valores Máximos Permisibles para PM<sub>2.5</sub>

Desde 1971, la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés) ha establecido normas nacionales de calidad del aire ambiente (NAAQS por sus siglas en inglés) para definir concentraciones diarias y anuales promedio de partículas en la atmosfera. Desde 1997, dos tamaños de partículas se han regulado para proteger la salud: PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Las agencias de EE.UU. y Unión Europa han establecido normas en las forma de promedios anuales y diarios. Así, la USEPA tiene una norma que se cumple cuando el promedio de las concentraciones medias de tres años consecutivos (medidas en estaciones fijas de monitoreo atmosférico) no rebasan el límite establecido. De igual manera, para el límite de 24 horas se utiliza el promedio de tres años de cada estación de monitoreo, con un intervalo de confianza de 98% a 99%, el cual no debe rebasar el límite preestablecido (Rojas y Garibay, 2003).

En México, la Secretaría de Salud (SSA) es la dependencia encargada de establecer las normas para la calidad del aire. En el caso de las partículas, dicha Secretaría emitió la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 que establece una concentración promedio de 24 horas de 45 µg/m<sup>3</sup> y una concentración promedio de 12 µg/m<sup>3</sup> para 1 año para PM<sub>2.5</sub>. A su vez, la NAAQS (Primario) establece para una concentración promedio de 24 horas de 35 µg/m<sup>3</sup> y una concentración promedio anual de 15 µg/m<sup>3</sup>. Se estableció una concentración de 25 µg/m<sup>3</sup> como promedio anual máximo en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Por ultimo, la Organización Mundial de la Salud recomienda una concentración máxima de 10 µg/m<sup>3</sup> en promedio anual y una concentración promedio de 24 horas de 25 µg/m<sup>3</sup>. En la Tabla III, se muestran los valores referencia para material particulado 2.5 micras según distintas dependencias internacionales.

Tabla III. Valores referencia para material particulado 2.5 micras según distintas dependencias internacionales.

Contaminante	Periodo	Guía de calidad OMS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diario Oficial de las Comunidades Europeas $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Primario NAAQS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NOM-025-SSA1-2014 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM <sub>2.5</sub>	1 año	10	25	15	12
	24 horas	25	-	35	45

Fuente: Elaboración Propia.

## 2.5.2. Valores Máximos Permisibles para Metales

### 2.5.2.1. Cromo

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos ha establecido límites legales en el aire del trabajo de  $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$  cromo (VI),  $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$  para cromo (III) y  $1.0 \text{ mg}/\text{m}^3$  para cromo (0) como promedios durante una jornada diaria de 8 horas. Por otra parte, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (NIOSH) recomienda un límite de exposición de  $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$  para cromo metálico y compuestos de cromo (II) y cromo (III) en el aire como promedio durante una jornada de 8 horas diarias. El NIOSH también recomienda un límite de exposición de  $0.001 \text{ mg}/\text{m}^3$  para compuestos de cromo (VI) en el aire como promedio durante una jornada diaria de 10 horas (ATSDR, 2012). En México no existe ninguna norma ambiental que establezca máximos permisibles de este metal en el aire ambiente.

### 2.5.2.2. Cobre

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos ha establecido un límite de  $0.1$  miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) para vapores de cobre (generados al calentar el cobre) y  $1.0 \text{ mg}/\text{m}^3$  para polvos de cobre (partículas de cobre metálico muy pequeñas) y aerosoles de cobre

soluble en el aire del trabajo para proteger a los trabajadores durante una jornada de 8 horas diarias, 40 horas semanales (ATSDR, 2004).

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  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  según la regulación establecida en el documento GOST 17.2.3.01-86 de protección a la naturaleza, medio ambiente-regulaciones de control de calidad del aire para áreas pobladas de 1986. En México no existe ninguna norma ambiental que establezca máximos permisibles de este metal en el aire ambiente (EEA, 2004).

#### **2.5.2.3. Molibdeno**

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (OSHA) especifica la cantidad máxima admisible de exposición de molibdeno en una jornada de 8 horas de 4  $\text{mg}/\text{m}^3$  (ATSDR, 2017). En México no existe ninguna norma ambiental que establezca máximos permisibles de este metal en el aire ambiente.

#### **2.5.2.4. Zinc**

La OSHA ha establecido un límite de 1  $\text{mg}/\text{m}^3$  para vapores de cloruro de cinc y 5  $\text{mg}/\text{m}^3$  para óxido de cinc (vapores y polvo) en el aire del trabajo durante una jornada diaria de 8 horas, 40 horas a la semana. El NIOSH también recomienda que la concentración de óxido de cinc en el aire del trabajo no exceda un promedio de 1  $\text{mg}/\text{m}^3$  durante un período de 10 horas en una semana de 40 horas (ATSDR 2005). En México no existe ninguna norma ambiental que establezca máximos permisibles de este metal en el aire ambiente.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Localización geográfica del área de estudio

El presente trabajo se realizó en la ciudad de Cananea, Sonora, México, considerando los análisis de material particulado ( $PM_{2.5}$ ) y metales (Cu, Cr, Mo, Zn). En la Figura 3, se presenta la ubicación del municipio de Cananea en el Estado de Sonora y la estación de muestreo. En la Figura 4, se puede apreciar la ubicación del monitor Tecnológico de Cananea (TEC).

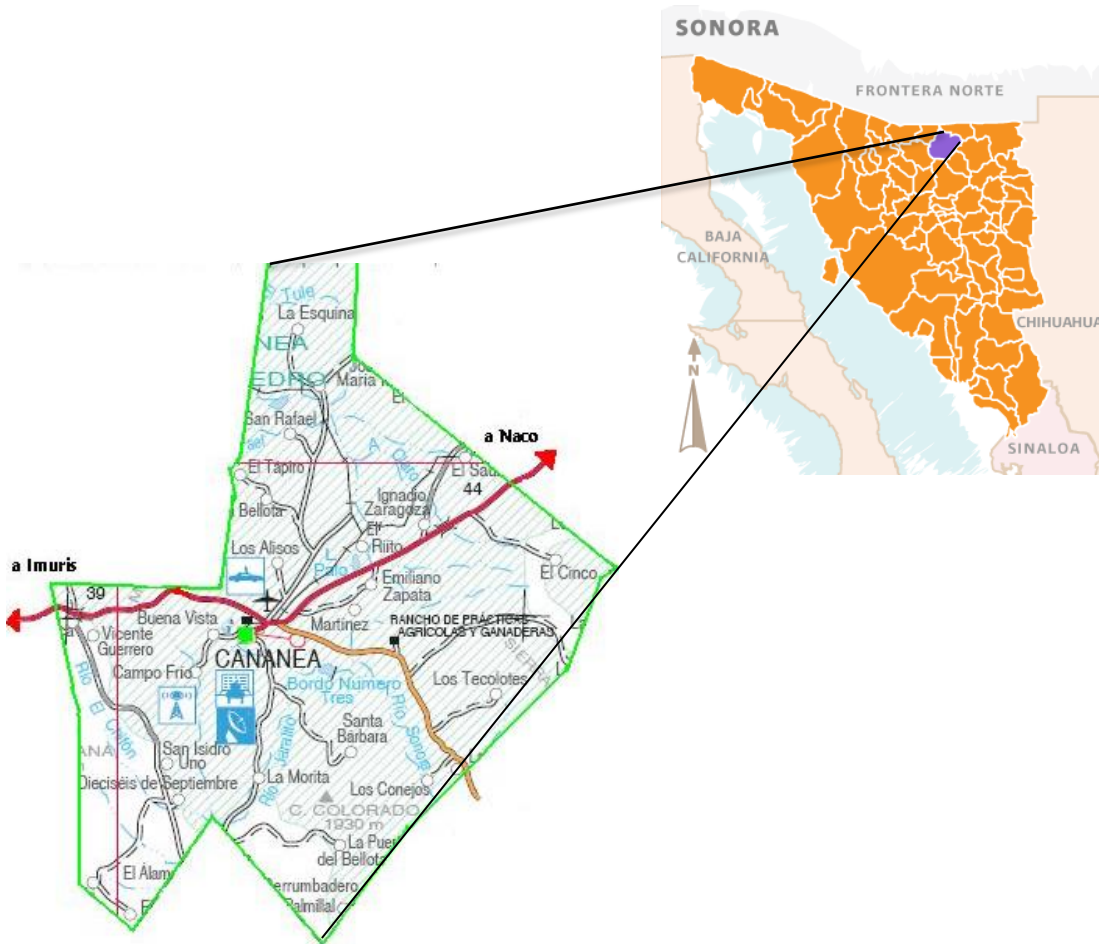


Figura 3. Área de estudio y la estación de muestreo (H. Ayuntamiento de Cananea, s.f.).



Figura 4. Ubicación del monitor Tecnológico de Cananea (TEC) (H. Ayuntamiento de Cananea, s.f.).

### 3.1.1. Cananea, Sonora

El municipio de Cananea está ubicado al norte del estado de Sonora, México, su cabecera es la población de Cananea y se localiza en el paralelo 30°58' de latitud norte y a los 110°17' de longitud oeste del meridiano de Greenwich; a una altura de 1654 metros sobre el nivel del mar. Los municipios al norte de Cananea colindan con los Estado Unidos y Cananea colinda con los siguientes municipios: al noroeste con Naco, al sur con Arizpe, al suroeste con Bacoachi, y al oeste con Imuris y Santa Cruz (H. Ayuntamiento de Cananea, s.f.).

### 3.1.2. Climatología

El municipio de Cananea presenta un clima semicálido subhúmedo C (w)(x)a(e), 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 una precipitación media anual de 545 mm. 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, presentándose también en forma de nieve (H. Ayuntamiento de Cananea, s.f.).

### **3.1.3. Principales Ecosistemas**

Flora. La vegetación de pastizal es predominante en casi la totalidad de la extensión territorial, también existe 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.

Fauna. La fauna del municipio 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 (H. Ayuntamiento de Cananea, s.f.).

### **3.1.4. Características y Uso del Suelo**

En el municipio se localizan los siguientes tipos de suelo:

- Feozem: se sitúa en el noreste del municipio, presenta fase física pedregosa, tiene una cara superficial obscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes. En condiciones naturales tienen cualquier tipo de vegetación, su susceptibilidad a la erosión depende de la pendiente del terreno.

- Litosol: se ubica 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. Su susceptibilidad a la erosión depende de la pendiente del terreno.
- Regosol: se localiza en el noroeste presentando fase física pedregosa, en el centro se presenta con fase física gravosa y en el suroeste con fase física gravosa y pedregosa; su fertilidad es variable y su uso agrícola está condicionado principalmente a su profundidad. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende de la pendiente del terreno (H. Ayuntamiento de Cananea, s.f.).

### **3.1.5. Población**

Según resultados de la Encuesta Intercensal 2015 realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el municipio de Cananea cuenta con una población de 35,892 habitantes (INEGI, 2015).

## **3.2. Procedimiento de Muestreo**

La Red Estatal de Infraestructura e Información sobre Calidad del Aire 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 material particulado ( $PM_{2.5}$ ), 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 anual 2018, para el análisis de  $PM_{2.5}$  y metales (Cr, Cu, Mo, Zn).

El método de muestro utilizado fue el de alto volumen (Hi-Vol) establecido en la norma NOM-035-ECOL-1993; el cual permite medir la concentración de

material particulado 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. La velocidad de flujo del aire ambiente y la geometría del muestreador son tales que favorecen la recolección de partículas hasta de 50 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) de diámetro aerodinámico, dependiendo de la velocidad del viento y su dirección. Los filtros usados deben tener una eficiencia de recolección mínima del 99 % para partículas de  $0.3 \mu\text{m}$ . La Figura 5 representa un muestreador de alto volumen (Hi-Vol), así como el monitor localizado en el Tecnológico de Cananea.

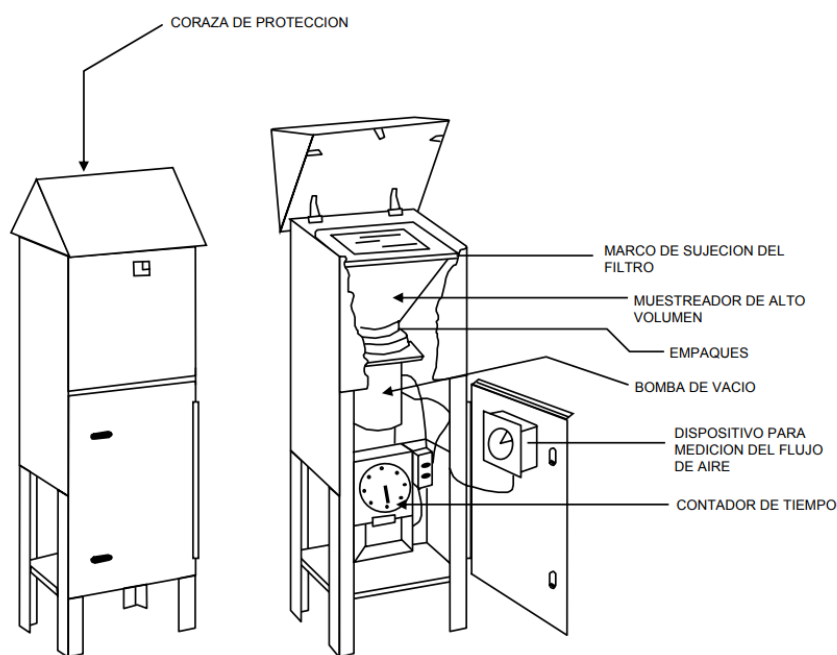


Figura 5. Muestreador de alto volumen (Hi-Vol) y monitor Tecnológico de Cananea (TEC) (DOF 1993).

### **3.3. Análisis de Laboratorio**

El material utilizado en el laboratorio se sometió a un estricto control para evitar una posible contaminación de las muestras enfocadas a material particulado de 2.5 micras. 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 desionizada, se secó y se guardó en bolsas de plástico para su posterior utilización.

### **3.4. Material Particulado 2.5 Micras**

El método utilizado para la determinación de material particulado 2.5 micras corresponde al procedimiento señalado en la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993; el cual coincide con el método establecido en la normatividad de EUA (CFR 40, 1992). En este método, el filtro se pesa en el laboratorio bajo condiciones de humedad y temperatura controladas, antes y después de su uso, para determinar su ganancia neta de peso (masa). El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia, se determina a partir del flujo de aire ambiente medido y del tiempo de muestreo. La concentración de material particulado en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa de las partículas recolectadas entre el volumen de aire muestreado y se expresa en microgramos por metro cúbico patrón ( $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{ptn}}$ ), corregidos a las condiciones de referencia.

### **3.5. Metales Pesados Totales (Cr, Cu, Mo y Zn)**

La metodología para la determinación de metales (Cr, Cu, Mo y Zn) en el aire ambiente, fue 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 PM<sub>2.5</sub>, se realizó la determinación de metales en los filtros limpios (blancos) y en los expuestos (muestras). Los metales del material particulado muestreado fueron solubilizados por extracción ácida con una concentración de ácido nítrico para posteriormente ser analizado por 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:

$$C = \frac{\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} * \frac{100\text{mL}}{\text{tira}} * 12 \text{ tiras} * \text{filtro}\right) - Fb}{V_{STP}} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$C = \text{concentración}, \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} = \text{Lectura registrada por el Equipo de Absorción Atómica}$$

$$100\text{mL tira} = \text{Volumen total de muestra.}$$

$$12 \text{ tiras} = \text{Área total del filtro utilizable, } 8'' \times 9''; \text{ área expuesta de una tira, } \frac{3}{4}'' \times 7''$$

$$\text{Filtro} = \text{Área total de una tira, } \frac{3}{4}'' \times 8''$$

$$Fb = \text{Concentración de filtro } \mu\text{g (Blanco)}$$

$$V_{STP} = \text{Volumen del aire total filtrado en } \text{m}^3$$

### 3.6. 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-2015) y en la Environmental Protection Agency (EPA, 1998). El procedimiento de control consistió en un estricto control de los siguientes puntos:

1. Limpieza de los Equipos de Muestreo. 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 desionizada, se secó y se guardó en bolsas de plástico para su posterior utilización.
2. Procedimientos de Calibración y Frecuencia. El equipo analítico de laboratorio 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 los metales.

### 3.7. Indicadores de Calidad de los Datos

#### 3.7.1. Precisión

La precisión describe la reproducibilidad de los resultados; es decir, la concordancia entre los valores numéricos de dos o más mediciones repetidas o que se han efectuado exactamente de la misma forma (Skoog et al., 2008). En el presente trabajo se evaluó la precisión mediante el análisis de réplicas de análisis repetidos de una muestra o estándar (CNA, 1993). La desviación estándar absoluta; S, describe la dispersión de las mediciones individuales alrededor de la media y viene dada por la Ec. (2) (Harley, 2009):

$$Precisión = \frac{(a-b)}{\left(\frac{a+b}{2}\right)} * 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

*a = Valor mayor del análisis de los dos duplicados*

*b = Valor menor del análisis de los dos duplicados*

### 3.7.2. Exactitud

La Exactitud describe si un resultado experimental es correcto, expresado como la cercanía de la medición a un valor verdadero o aceptado (Skoog et al., 2008). Los resultados obtenidos en la presente investigación se expresan como porcentaje de recuperación en la siguiente Ec. (3):

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{b}{a} \times 100 \quad (3)$$

*a* = Concentración adicionada a la muestra

*b* = Concentración medida en la muestra

En la presente investigación, se llevaron a cabo determinaciones de tres muestras de concentración conocida de estándares de alta pureza analítica, 0.5, 1.0 y 2.0 ppm para cada uno de los metales estudiados, los cuales se analizaron al inicio, intermedio y final del análisis de las muestras. Se utilizó el criterio de aceptación de  $\pm 16\%$  como porcentaje de diferencia utilizado por la EPA (1998).

### 3.7.3. Límite de Detección del Instrumento (L.D.)

En la presente investigación se utilizó el criterio del Límite de Detección, como la cantidad de concentración del analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco (YB), más tres veces la desviación estándar del blanco (SB) (Miller & Miller, 1993), y se representa con la siguiente Ec. (4):

$$YLDI = YB + 3SB \quad (4)$$

### **3.8. Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire Utilizados en Metales para la Presente Investigación**

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

**Cobre.** La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2010), fija un valor máximo permisible de cobre en aire de  $0.290 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Cromo.** La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2010), establece un valor máximo permisible de cromo en aire de  $0.020 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Molibdeno.** La Asociación de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR, 2017), establece un valor máximo permisible de Molibdeno en el aire de  $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Zinc.** La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2010), establece un valor límite para la fracción respirable de Zinc de  $0.103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



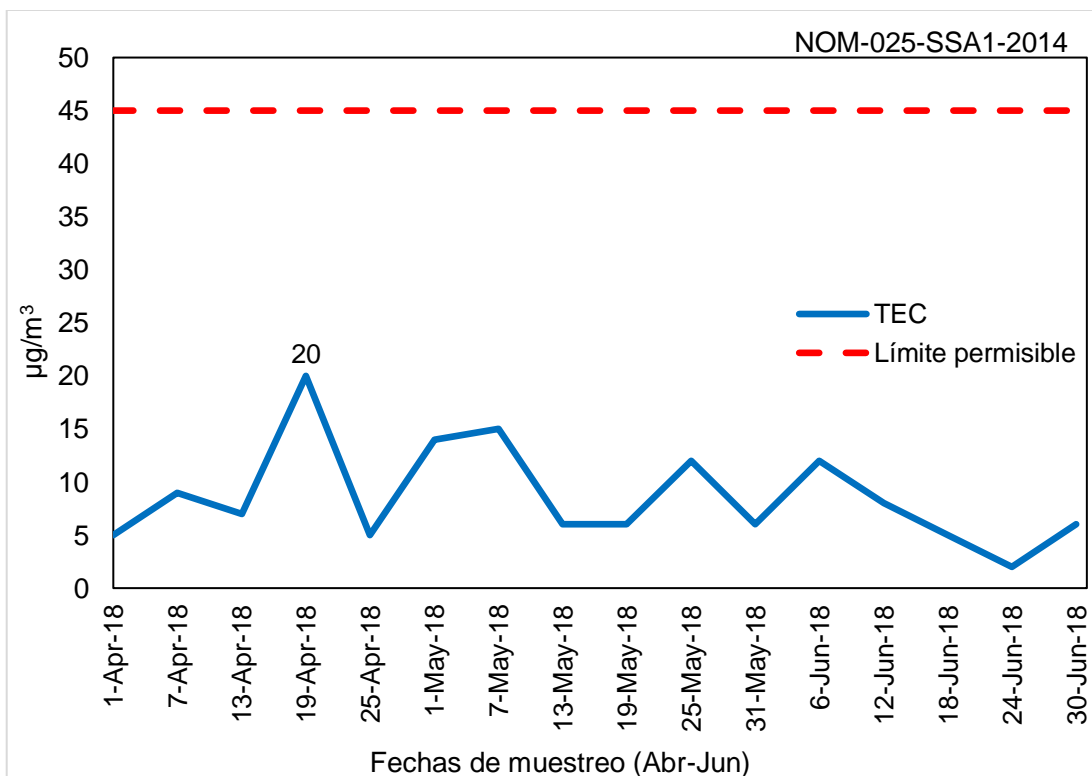
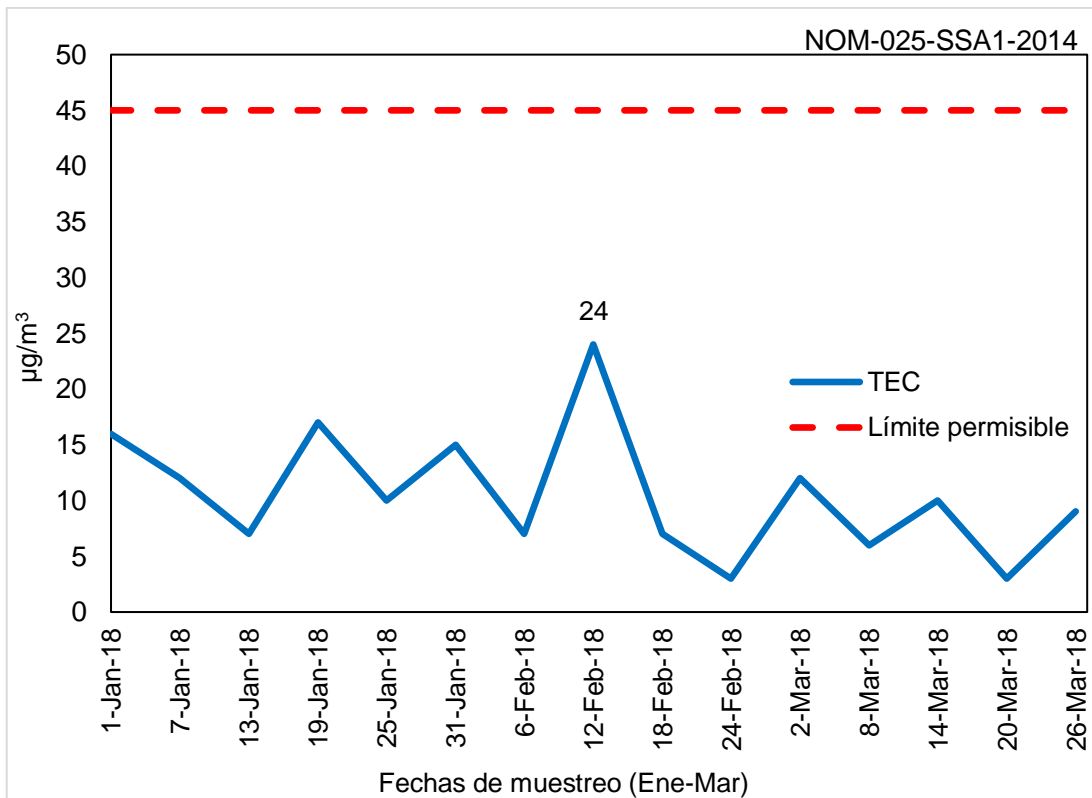
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Calidad del Aire Ambiente por PM<sub>2.5</sub>

La cobertura de datos fue buena ya que no se perdió ninguna muestra durante el ciclo anual 2018, donde se evaluaron 61 muestras y todas fueron válidas y dieron un promedio anual para PM<sub>2.5</sub> en monitor TEC de 9.7 µg/m<sup>3</sup>, por lo que en base a la NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 no representa riesgo a la salud por exposición crónica nociva, considerando el valor normativo promedio anual de 12 µg/m<sup>3</sup>. En cuanto a la exposición aguda, en el primer trimestre se alcanza una concentración máxima de material particulado de 24 µg/m<sup>3</sup>, en el segundo trimestre la concentración máxima registrada fue de 20 µg/m<sup>3</sup>, para el tercer trimestre se reportó una concentración máxima de 13 µg/m<sup>3</sup>, y en el último y cuarto trimestre se registra una concentración máxima de 45 µg/m<sup>3</sup>, por ende en ningún día durante el ciclo anual 2018 se excede el límite normado promedio diario (DOF, 2014). En base a los datos anteriores, el material particulado no representa un riesgo a la salud por exposición aguda ni crónica a la población cercana al monitor Tecnológico de Cananea.

Una posible causa de la alta concentración del último trimestre en el día 3 de diciembre se puede deber a alguna tolvanera, la cual se puede asociar a las tormentas de tierra que se dan en los desiertos, probablemente haya alcanzado el noreste de la ciudad ocasionando este incremento de material particulado debido a la región en la que se encuentra ubicada la ciudad de Cananea, Sonora.

La información trimestral del año 2018 sobre la calidad del aire ambiente por PM<sub>2.5</sub> en el monitor TEC, Cananea, Sonora, puede observarse de las Figuras 6 a 19



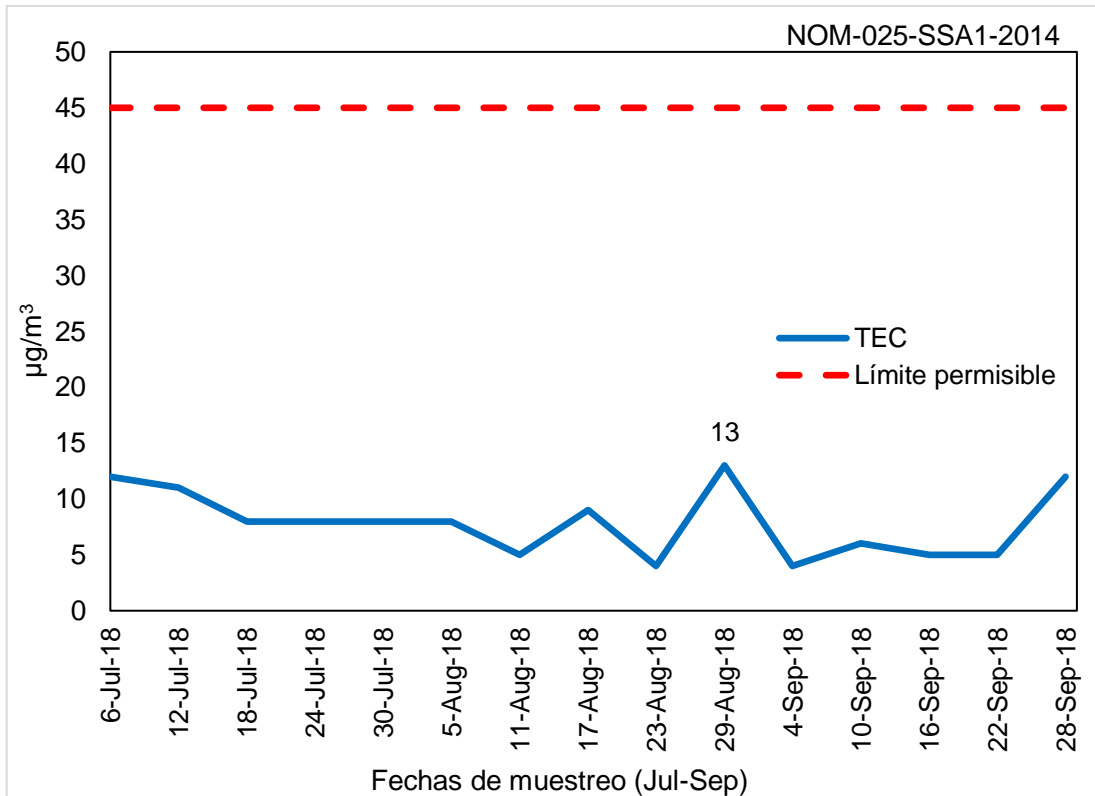


Figura 8. Comportamiento de las PM<sub>2.5</sub> en el trimestre julio-septiembre.

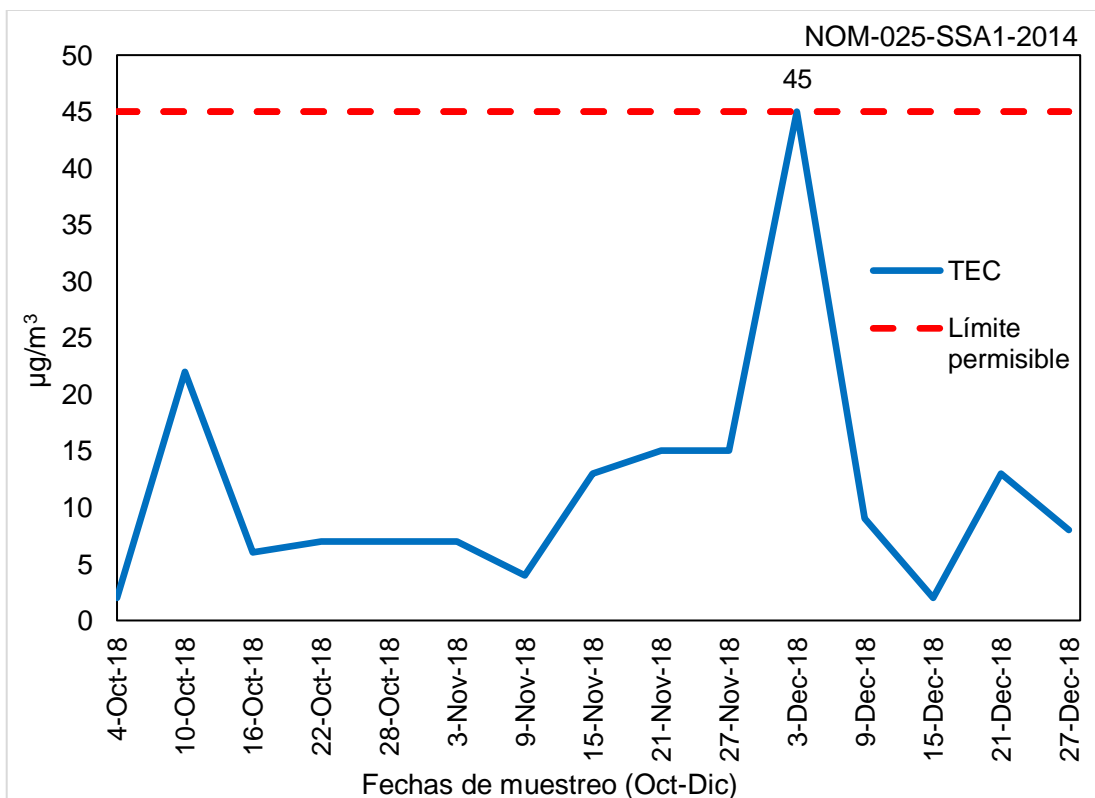


Figura 9. Comportamiento de las PM<sub>2.5</sub> en el trimestre octubre-diciembre.

## **4.2. Comportamiento de los Metales en PM<sub>2.5</sub>**

El Cr y Mo se encuentran por debajo del límite de detección del método de cuantificación. El cobre presenta un valor máximo de 0.041  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el trimestre de julio a septiembre. Para el caso del zinc, se registra un valor máximo de 0.141  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 0.171  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en los trimestres de abril a junio y octubre a diciembre. La información trimestral del año 2018 sobre la calidad del aire ambiente por PM<sub>2.5</sub> en el monitor TEC, Cananea, Sonora, puede observarse de las Figuras 6 a 9.

La información trimestral sobre el comportamiento de los metales ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en PM<sub>2.5</sub> en aire ambiente en Tecnológico, Cananea, Sonora, se presentan desde la Figura 10 a 13.

## **4.3. Comparación de Metales con Máximos Permisibles (PM<sub>2.5</sub>)**

### **4.3.1. Cromo**

En México no existe normatividad para este metal. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2010), establece un valor máximo permisible de cromo en aire de 0.020  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la Figura 10 se puede observar que la totalidad de los resultados son menores al límite de detección (0.013  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Este metal no ha sido detectado en las muestras de material particulado de aire ambiente en el monitor Tecnológico, Cananea, por lo que se asume que no representa peligro a la salud durante el ciclo anual del 2018. En la Figura 10, se observa la concentración de cromo (menor al límite de detección 0.013  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el año 2018 en relación a su límite permisible.

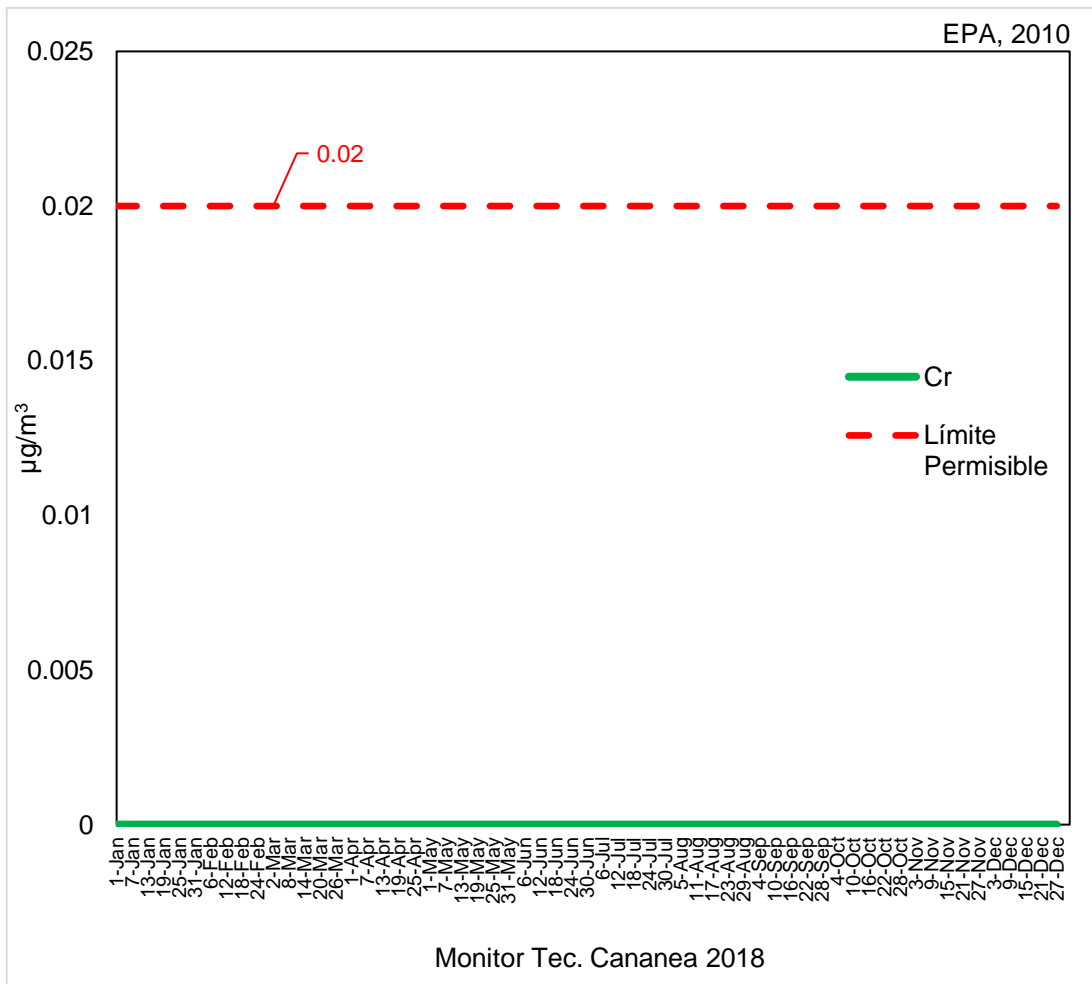


Figura 10. Concentración de cromo durante el año 2018.

#### 4.3.2. Cobre

En México no existe norma sobre calidad del aire para este metal. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2010), fija un valor máximo permisible de cobre en aire de  $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El día 22 de septiembre, se observó el valor máximo en el ciclo anual de  $0.041 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por ende los resultados de la concentración de cobre obtenidos durante el ciclo anual 2018 no rebasan el valor normado, por lo que no existe peligro a la salud por este metal en la población cercana al monitor Tecnológico, Cananea. En la Figura 11, se puede observar la concentración de cobre durante el año 2018 en comparación con su límite permisible.

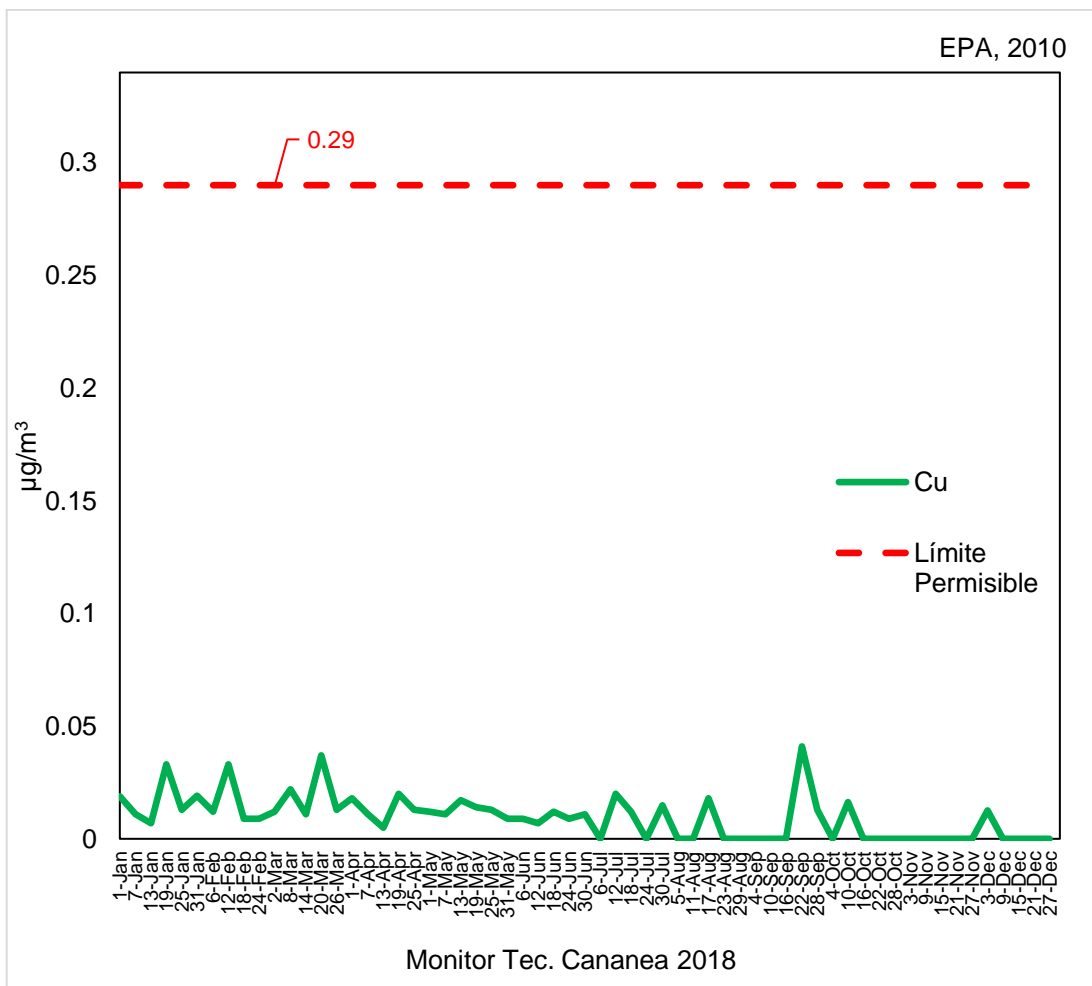


Figura 11. Concentración de cobre durante el año 2018.

#### 4.3.3. Molibdeno

La concentración de este metal se reporta inferior al límite de detección para el ciclo anual 2018. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2017) establece un valor límite de  $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No existe en México valor normativo para este elemento. Debido a que este metal no se registra por arriba del límite de detección ( $0.002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), puede establecerse que el área de estudio Tecnológico, Cananea está libre del peligro a la salud por exposición a este elemento químico. En la Figura 12, se puede observar la concentración de molibdeno durante el año 2018 en comparación con su límite permisible.

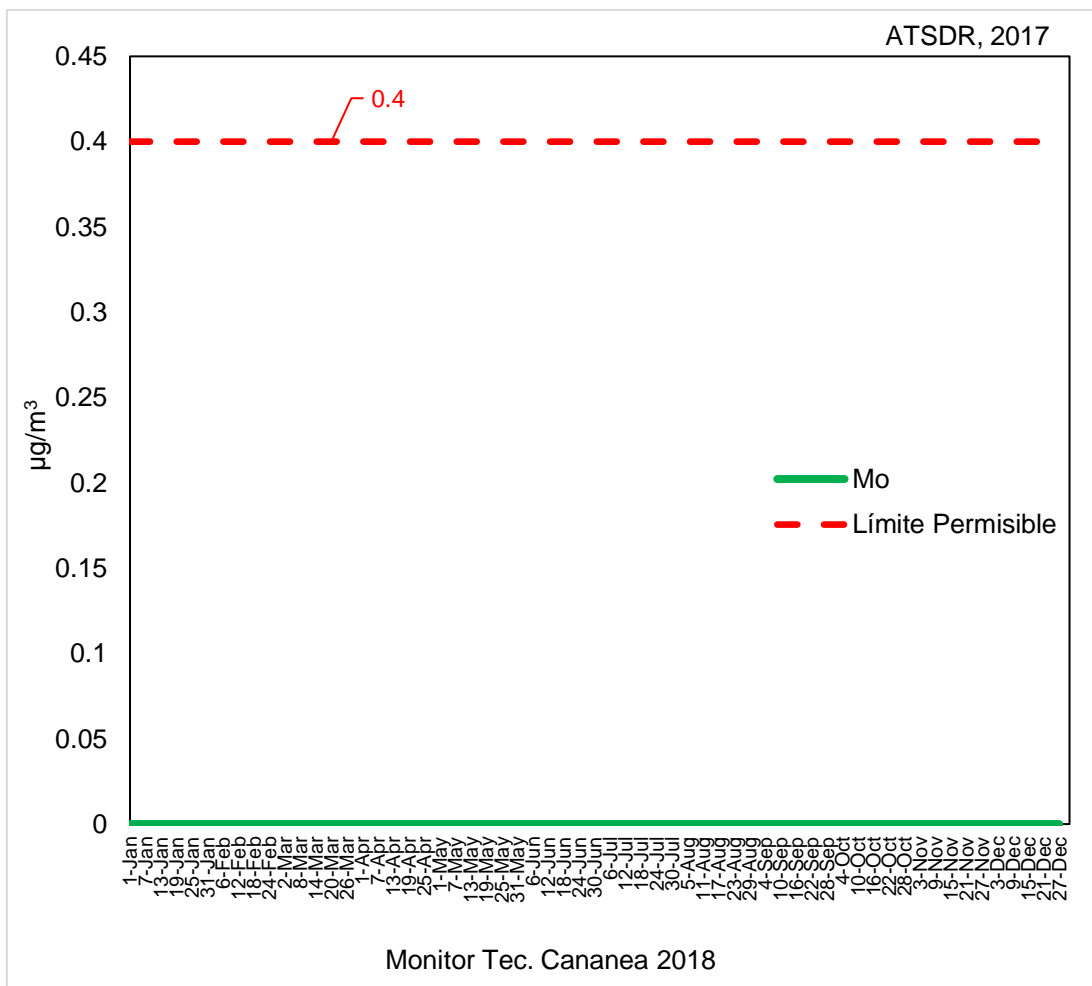


Figura 12. Concentración de molibdeno durante el año 2018.

#### 4.3.4. Zinc

Para el caso del zinc, tampoco tiene un referente de exposición permisible en aire ambiente en México. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2010), establece un valor límite de  $0.103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El día 12 de junio, se presenta el segundo mayor valor de  $0.141 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el día 3 de diciembre se presenta el valor máximo de  $0.171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ambos valores se encuentran por encima de los valores máximos permisibles, por lo que puede establecerse que en el área de estudio Tecnológico, Cananea presenta un peligro a la salud de la población. En la Figura 13, se muestra la concentración de zinc durante el año 2018 en comparación con su límite permisible.

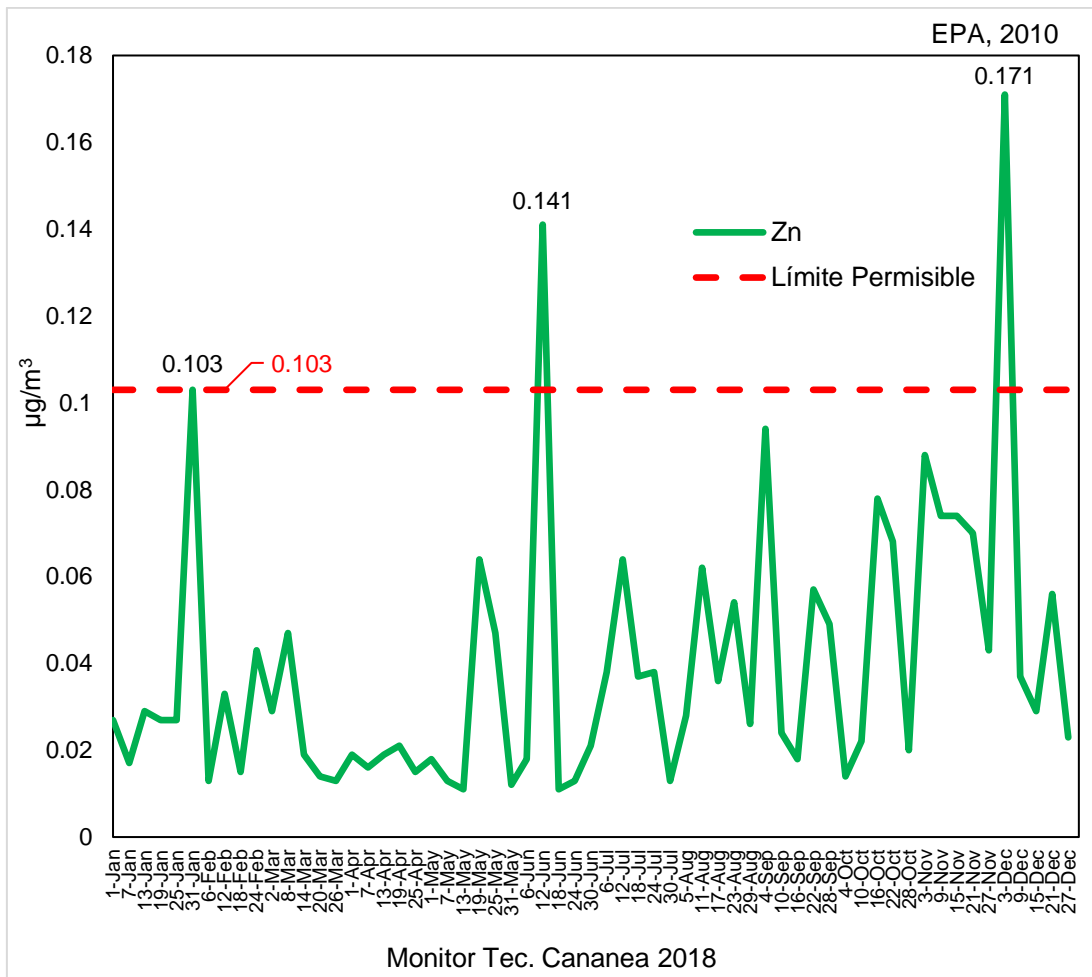


Figura 13. Concentración de zinc durante el año 2018.

#### 4.4. Direcciones Preferenciales de los Vientos Durante el año 2018

De las Figuras 14 a 17, se da referencia a la dirección preferencial de los vientos en el sitio en estudio. La procedencia de los vientos durante el trimestre comprendido de enero a marzo de 2018, presentan una predominancia de rango que va de SSW-SW, cuyo porcentaje de datos corresponde a un 43%, seguida de una dirección secundaria que es NNW-N con un 21% del total de los datos.



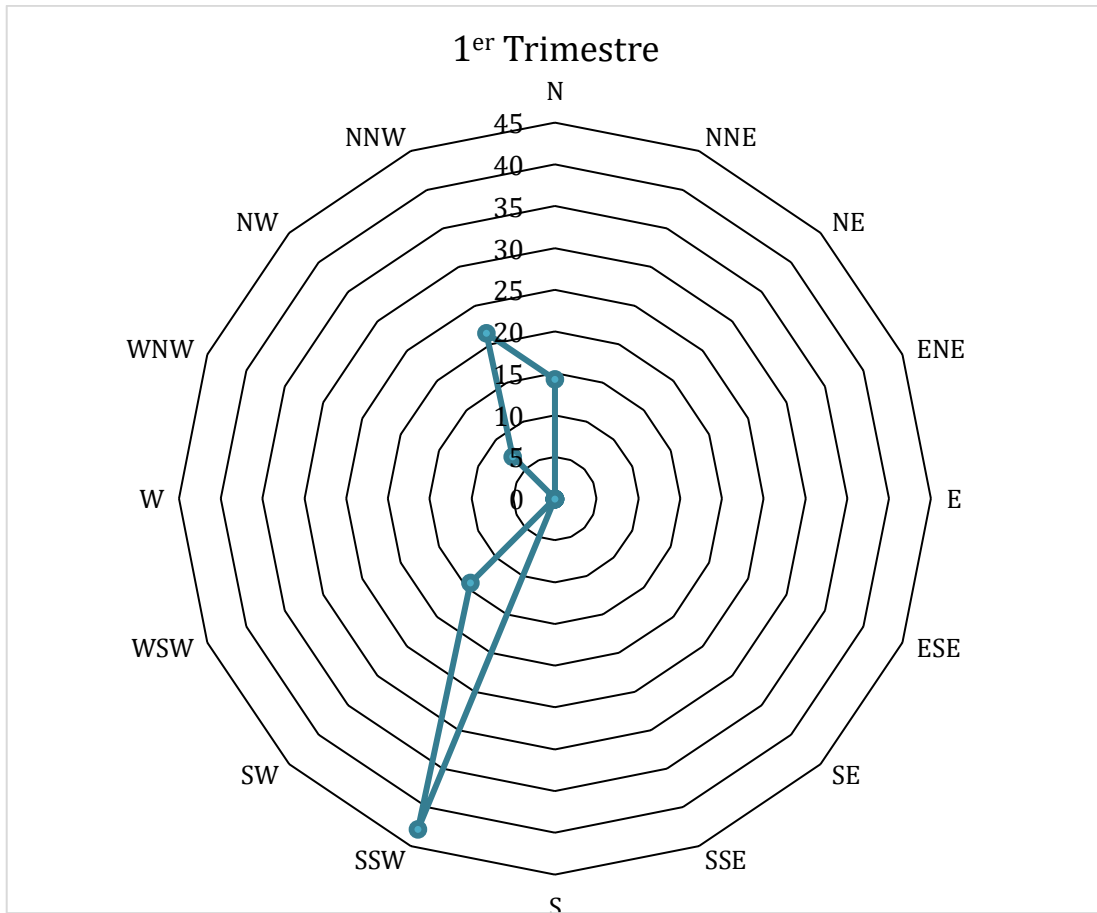


Figura 14. Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre enero-marzo de 2018.

Para este mismo trimestre, las velocidades de viento promedio que se encontraron fueron del rango de 1 m/s a 5 m/s en un 43%.

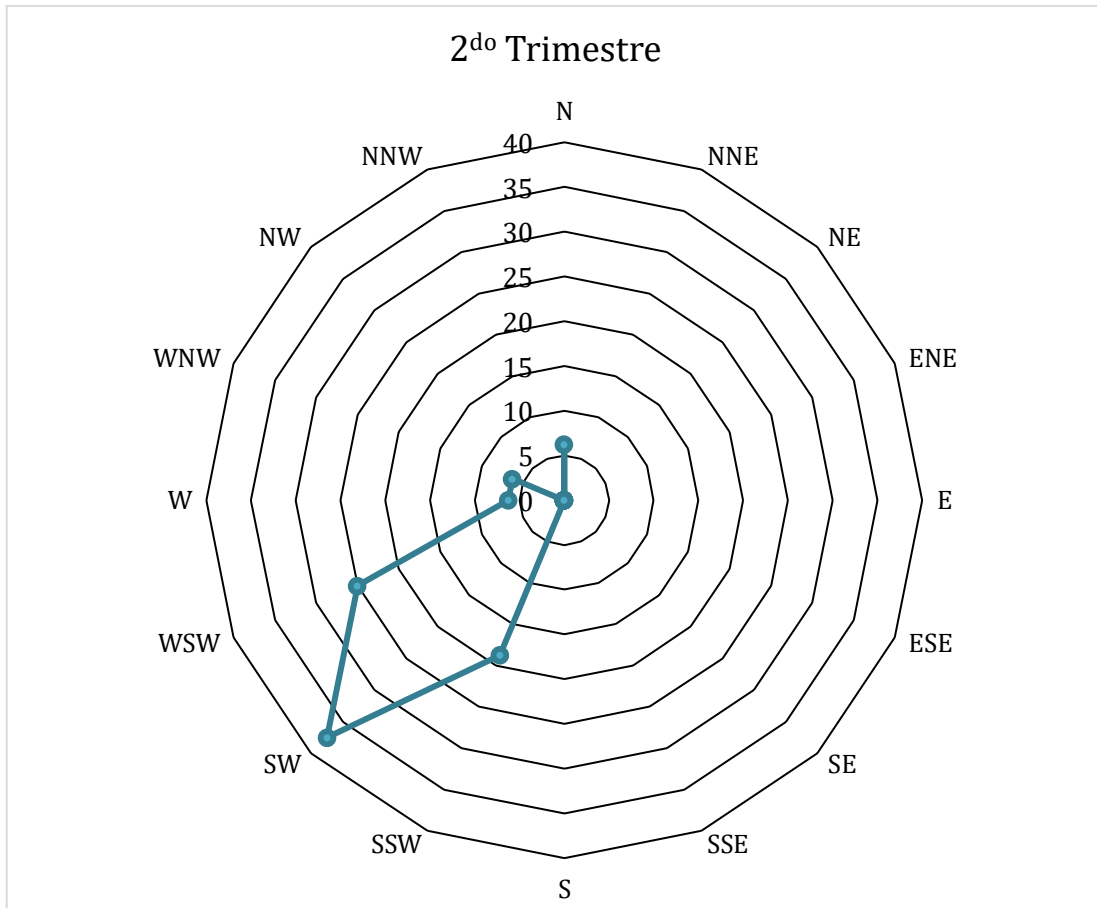


Figura 15. Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre abril-junio de 2018.

La procedencia de los vientos durante el trimestre comprendido de abril a junio de 2018, la dirección preferencial de procedencia de los vientos es del SW en un 37.5%, seguida de una dirección secundaria que es WSW con un 25% del total de los datos. Para este mismo trimestre, las velocidades de viento promedio que se encontraron fueron del rango de 11 m/s a 15 m/s en un 47%.

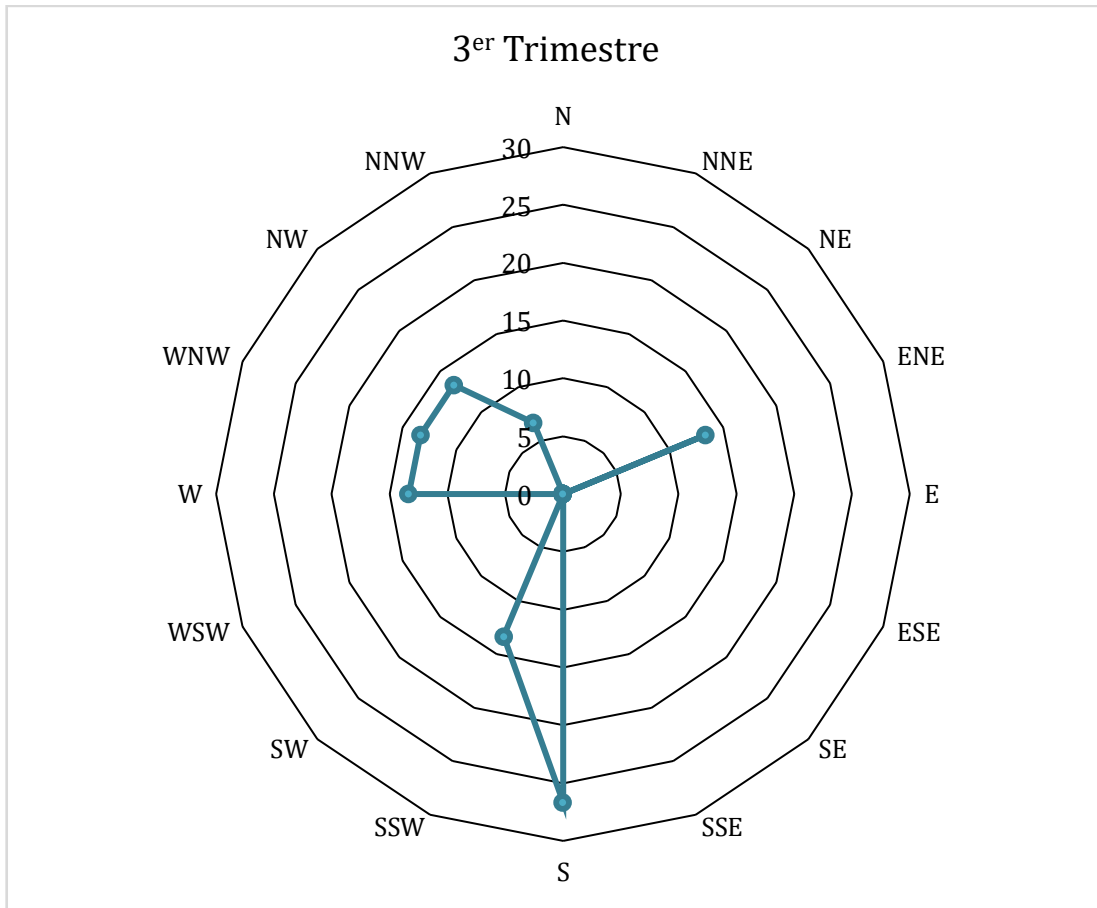


Figura 16. Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre julio-septiembre de 2018.

Para el trimestre julio-septiembre de 2018, el 57% de los datos registran las velocidades de viento promedio en el rango de 6 m/s a 10 m/s; por otra parte, se observa una dirección preferencial en la dirección S-SSW con un 26.7% de los datos.

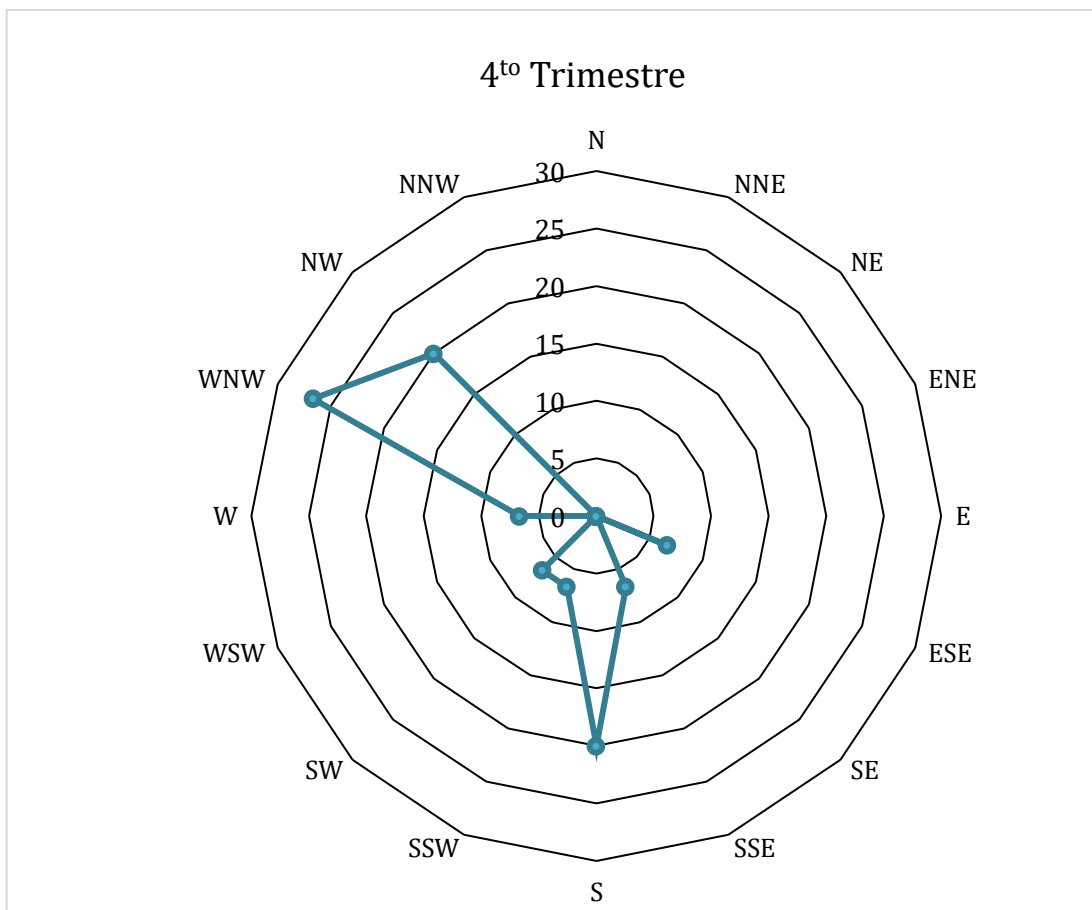


Figura 17. Direcciones preferenciales de los vientos durante el trimestre octubre-diciembre de 2018.

La procedencia de los vientos durante el trimestre comprendido de octubre a diciembre de 2018, presentan una predominancia de rango que va de WNW-NW, cuyo porcentaje de datos corresponde a un 26.7%. Para este mismo trimestre, las mayores velocidades de viento promedio que se encontraron fueron del rango de 6 m/s a 10 m/s en un 46%.

#### 4.5. Comparación de $PM_{2.5}$ Respecto a Datos Climatológicos

Realizando una comparación de la Figura 6 con la Tabla IV, podemos observar que parte del comportamiento del material particulado es influenciado por la velocidad de los vientos, esto se registra en el día 12 de

febrero, cuando la concentración máxima de material particulado es de 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el trimestre enero-marzo, asimismo ese día también se registra una velocidad máxima de vientos de 24 m/s en el mismo trimestre.

Tabla IV. Información climatológica de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre enero-marzo de 2018.

DÍA	VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	TEMP. (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROM. (mmHg)	PRECIP. (mm)
01/ene/18	12	NNW	14	24	764	0
07/ene/18	6	NW	15	36	762	0
13/ene/18	16	N	14	29	766	0
19/ene/18	9	SSW	14	25	762	0
25/ene/18	-	-	-	-	-	-
31/ene/18	6	NNW	17	15	761	0
06/feb/18	11	SW	15	25	761	0
<b>12/feb/18</b>	<b>24</b>	<b>SSW</b>	<b>11</b>	<b>70</b>	<b>765</b>	<b>1</b>
18/feb/18	16	SSW	12	81	760	7
24/feb/18	10	NNW	05	39	766	0
02/mar/18	9	SSW	14	28	763	0
08/mar/18	6	SW	17	16	760	0
14/mar/18	12	SSW	17	39	759	0
20/mar/18	11	N	15	17	761	0
26/mar/18	20	SSW	12	33	757	0

Analizando la Figura 7 con la Tabla V, se puede determinar que parte del comportamiento del material particulado está apoyada por la velocidad de los vientos, esto se puede observar en el día 19 de abril cuando se registra el máximo valor de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el material particulado en el trimestre abril-junio; a su vez en ese mismo día se registra la segunda mayor velocidad de

viento en el trimestre abril-junio por un valor de 20 m/s. Por otra parte, en ese mismo día se registra la humedad relativa más baja para el trimestre abril-junio, con un valor de 12% el cual favorece a la presencia de material particulado en el ambiente.

Tabla V. Información climatológica de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre abril-junio de 2018.

DÍA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	TEMP. (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROM. (mmHg)	PRECIP. (mm)
01/abr/18	10	WSW	19	18	758	0
07/abr/18	13	SW	20	25	757	0
13/abr/18	15	N	12	16	760	0
<b>19/abr/18</b>	<b>20</b>	<b>SW</b>	<b>19</b>	<b>12</b>	<b>758</b>	<b>0</b>
25/abr/18	12	WSW	23	15	759	0
01/may/18	28	SSW	15	29	756	0
07/may/18	11	W	26	19	758	0
13/may/18	19	SW	20	31	758	0
19/may/18	10	WSW	21	14	755	0
25/may/18	9	SSW	25	16	758	0
31/may/18	12	SW	25	17	755	0
06/jun/18	15	SW	27	31	754	0
12/jun/18	9	WNW	28	12	754	0
18/jun/18	10	WSW	24	34	757	0
24/jun/18	14	SW	25	46	756	0
30/jun/18	16	SSW	24	29	757	0

Desarrollando un análisis de la Figura 8 con la Tabla VI se puede observar que el día 29 de agosto se registra una concentración máxima de 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

para el trimestre julio-septiembre, en el cual también se observa la segunda mayor velocidad de viento por un valor de 8 m/s.

Tabla VI. Información climatológica de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre julio-septiembre de 2018.

DÍA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	TEMP. (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROM. (mmHg)	PRECIP. (mm)
06/jul/18	11	ENE	29	29	756	0
12/jul/18	05	SSW	22	69	759	20
18/jul/18	06	S	23	67	759	0
24/jul/18	08	NW	30	30	755	0
30/jul/18	06	ENE	25	56	757	0
05/ago/18	07	NNW	27	53	754	0.4
11/ago/18	07	NW	21	77	758	0.9
17/ago/18	05	S	24	68	759	0
23/ago/18	05	WNW	20	82	759	0.9
<b>29/ago/18</b>	<b>08</b>	<b>S</b>	<b>23</b>	<b>66</b>	<b>757</b>	<b>0.9</b>
04/sep/18	04	SSW	22	70	757	17
10/sep/18	06	W	25	47	755	0
16/sep/18	06	W	25	47	755	0
22/sep/18	08	WNW	22	58	758	0
28/sep/18	05	S	24	43	755	0

En cuanto al análisis de la Figura 9, no se encuentra una estrecha relación del comportamiento del material particulado con la velocidad de los vientos, lo cual está justificada ya que en la naturaleza y en sus fenómenos naturales no siempre se puede esperar el mismo comportamiento, sin embargo sí se puede hacer una predicción.

Tabla VII. Información climatológica de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre octubre-diciembre de 2018.

DÍA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	TEMP. (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROM. (mmHg)	PRECIP. (mm)
04/oct/18	07	SSE	21	60	757	0
10/oct/18	07	S	15	55	758	0
16/oct/18	10	NW	10	83	761	0.3
22/oct/18	05	SSW	18	75	758	0
28/oct/18	05	W	20	41	761	0
03/nov/18	04	SW	16	38	759	0
09/nov/18	05	WNW	15	46	760	0
15/nov/18	07	WNW	10	25	765	0
21/nov/18	03	ESE	13	52	764	0
27/nov/18	05	NW	12	35	763	0
03/dic/18	02	WNW	08	60	765	0
09/dic/18	07	NW	10	63	768	0
15/dic/18	05	WNW	09	27	766	0
21/dic/18	05	S	16	21	761	0
27/dic/18	09	S	05	72	760	0

#### 4.6. Comparación PM<sub>2.5</sub> en Cananea y otras Ciudades del País y del Mundo

La comparación se puede llevar a cabo haciendo un análisis de la Tabla XII donde se presentan distintas ciudades de México y del mundo y su promedio anual en ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Para la ciudad de Cananea, Sonora, se presenta un promedio anual de 9.7 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) obteniendo la media anual más baja del país;



así como también, la única ciudad del país que cumple con el parámetro de la normatividad en promedio anual ( $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en base a la NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 y lo reportado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Se puede observar que en el país de Iran la calidad del aire tiene una dualidad interesante, ya que se reporta en la ciudad de Zabol un promedio anual de  $217 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la ciudad de Arak, posee un valor de  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tabla VIII. Promedio anual de  $\text{PM}_{2.5}$ , reportado para diferentes ciudades del país y del mundo.

Concentración anual mundial ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Región	Concentración anual de cada región ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	País / Ciudad	Concentración anual de cada país ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
38.4	África	36.7	Egipto (a)	101.8
			Algeria (a)	26
			Angola (a)	42.8
			Kenia (a)	16.9
			Nigeria (a)	38.9
	América	14.5	México (a)	20.6
			Michoacán, Morelia (b)	13
			Yucatán, Mérida (b)	15
			Hidalgo, Pachuca (b)	12
			Ciudad de México (b)	25
			Cananea (c)	9.7
			Chile (a)	25.5
			Brasil (a)	11.9

Tabla VIII. (Continuación).

			Estados Unidos (a)	8.5
			Canada (a)	7.3
	Mediterráneo Oriental	62.9	Turquía (a)	35.7
			Siria (a)	34.3
			Italia (a)	18.6
			Grecia (a)	12.7
			Libia (a)	58.5
	Europa	18.2	Portugal (a)	9.6
			Francia (a)	12.7
			Finlandia (a)	7.1
			Noruega (a)	9.1
			Polonia (a)	25.8
	Sureste de Asia	60.2	Tailandia (a)	25.7
			Indonesia (a)	18.8
			Singapur (a)	17
			Malasia (a)	16.7
			China (a)	61.8
	Pacífico Oeste	49.2	Australia (a)	5.8
			Camboya (a)	25
			Timor (a)	15
Vietnam (a)			28.7	

Referencia:

(a) WHS, 2016

(b) INECC, 2016

(c) Estudio actual

#### **4.7. Comparación Metales en Cananea y otras Ciudades del País y del Mundo**

En la Tabla XIII se presenta la concentración promedio y máxima de los metales estudiados en aire ambiente ( $PM_{2.5}$ ) en el monitor Tecnológico Cananea, en comparación con los metales estudiados en el aire ambiente en otras regiones del mundo.

Para el caso del cromo en Cananea, se encuentra en condición de no detectable. Este valor está muy por debajo de los estándares internacionales para aire ambiente al igual que todas las ciudades reportadas en la Tabla XIII. El caso del Molibdeno se encuentra muy por debajo del límite permisible, por lo que no existe peligro a la salud por este metal en la población cercana al monitor Tecnológico, Cananea. Para el caso del Zinc se registra un valor promedio de  $0.0396 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el cual se encuentra por abajo del límite permisible de  $0.103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, presenta un valor máximo de  $0.171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el cual se encuentra por arriba del límite permisible. Sin embargo, dicho valor se encuentra por debajo de los valores reportados para las ciudades de Agra, India; Pamplona y Ciudad de México; las cuales detectaron valores de  $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

Tabla IX. Concentraciones promedio y máxima de metales ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en  $\text{PM}_{2.5}$  en aire ambiente detectadas en el monitor Tecnológico, Cananea, Sonora, en comparación con otros sitios del país y del mundo.

CIUDAD	DATO	Cr	Cu	Mo	Zn
Cananea Tecnológico, $\text{PM}_{2.5}$ (a)	Promedio	LD	0.0098	LD	0.0396
	Máxima	LD	0.041	LD	0.171
Estados Unidos (b)	Promedio	0.00203	0.00398	0.0031	0.014
Sur de California (c)	Promedio	0.015	0.075	0.075	0.026
Norte de Francia (d)	Máxima	0.00297	0.0318	-	0.0833
Agra, India (e)	Promedio	0.6	0.2	-	0.9
Corea (f)	Promedio	0.00102	0.00447	-	0.0413
Chihuahua, México (g)	Promedio	-	0.00762	-	0.0075 2
Perú (h)	Mediana	0.005	0.011	0.002	0.07
Brazil (i)	Promedio	0.0014	0.00442	-	0.0297
Ciudad de México (j)	Promedio	0	0.05	0.01	0.36
Límite de Detección (LD) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (a)		0.012	0.012	0.002	0.006
Límite Permisible		0.020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 24 h	0.290 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 24 h	0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 24 h
Referencia		1	1	2	1

LD. Límite de Detección.

(EPA, 2010). Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (1).

(ATSDR, 2017). Asociación de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (2).

Este estudio (a).

Bell et al., 2007 (b).

Na y Cocker, 2009 (c).

Ledoux et al., 2017 (d).

Kulshrestha et al., 2009 (e).

Han et al., 2015 (f).

Canseco-Lajas, 2013 (g).

Pacsi-Valdivia y Llanos-Puga, 2017 (h).

Miranda et al., 2012 (i).

Vega et al., 2004 (j).

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Material Particulado 2.5 Micras**

La población expuesta en la ciudad no se encuentra en peligro por la presencia de PM<sub>2.5</sub> tanto aguda (45 µg/m<sup>3</sup>, 24 h), como crónica (12 µg/m<sup>3</sup>, anual). La ciudad de Cananea se encuentra posicionada como la mejor ciudad del país respecto a material particulado 2.5 según datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. En cuanto a la perspectiva mundial, se encuentra por arriba de países de primer mundo como Francia, Grecia, Italia, entre otros, según las Estadísticas Mundiales de Salud (WHS 2016).

### **5.2. Metales**

El control de calidad para la cuantificación de metales: limpieza de equipos (blancos de digestión), procedimiento de calibración y frecuencia (estándares de calibración), precisión (muestras duplicadas) y exactitud (recuperación de concentración de estándares conocidos), obtuvieron resultados conforme a lo establecido en los referentes nacionales e internacionales (Norma Oficial Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001; EPA, 1998). Esto hace que la validación de los resultados sea de alta confiabilidad.

En relación a los criterios que se tomaron como referencia para el presente estudio, los metales Cu, Cr y Mo adheridos al material particulado no exceden dichos criterios, por lo que no existe peligro a la salud por exposición a estos elementos en aire ambiente; no obstante, el metal Zn adherido al material particulado exceden dichos criterios, por lo que sí existe peligro a la salud por exposición a este elemento en aire ambiente.

En el aspecto mundial, cananea y la concentración de sus metales cobre y zinc se encuentran por debajo de países como Perú, Ciudad de México y el Norte de Francia.

### **5.3. Recomendaciones**

Se recomienda continuar con los estudios de material particulado  $PM_{2.5}$  durante un nuevo ciclo anual, para seguir monitoreando el metal zinc. Asimismo, se sugiere recolectar información sobre las actividades que podrían contribuir al incremento de éste metal.

Como medida de mitigación y mejora en los resultados del monitor TEC, se puede regar las calles para tratar de disminuir el material particulado en el medio ambiente, considerar no utilizar aguas residuales o negras; así como la pavimentación de calles ayudaría a la disminución de material particulado en el medio ambiente.

Se recomienda implementar sistemas de supresión de polvos en el complejo minero con el objetivo de humectar el material de proceso para evitar que el polvo liviano se disperse al entorno y se traslade a la ciudad de Cananea, Sonora, México.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2004. Resumen de salud pública Cobre. EE. UU. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs132.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs132.pdf).

ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2005. Reseña Toxicológica del Cinc. EE. UU. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs60.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html).

ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2012. Resumen de salud pública Cromo. EE. UU. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs7.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf).

ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades) 2017. Toxicological Profile for Molybdenum. EE. UU. <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp212.pdf>.

ATS (AMERICAN THORATIC SOCIETY) 2000. What constitutes an adverse health effect of air pollution? American journal of respiratory and critical care medicine, 161: 665–673.

Bell MI, Dominici F, Ebisu K, Zeger SI, & Samet JM. (2007). Spatial and temporal variation in PM(2.5) chemical composition in the United States for health effects studies. Environmental Health Perspectives, 115, 989-95.

Cabanillas Larios, C. L. & Rodríguez Valdez, K. L. (2014) Estudio de la calidad del aire en las ciudades de Nogales, Agua Prieta, Obregón y Hermosillo. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora.

Canseco Lajas A. L. (2013) Determinación de PM<sub>2.5</sub> y metales en el aerosol urbano de la ciudad de Chihuahua, México (Tesis doctoral). Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua, México.

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

Corro Espino, A. (2015). Evaluación y Simulación de la contaminación por metales pesados en la subcuenca de la Ciénega de Chapala, Michoacán. Instituto politécnico nacional, México.

Covarrubias, S. A. & Peña Cabrales, J. J. (2017) Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. Instituto Politécnico Nacional. Rev. Int. Contam. Ambie. 33 (Especial Biotecnología e ingeniería ambiental) 7-21.

Cruz Campas, M. E., Gómez Álvarez, A., Quintero Núñez, M. & Varela Salazar, J. (2013). Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual. Rev. Int. Contam. Ambient vol.29 no.4.

Dávila-Coronado, L.G., M.E. Cruz-Campas, R. Ramírez-Leal, A.G. Villalba-Villalba y H.F. Duarte-Tagles. (2016). Monitoreo de PM<sub>10</sub> en Hermosillo, Sonora, durante el periodo 2000-2010. Tercer Congreso de Ingeniería Ambiental. ITESCA. Guaymas, Sonora, 17 y 18 de mayo de 2016.

DOF (Diario Oficial de las Comunidades Europeas) 1999. Relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:163:0041:0060:ES:PDF>.



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. México, D.F.

DOF (Diario Oficial de la Federación), 2014. NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014)

EEA (European Environment Agency) 2004. Sustainability targets and reference (STAR) database. <http://star.eea.eu.int/default.asp>.

EPA (Environmental Protection Agency) 1979. Human Health Effects of Molybdenum in Drinking Water. (803645) Recuperado de: [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=00pRAAAAMAAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=molybdenum+air+effect+on+human+health&ots=YXEeBTFOwm&sig=ECKBqTT6wNkT0wOOPL\\_9UEaKLHU#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=00pRAAAAMAAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=molybdenum+air+effect+on+human+health&ots=YXEeBTFOwm&sig=ECKBqTT6wNkT0wOOPL_9UEaKLHU#v=onepage&q&f=false).

EPA (Environmental Protection Agency) 1998. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II. Part 1. EPA-454/R-98-004. North Carolina, EE.UU.

EPA (Environmental Protection Agency) 2010. Overview of Airborne Metals Regulations, Exposure Limits, Health Effects, and Contemporary Research. EE.UU. <https://www3.epa.gov/ttnemc01/prelim/otm31appC.pdf>.

EPA (Environmental Protection Agency) 2013. The National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Particle Matter (PM): EPA's Revisions and Associated Issues. 7-5700, 4 EE.UU.

Geiger, A., Cooper, J. (2010). Overview of Airborne Metals Regulations, Exposure Limits, Health Effects, and Contemporary Research. Cooper Environmental Services LLC. pp. 16-34.

Han, Y. J., Kim, H. W., Cho, S. H., Kim, P. R., & Kim, W. J. (2015). Metallic elements in PM<sub>2.5</sub> in different functional areas of Korea: Concentrations and source identification. *Atmospheric Research* 153, 416-428.

Harley, D. (2002) *Química Analítica Moderna*. GrawHill interamericana. México DF, México. p. 20.

Hoyos Serrano, M. y Espinoza Moneada, I. (2013). Metales. *Rev. Act. Clin. Med*, 30.

H. Ayuntamiento de Cananea (s.f.) "Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México".  
<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26019a.html>.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) 2016. *Informa Nacional de Calidad del Aire*. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. p xiii-xiv.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) 2015. *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015: Sonora*. México: INEGI, c2015.

Kulshrestha, A., Satsangi, P. G., Masih, J., & Taneja, A. (2009). Metal concentration of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particles and seasonal variations in urban and rural environment of Agra, India. *Science of the Total Environment* 407, 6196-620.

Ledoux, F., Kfoury, A., Delmaire, G., Roussel, G., El Zein, A., & Courcot, D. (2017). Contributions of local and regional anthropogenic sources of metals in PM<sub>2.5</sub> at an urban site in northern France. *Chemosphere* 181, 713-724.

Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., Muñoz García, F. G. (2016). Los riegos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Rev.Bio.Agro.* vol.14, n.2, pp.145-153.

Miller, J.C y Miller, J.N. (1993). *Estadística para Química Analítica*. Ed. Addison-Wiley Iberoamericana, Wilmington, Delaware, U.S.A.

Miranda, R. M., Fatima Andrade, M., Fornaro, A., Astolfo, R., Andre, P. A., & Saldiva, P. (2012). Urban air pollution: a representative survey of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality Atmosphere and Health*. 5, 63-77.

Na, K., & Cocker, D. R. (2009). Characterization and source identification of trace elements in PM<sub>2.5</sub> from Mira Loma, Southern California. *Atmospheric Research*. 93, 793-800.

NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health) 2013. Criteria for a Recommended Standard Occupational Exposure to Hexavalent Chromium. EE.UU. [https://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-128/pdfs/2013\\_128.pdf](https://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-128/pdfs/2013_128.pdf).

NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health) 2014. Molybdenum (Soluble compound, as Mo) EE.UU. <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/moly-mo.html>.

OMS (Organización Mundial de la Salud) 2005. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Report.

OMS (Organización Mundial de la Salud) s.f. Calidad del aire (exterior) y salud. Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.

Pacsi-Valdivia, S., and Llanos-Puga, C. M., (2017). Evaluación de la composición química del material particulado PM2.5 en la Universidad Nacional Agraria La Molina., Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú. 78 (2): 210-215 DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v78i2.1058>.

Perez Fadul, L. F. y Hernandez Hernandez, L. (2006). Determinación de metales pesados en partículas respirables e identificación de fuentes de emisión, a partir de un muestreo atmosférico en la localidad de puente Aranda en la ciudad de Bogotá. Tesis de licenciatura. Universidad de la Salle.

ProAire Sonora (2017). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Sonora. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310199/23\\_ProAire\\_Sonora.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310199/23_ProAire_Sonora.pdf).

Quijano Parra, A., Quijano Vargas, M. J. & Henao Martínez, J. A., (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. Universidad de Pamplona. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90315226007>.

Rojas Bracho, L., Garibay Bravo, V. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica* (69), 39-41.

Rosario Alfaro, M. (1998). Contaminación del aire: emisiones vehiculares, situación actual y alternativas. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.

Santamaría, J. M. (2011). Efectos del material particulado en la salud. Universidad de Navarra, España. <https://www.zonahospitalaria.com/efectos-del-material-particulado-en-la-salud/>.

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

SEMARNAT. (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2011. Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México, ProAire 2011-2020.

Skoog D. A., Holler F. J. & Crouch S. R. (2008). Principios de análisis instrumental, México DF, México, Cengage Learning.

Trejo Vázquez, R. (2006). El IMECA: Indicador del Grado de Contaminación de la Atmósfera. *Conciencia Tecnológica*, (31), 50-53.

Vallejo, M., Jáuregui-Renaud, K., et-al (2002). "Efecto de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la ciudad de México". *Medigraphic*, 139(1), 61.

Vega, E., Reyes, E., Ruiz, H., García, J., Sánchez, G., Martínez-Villa, G., González, U., Chow, J. C., & Watson, J. G. (2004). Analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the Mexico City during 2000-2002. *Journal of the Air & Waste Management Association* 54, 786-798.

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

WHO (World Health Organization) 2016. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease, p 11-15.

WHS (World Health Statistics) 2016. Monitoring Health for the Sustainable development goals. Suiza. P 113-119.

Zuk, M., Tzintzun Cervantes, M. G., Rojas Bracho, L. (2007). "Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas". México, D.F.  
<https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/3erAlmanaque.pdf>.

## 7. APÉNDICES

### 7.1. Control de Calidad en el Análisis de Metales en Muestras (Filtros)

#### 7.1.1. Semestre I, 2018

Tabla 7.1.1.a. Resultados del análisis de Metales y Metaloides ( $\mu\text{g/mL}$ ) realizados en los blancos de digestión (filtros), en los muestreos realizados (Enero-Junio 2018).

Blancos	Cr	Cu	Mo	Zn
Blanco 1	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
Blanco 2	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
Blanco 3	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.009
LD (**)	0.013	0.013	0.002	0.007

\*\* = Limite de Detección

ND = No detectable

Tabla 7.1.1.b.. Parámetros de calidad utilizados en la Calibración del Equipo de Absorción Atómica.

Metal/ Metaloides*	Curvas de calibración (Rango analítico)	Límite de Detección (LD) ( $\mu\text{g/ml}$ )	Límite de Detección (LD) ( $\mu\text{g/m}^3$ )	Coefficiente de Correlación (r)
Cr	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.020	0.013	0.9999
Cu	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.020	0.013	0.9998
Mo	0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.0	0.003	0.002	0.9998
Zn	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.010	0.007	0.9999

Tabla 7.1.1.c. Resultados de muestras fortificadas con metales a tres niveles de concentración (0.50, 1.00 y 2.00 µg/mL).

Metal	Concentración µg/mL	Recuperación (%)	Concentración µg/mL	Recuperación (%)	Concentración µg/mL	Recuperación (%)
Cr	0.50	107.27	1.00	107.50	2.00	108.50
Cu	0.50	97.27	1.00	97.94	2.00	98.05
Mo	0.50	95.00	1.00	93.40	2.00	97.00
Zn	0.50	96.87	1.00	96.07	2.00	94.35

Tabla 7.1.1.d. Control de calidad en las muestras duplicadas (Porcentaje de Desviación Porcentual Relativa DPR, %).

METAL	MUESTRA A	MUESTRA B (Duplicado)	DPR %	MUESTRA A	MUESTRA B (Duplicado)	DPR %
<b>Enero-Marzo 2018</b>						
	<b>01 Enero 2018</b>			<b>31 Enero 2018</b>		
<b>Cr</b>	ND(<LD)	ND(<LD)	**	ND<LD	ND<LD	**
<b>Cu</b>	0.0192	0.0185	3.71	0.018	0.019	5.04
<b>Mo</b>	ND(<LD)	ND(<LD)	**	ND<LD	ND<LD	**
<b>Zn</b>	0.027	0.027	**	0.102	0.103	0.97
<b>Abril- Mayo 2018</b>						
	<b>25 Abril 2018</b>			<b>19 Mayo 2018</b>		
<b>Cr</b>	ND<LD	ND<LD	**	ND<LD	ND<LD	**
<b>Cu</b>	0.013	0.012	8.00	0.013	0.015	14.29
<b>Mo</b>	ND<LD	ND<LD	**	ND<LD	ND<LD	**
<b>Zn</b>	0.015	0.015	**	0.063	0.064	1.58

\*\* = Los resultados obtenidos de RPD son idénticos

ND = No detectable

LD= Límite de Detección



Tabla 7.1.1.e. Resultados de Precisión (Repetibilidad) a partir de estándares de alta pureza analizados por la técnica de absorción atómica.

Metal	Concentración (µg/mL)	X±DS	Concentración (µg/mL)	X±DS	Concentración (µg/mL)	X±DS
Cr	0.50	0.536 ±0.005	1.0	1.076±0.0 18	2.0	2.17±0.00 1
Cu	0.50	0.494±0. 006	1.0	0.979±0.0 17	2.0	1.961±0.0 18
Mo	0.50	0.475±0. 001	1.0	0.934±0.0 03	2.0	1.940±0.0 28
Zn	0.50	0.491±0. 004	1.0	0.961±0.0 17	2.0	1.887±0.0 20

$\bar{x}$  = Promedio

DS = Desviación estándar

### 7.1.2. Semestre II, 2018

Tabla 7.1.2.a. Resultados del análisis de Metales y Metaloides (µg/mL) realizados en los blancos de digestión (filtros), en los muestreos realizados (Julio- Diciembre 2018).

Blancos	Cr	Cu	Mo	Zn
Blanco 1	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.012
Blanco 2	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.010
Blanco 3	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.011
LD (**)	0.012	0.012	0.002	0.006

\*\* = Limite de Detección

ND = No Detectable

Tabla 7.1.2.b. Parámetros de calidad (rango analítico, límite de detección,

Metal/ Metaloi de*	Curvas de calibración (Rango analítico)	Límite de Detección (LD) ( $\mu\text{g/ml}$ )	Límite de Detección (LD) ( $\mu\text{g/m}^3$ )	Coefficiente de Correlación (r)
Cr	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.020	0.012	0.9999
Cu	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.020	0.012	0.9999
Mo	0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.0	0.003	0.002	0.9999
Zn	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.010	0.006	0.9999

coeficiente de correlación) utilizados en la Calibración del Equipo de Absorción Atómica.

Tabla 7.1.2.c. Resultados de metales y metaloides en muestras fortificadas con metales a tres niveles de concentración (0.50, 1.00 y 2.00  $\mu\text{g/mL}$ ).

Metal	Concentración $\mu\text{g/mL}$	Recuperación (%)	Concentración $\mu\text{g/mL}$	Recuperación (%)	Concentración $\mu\text{g/mL}$	Recuperación (%)
Cr	0.50	103.13	1.00	112.60	2.00	111.45
Cu	0.50	95.87	1.00	96.33	2.00	97.85
Mo	0.50	103.00	1.00	100.65	2.00	100.75
Zn	0.50	98.27	1.00	100.10	2.00	97.73

Tabla 7.1.2.d. Control de calidad en las muestras duplicadas (Porcentaje de Desviación Porcentual Relativa DPR, %).

METAL	MUESTRA A	MUESTRA B (Duplicado)	DPR %	MUESTRA A	MUESTRA B (Duplicado)	DPR %
<b>Julio- Septiembre 2018</b>						
	<b>12 Julio 2018</b>			<b>28 Septiembre 2018</b>		
<b>Cr</b>	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
<b>Cu</b>	0.020	0.020	**	0.012	0.013	8.00
<b>Mo</b>	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
<b>Zn</b>	0.065	0.063	3.13	0.048	0.050	4.08
<b>Octubre-Diciembre 2018</b>						
	<b>03 Noviembre 2018</b>			<b>21 Diciembre 2018</b>		
<b>Cr</b>	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
<b>Cu</b>	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
<b>Mo</b>	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
<b>Zn</b>	0.086	0.088	2.30	0.056	0.055	1.80

\*\* = Los resultados obtenidos de RPD son idénticos

ND = No detectable

Tabla 7.1.2.e. Resultados de Precisión (Repetibilidad) a partir de estándares de alta pureza analizados por la técnica de absorción atómica.

Metal/ Metaloides	Concentración (µg/mL)	$\bar{X} \pm DS$	Concentración (µg/mL)	$\bar{X} \pm DS$	Concentra ción (µg/mL)	$\bar{X} \pm DS$
Cr	0.50	0.516 ±0.005	1.0	1.126±0.016	2.0	2.229±0.078
Cu	0.50	0.479±0.011	1.0	0.96±0.012	2.0	1.96±0.020
Mo	0.50	0.515±0.004	1.0	1.00±0.033	2.0	2.02±0.035
Zn	0.50	0.491±0.008	1.0	1.001±0.020	2.0	1.954±0.018

$\bar{x}$  Promedio

DS = Desviación estándar

**7.2. Comportamiento de los Metales ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en  $\text{PM}_{2.5}$  en Aire Ambiente en Tecnológico, Cananea, Sonora, Durante el Ciclo Anual 2018.**

Tabla 7.2.a. Metales ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en  $\text{PM}_{2.5}$  en aire ambiente en Tecnológico, Cananea, Sonora, durante el trimestre enero-marzo de 2018.

Fecha de Muestreo	MONITOR TEC. CANANEA			
	Cr	Cu	Mo	Zn
01 Enero 2018 (*)	ND (<LD)	0.0188	ND (<LD)	0.027
07 Enero 2018	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)	0.017
13 Enero 2018	ND (<LD)	0.007	ND (<LD)	0.029
19 Enero 2018	ND (<LD)	0.033	ND (<LD)	0.027
25 Enero 2018	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)	0.027
31 Enero 2018 (*)	ND (<LD)	0.019	ND (<LD)	0.103
06 Febrero 2018	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)	0.013
12 Febrero 2018	ND (<LD)	0.033	ND (<LD)	0.033
18 Febrero 2018	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)	0.015
24 Febrero 2018	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)	0.043
02 Marzo 2018	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)	0.029
08 Marzo 2018	ND (<LD)	0.022	ND (<LD)	0.047
14 Marzo 2018	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)	0.019
20 Marzo 2018	ND (<LD)	0.037	ND (<LD)	0.014
26 Marzo 2018	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)	0.013
Límite de Detección, LD ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.013	0.013	0.002	0.007
Límite Permisible	$0.020 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h	$0.290 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h	$0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$0.103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h
Referencia	EPA, 2010	EPA, 2010	ATSDR 2017	EPA, 2010

(\*) = Duplicado de Campo.

ND = No Detectable.

EPA, 2010. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. ATSDR. (2017). Asociación de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades.

Tabla 7.2.b. Metales ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en  $\text{PM}_{2.5}$  en aire ambiente en Tecnológico, Cananea, Sonora, durante el trimestre abril-junio de 2018.

Fecha de Muestreo	MONITOR TEC. CANANEA			
	Cr	Cu	Mo	Zn
01 Abril 2018	ND (<LD)	0.018	ND (<LD)	0.019
07 Abril 2018	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)	0.016
13 Abril 2018	ND (<LD)	0.005	ND (<LD)	0.019
19 Abril 2018	ND (<LD)	0.020	ND (<LD)	0.021
25 Abril 2018 (*)	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)	0.015
01 Mayo 2018	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)	0.018
07 Mayo 2018	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)	0.013
13 Mayo 2018	ND (<LD)	0.017	ND (<LD)	0.011
19 Mayo 2018 (*)	ND (<LD)	0.014	ND (<LD)	0.064
25 Mayo 2018	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)	0.047
31 Mayo 2018	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)	0.012
06 Junio 2018	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)	0.018
12 Junio 2018	ND (<LD)	0.007	ND (<LD)	0.141
18 Junio 2018	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)	0.011
24 Junio 2018	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)	0.013
30 Junio 2018	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)	0.021
Límite de Detección, LD ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.013	0.013	0.002	0.007
Límite Permisible	0.020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h	0.290 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h	0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h
Referencia	EPA, 2010	EPA, 2010	ATSDR 2017	EPA, 2010

(\*) = Duplicado de Campo.

ND = No Detectable.

EPA, 2010. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. ATSDR. (2017). Asociación de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades.

Tabla 7.2.c. Metales pesados ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en  $\text{PM}_{2.5}$  en aire ambiente en Tecnológico, Cananea, Sonora, durante el trimestre julio-septiembre de 2018.

Fecha de Muestreo	MONITOR TEC. CANANEA			
	Cr	Cu	Mo	Zn
06 julio 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.038
12 julio 2018 *	ND (<LD)	0.020	ND (<LD)	0.064
18 julio 2018	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)	0.037
24 julio 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.038
30 julio 2018	ND (<LD)	0.015	ND (<LD)	0.013
05 agosto 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.028
11 agosto 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.062
17 agosto 2018	ND (<LD)	0.018	ND (<LD)	0.036
23 agosto 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.054
29 agosto 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.026
4 septiembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.094
10 septiembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.024
16 septiembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.018
22 septiembre 2018	ND (<LD)	0.041	ND (<LD)	0.057
28 septiembre 2018*	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)	0.049
Límite de Detección, LD ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.012	0.012	0.002	0.006
Límite Permisible	0.020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h	0.290 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h	0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h
Referencia	EPA 2010	EPA 2010	ATSDR 2017	EPA 2010

(\*) = Duplicado de Campo.

ND = No Detectable.

EPA, 2010. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

ATSDR. (2017). Asociación de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades.

Tabla 7.2.d. Metales pesados ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en  $\text{PM}_{2.5}$  en aire ambiente en Tecnológico, Cananea, Sonora, durante el trimestre octubre-diciembre de 2018.

Fecha de Muestreo	MONITOR TEC. CANANEA			
	Cr	Cu	Mo	Zn
04 octubre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.014
10 octubre 2018	ND (<LD)	0.0162	ND (<LD)	0.022
16 octubre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.078
22 octubre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.068
28 octubre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.020
03 noviembre 2018 *	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.088
09 noviembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.074
15 noviembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.074
21 noviembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.070
27 noviembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.043
03 diciembre 2018	ND (<LD)	0.0127	ND (<LD)	0.171
9 diciembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.037
15 diciembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.029
21 diciembre 2018 *	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.056
27 diciembre 2018	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)	0.023
Límite de Detección, LD ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.012	0.012	0.002	0.006
Límite Permisible	0.020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h	0.290 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h	0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 h
Referencia	EPA 2010	EPA 2010	ATSDR 2017	EPA 2010

\* = Duplicado de Campo.

ND = No Detectable.

EPA, 2010. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

ATSDR. (2017). Asociación de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades.

### 7.3. Calidad del Aire Ambiente por PM<sub>2.5</sub> para Ciclo Anual 2018

Tabla 7.3.a. Calidad del aire ambiente por PM<sub>2.5</sub>, trimestre enero-marzo.

FECHA DE MUESTREO	MONITOR TEC PM <sub>2.5</sub> µg/m <sup>3</sup>
01/ene/18	16
07/ene/18	12
13/ene/18	07
19/ene/18	17
25/ene/18	10
31/ene/18	15
06/feb/18	07
12/feb/18	24
18/feb/18	07
24/feb/18	03
02/mar/18	12
08/mar/18	06
14/mar/18	10
20/mar/18	03
26/mar/18	09



Tabla 7.3.b. Calidad del aire ambiente por PM<sub>2.5</sub>, trimestre abril-junio.

FECHA DE MUESTREO	MONITOR TEC PM <sub>2.5</sub> µg/m <sup>3</sup>
01/abr/18	05
07/abr/18	09
13/abr/18	07
19/abr/18	20
25/abr/18	5
01/may/18	14
07/may/18	15
13/may/18	06
19/may/18	06
25 /may/18	12
31/may/18	06
06/jun/18	12
12/jun/18	08
18/jun/18	05
24/jun/18	02
30/jun/18	06

Tabla 7.3.c. Calidad del aire ambiente por PM<sub>2.5</sub>, trimestre julio-septiembre.

FECHA DE MUESTRA	MONITOR TEC PM <sub>2.5</sub> µg/m <sup>3</sup>
06/jul/18	12
12/jul/18	11
18/jul/18	08
24/jul/18	08
30/jul/18	08
05/ago/18	08
11/ago/18	05
17/ago/18	09
23/ago/18	04
29/ago/18	13
04/sep/18	04
10/sep/18	06
16/sep/18	05
22/sep/18	05
28/sep/18	12

Tabla 7.3.d. Calidad del aire ambiente por PM<sub>2.5</sub> trimestre octubre-diciembre.

FECHA DE MUESTRA	MONITOR TEC PM <sub>2.5</sub> µg/m <sup>3</sup>
04/oct/18	02
10/oct/18	22
16/oct/18	06
22/oct/18	07
28/oct/18	07
03/nov/18	07
09/nov/18	04
15/nov/18	13
21/nov/18	15
27/nov/18	15
03/dic/18	45
09/dic/18	09
15/dic/18	02
21/dic/18	13
27/dic/18	08