



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE
AMBIENTE RESPECTO DE PARTÍCULAS
SUSPENDIDAS TOTALES (PST) Y METALES
PESADOS (Cu, Pb y Mo), PARA UN PERIODO
ANUAL EN LA CIUDAD DE CANANEA, SONORA,
MÉXICO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

GEÓLOGO

PRESENTA:

EDSON ARMANDO HERRERA RAMÍREZ

DIRECTORA:

M.C. MARÍA MARGARITA DE LA O VILLANUEVA



HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO

13 junio 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

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	vi
DEDICATORIA	vii
RESUMEN	viii
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo General.....	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION	5
3.1 Hipótesis de Trabajo.....	5
3.2 Hipótesis de Nulidad.....	5
4 ANTECEDENTES	6
5 ÁREA DE ESTUDIO	9
5.1 Ubicación Geográfica	9
5.2 Clima	11
5.3 Fisiografía.....	13
5.4 Geología	14
5.4.1 Geología regional	14
5.4.2 Geología local.....	14
5.4.3 Estratigrafía del distrito Cananea.	15
6 MATERIALES Y MÉTODOS	18
6.1 Procedimiento de Muestreo	18
6.2 Partículas Suspendidas Totales (PST)	20
6.3 Metales Pesados Totales (Cu, Pb y Mo).....	20
6.4 Control de Calidad en el Análisis de las Muestras de Filtros	21
6.5 Indicadores de calidad de los datos	22
6.5.1 Precisión	22
6.5.2 Exactitud.....	22
6.6 Límite de Detección del Instrumento (L.D.).....	23
6.7 Normas de Calidad o Criterios de Calidad del Aire.....	23
6.8 Análisis estadístico de datos	24
6.9 Índice de calidad del aire (siglas en inglés: AQI).	24
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
7.1 Valores máximos permisibles para Partículas Suspendidas Totales (PST).....	25
7.2 Análisis estadístico	27
7.2.1 Percentil 98.....	33
7.2.2 Índice de calidad del aire (siglas en inglés: AQI).	34

7.3	Comparativo mensual de PST en Cananea con otras ciudades del Estado de Sonora...	35
7.4	Concentración de metales pesados.....	37
7.5	Comparación de metales con Máximos Permisibles.....	40
7.5.1	Cobre.....	40
7.5.2	Plomo.....	40
7.5.3	Molibdeno.....	41
8	CONCLUSIONES.....	42
9	RECOMENDACIONES.....	43
10	BIBLIOGRAFÍA.....	44
11	ANEXOS.....	47

ÍNDICE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Pirámide de efectos a la salud (WHO, 2000)	2
Figura 2. Localización del área de estudio.....	9
Figura 3. Ubicación de la estación de muestreo (a) Instituto Minerva y (b) dentro del Instituto	10
Figura 4. Dirección de procedencia de vientos. Dividido en cuatro trimestres (A=Jul-Sep, B=Oct-Dic, C=Ene-Mar y D=Abr-Jun)	11
Figura 5. Fisiografía Cananea, Sonora (SGM, 2012).	13
Figura 6. Columna estratigráfica de Cananea, Sonora (Del Rio Salas, 2011).	17
Figura 7. Muestreador de alto volumen (HI-VOL).	19
Figura 8. Distribución de datos del trimestre Julio-Septiembre de 2015 (Las coordenadas X,Y y Z representan las variables de viento, humedad y PST respectivamente; P1 el vector del CP1, P2 el vector del CP2 y P3 el vector del CP3	28
Figura 9. Distribución de datos tomados durante el trimestre Octubre-Diciembre de 2014. (Las coordenadas X,Y y Z representan las variables de viento, humedad y PST respectivamente; P1 el vector del CP1, P2 el vector del CP2 y P3 el vector del CP3)	29
Figura 10. Distribución de datos tomados durante el trimestre Enero-Marzo de 2015. (Las coordenadas X,Y y Z representan las variables de viento, humedad y PST respectivamente; P1 el vector del CP1, P2 el vector del CP2 y P3 el vector del CP3)	31
Figura 11. v Distribución de datos tomados durante el trimestre Enero-Marzo de 2015. (Las coordenadas X,Y y Z representan las variables de viento, humedad y PST respectivamente; P1 el vector del CP1, P2 el vector del CP2 y P3 el vector del CP3)	32
Figura 12. Comparativo de PST de Cananea con otras Ciudades de la Entidad.....	36
Figura 13. Metales (Cu y Pb) respecto a la Norma NOM-026-SSA1-1993 para Pb y GOST 17.2.3.01-86 para Cu	41
Figura 14. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre Julio-Septiembre de 2014.	47
Figura 15. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre Octubre-Diciembre de 2014.....	48
Figura 16. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre Enero-Marzo de 2015..	49
Figura 17. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre Abril-Junio de 2015.....	50
Tabla 1. Valores climáticos en los días de presencia de PST fuera de norma, registrados en la campaña de muestreo en Cananea, Sonora.	27
Tabla 2. Análisis de los valores propios de la matriz de correlación del trimestre Julio-Septiembre de 2014.....	28
Tabla 3. Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación del trimestre octubre-Diciembre de 2014.	29

Tabla 4. Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación del trimestre Enero-Marzo de 2015.....	30
Tabla 5. Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación del trimestre Abril-Junio de 2015.....	32
Tabla 6. Categoría de los rangos de AQI establecidos por la EPA (1999).....	34
Tabla 7. Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PST de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre Julio-Septiembre de 2014	38
Tabla 8. Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PST de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre Octubre-Diciembre de 2014.	38
Tabla 9. Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PST de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre Enero-Marzo de 2015.....	39
Tabla 10. Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PST de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre Abril-Junio de 2015	39
Tabla 11. Calidad del aire ambiente por PST en Cananea, Sonora, durante el trimestre Julio-Septiembre de 2014.	47
Tabla 12. Calidad del aire ambiente por PST en Cananea, Sonora, durante el trimestre Octubre-Diciembre de 2014	48
Tabla 13. Calidad del aire ambiente por PST en Cananea, Sonora, durante el trimestre Enero-Marzo de 2015.....	49
Tabla 14. Calidad del aire ambiente por PST en Cananea, Sonora, durante el trimestre Abril-Junio de 2015.....	50
Tabla 15. Valor promedio Mensual de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Cananea, Sonora, en comparación con otros sitios de la entidad.....	51

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios por darme la bendición de cursar la carrera de Lic. En Geología en la Universidad de Sonora. Agradezco a todos los docentes del departamento de geología por transmitirme sus conocimientos y apoyarme para seguir adelante día a día.

Agradezco a mi asesora de tesis M.C. Margarita de la O Villanueva por haberme brindado la oportunidad de pertenecer a este proyecto de titulación, así como también haberme tenido toda la paciencia para guiarme a lo largo de este tiempo.

Agradezco también a M.C. Arturo Villalba Atondo siendo responsable del proyecto de investigación denominado “Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST), metales pesados (Cd, Cr, Cu, Mo y Pb) y microbiología en la ciudad de Cananea, Sonora, México, durante un periodo anual”.

Además, aprovecho para agradecer a él Dr. Rafael de Rio Salas y a él Dr. Agustín Gómez por sus aportes para este trabajo de tesis.

Finalmente agradezco a todos mis compañeros de clase durante la estancia en la Universidad de Sonora, a la familia Ruiz López y Corral Pacheco que siempre estuvieron apoyándome en mi estancia en Hermosillo, así como a la familia Guzmán Tapia quienes han estado presentes a lo largo de mi vida.

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis está dedicado a mi padre Marco Antonio (QEPD), a mi madre Margarita, a mis hermanos Briza, Toño e Iván a quienes les agradezco todo el apoyo moral y económico que me dieron a lo largo de esta etapa universitaria. Los logros obtenidos hasta la fecha se los debo a ustedes, a mis sobrinos Marbriza, José Alonso, Marianh y Marco Antonio, quienes me han motivado a alcanzar mis anhelos para poder ser una persona ejemplar para ellos, a Viridiana por acompañarme en esta etapa universitaria, así como en los momentos buenos también en los complicados en la vida no me hiciste perder la fe.

RESUMEN

En el presente estudio se llevó a cabo la evaluación de la calidad del aire en Cananea, Sonora, México, considerando las Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales pesados (Cu, Pb y Mo) durante el periodo de julio 2014 a junio 2015.

Para el análisis de PST se utilizó el método de alto volumen (Hi-Vol) establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993. Las concentraciones de los metales se midieron utilizando la técnica de Espectroscopia de absorción atómica.

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) (NOM, 2014).

Los objetivos planteados en esta investigación, incluyen la determinación de concentraciones de PST en el aire ambiente, a partir de un monitoreo que se llevó a cabo en el instituto Minerva en Cananea, Sonora, el cual es un parámetro normado en México, así como de metales pesados como el plomo normado en México y Estados Unidos, el molibdeno y cobre considerado en las guías de calidad del aire por la OMS; éste último ha aparecido como contaminante del aire, identificándose un estándar de calidad para zonas pobladas, así como las concentraciones en base criterios o estándares de calidad y un análisis comparativo del comportamiento espacial y temporal de las concentraciones detectadas en esta investigación.

En México los máximos permisibles para la calidad del aire respecto de PST, corresponden a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-(DOF, 2005) que establece un valor de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas para un periodo de un año, $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} en 24 horas en un periodo de un año y para $\text{PM}_{2.5}$ los valores son de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas dentro de un periodo anual.

Dentro de la norma, existen 3 valores por encima de esta los cuales se identificaron en los trimestres; uno en el trimestre octubre-diciembre con $254 \mu\text{g}/\text{m}^3$ las otras dos son en el trimestre enero-marzo con $232 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $335 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Cananea, Sonora.

Los resultados adquiridos fueron comparados con los máximos permisibles que son valores de concentración que están fijos para garantizar que no hay riesgo a la salud de la población mientras estos valores obtenidos se encuentren por debajo de los establecidos.

1 INTRODUCCIÓN

Los contaminantes del aire son aquellos que implican riesgo, daño o molestia para las personas y el medio ambiente natural, los cuales se pueden clasificar en contaminantes primarios y secundarios (SEMARNAT, 2013). Los contaminantes primarios o sustancias directamente vertidas en la atmósfera se encuentran constituida por aerosoles (partículas sólidas y líquidas), gases (compuestos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, monóxido de carbono y anhídrido carbónico), entre otras sustancias (metales pesados, sustancias minerales, compuestos halogenados, compuestos orgánicos azufrados, compuestos orgánicos halogenados). Los contaminantes secundarios o sustancias que no se vierten directamente a la atmósfera, sino que se producen como consecuencia de reacciones químicas y fotoquímicas de los contaminantes primarios en el aire, por ejemplo, contaminantes fotoquímicos (oxidantes como ozono y radicales libres activos) y la acidificación (lluvia ácida) a partir de los óxidos de azufre o nitrógeno (Palomares, 2017).

Las fuentes generadoras de contaminantes pueden ser de origen natural o antropogénica, donde las primeras consisten en erupciones volcánicas, incendios forestales que pueden representar hasta el 39.9% de las emisiones anuales de macropartículas (Dickson, 1996). Canter (1997), reporta que la emisión de polen de las plantas y las tolvánicas son elementos contaminantes que se respiran y son absorbidas en nuestro organismo y aparte como parte de las actividades antropogénicas se generan emisiones a la atmósfera a través de los procesos industriales que generan subproductos gaseosos, gases de desecho de automóviles, los procesos de manufactura, combustión de basura y plantas productoras de energía generan gases. En los Estados Unidos de Norteamérica se estima que se liberan más de 200 millones de toneladas de contaminantes atmosféricos al año (Dickson, 1996).

Las partículas suspendidas en la atmósfera son una mezcla de partículas sólidas, líquidas y gaseosas que se encuentran en el aire emitidas directamente desde la fuente (formación directa) o bien son formadas por la condensación de contaminantes gaseosos (formación indirecta). Estas formaciones tienen como resultado una compleja mezcla de partículas sólidas y vapores con sustancias orgánicas e inorgánicas en suspensión, incluyendo frecuentemente sustancias ácidas como sulfatos y nitratos estos compuestos en el aire tienen la capacidad de ser absorbidos por el cuerpo humano por medio de la

nariz/boca y pasar por el tracto respiratorio, por lo que afectan a la salud de las personas más que cualquier otro contaminante.

Estas se encuentran formadas de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen. El tamaño de las partículas suspendidas varía desde 0.005 hasta 100 micras de diámetro aerodinámico, (INECC, 2005). Las partículas se diferencian de acuerdo al tamaño:

- Partículas Suspendidas Totales (PST), con un diámetro hasta 100 micras.
- Partículas inhalables o respirables (PM_{10}), cuyo diámetro es menor a 10 micras.
- Partículas finas ($PM_{2.5}$), con un diámetro menos a 2.5 micras.
- Partículas ultra finas (PM_1), cuyo diámetro es menor a 1 micra.

Los efectos causados por contaminación del aire son muchos y varían dependiendo de la fuente contaminante y concentración, produciendo desde un bloqueo de las vías respiratorias hasta alergias crónicas. La WHO (2000), establece que los efectos potencialmente relevantes para la valoración de la contaminación del aire pueden ser determinantes para la salud, como se muestra en la Figura 1. Efectos agudos: mortalidad diaria, admisiones en hospital por problemas respiratorios y cardiovasculares, visitas a emergencias por problemas respiratorios y cardiacos, vistas para cuidados primarios por condiciones respiratorias y cardiacas (Palomares, 2017).

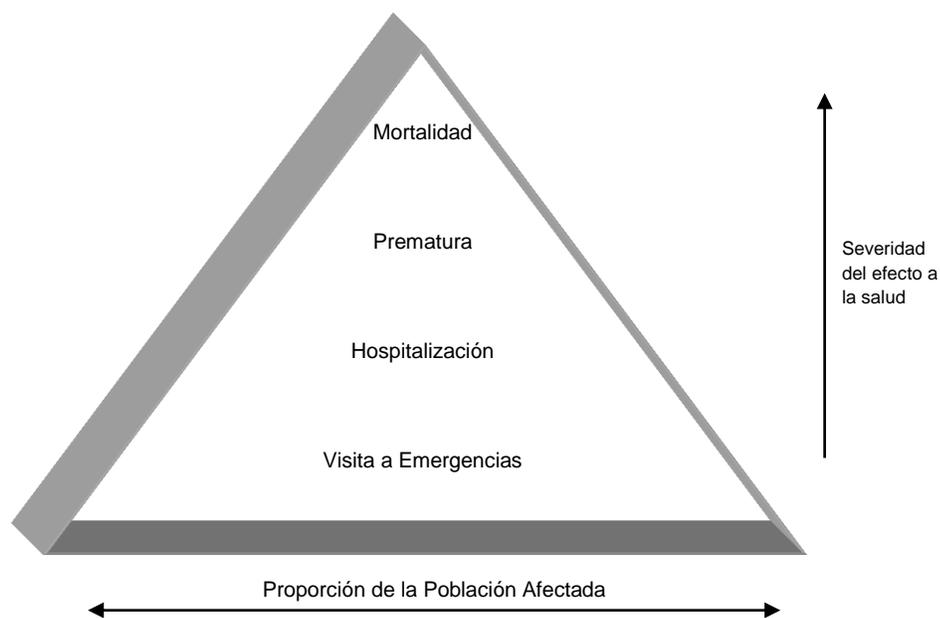


Figura 1. Pirámide de efectos a la salud (WHO, 2000).

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 dependerá de las concentraciones que se encuentran en el aire, de la dosis que se inhala, del tiempo y la frecuencia de exposición, así como las características de la población expuesta. Las vías respiratorias son las más afectadas en los seres humanos y animales.

El tamaño de las partículas 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 respiratoria (NOM-025-SSA1-2014).

Las PM_{10} se depositan en la región extratorácica del tracto respiratorio (nariz, boca, nasofaringe, orofaringe y laringofarínge); contienen principalmente materiales de la corteza terrestre y se originan en su mayoría por procesos de desintegración de partículas más grandes. Estas pueden contener material biológico como polen, esporas, virus o bacterias o provenir de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Las $PM_{2.5}$ están formadas primordialmente por gases y material proveniente de 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. Las partículas ultrafinas (PM_1) son generadas directamente por combustión y actividad fotoquímica; estas se depositan mayoritariamente en la región alveolar, incrementando la posibilidad de atravesar la membrana alvéolo capilar hacia el torrente sanguíneo y migrar hacia otros órganos (NOM-025-SSA1-2014).

A nivel mundial se cuentan con criterios o guías, por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006) emitió las guías de calidad del aire relativas a material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre (WHO, 2006).

Actualmente en México, existen Normas sobre la calidad de aire para Partículas Suspendidas Totales (PST), partículas menores a 10 micras (PM_{10}), partículas menores a 2.5 micras ($PM_{2.5}$). La NOM-025-SSAI-2014, establece dos valores límite para las concentraciones ambientales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en periodos de 24 horas y anuales; para PM_{10} se establece un límite de 24 horas de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un límite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para las $PM_{2.5}$ se establece un límite en 24 horas de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un periodo anual.

Los metales que se encuentran en la atmósfera pueden estar asociados a actividad minera, particularmente generados durante la extracción minera, refinamiento o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares. Debido a que en la ciudad de Cananea existe un complejo industrial minero antropogénico, donde el tipo de yacimiento y su asociación mineralógica hace propicio a altas anomalías en Cu, Pb y Mo; Induciendo así a la presencia de contaminantes del agua, suelos y aire. Este estudio se enfoca a evaluar la contaminación en el aire ambiente de estos tres metales antes mencionados para la cual se consideró la NOM-026-SSA1-1993 para el caso del plomo, correspondiendo a un valor de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en un período de tres meses promedio aritmético (DOF, 1994), para el cobre se considera La Agencia Ambiental Europea que tiene en su base de datos (STAR) registrado el estándar de calidad de aire ambiente para cobre con un valor límite de $0.002 \text{ mg}/\text{m}^3$, ya que en México no cuenta con normatividad de calidad del aire respecto a este, y para el caso de molibdeno se considera la norma de La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA,2012), que reporta un valor límite permisible de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para lugares industrializados.

De esta manera, el presente estudio contribuye a generar conocimiento sobre las concentraciones de partículas suspendidas totales (PST), y metales como cobre, plomo y molibdeno en el aire ambiente de la ciudad, de lo cual no existe y es necesario a fin de que las autoridades ambientales cuenten con información para el diseño de planes, estrategias y políticas de protección del ambiente y la salud en una zona con características industriales (minería) como lo es en la ciudad de Cananea.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar la calidad del aire ambiente considerando las Partículas Suspendidas Totales (PST), y metales pesados (Cu, Mo y Pb), en el monitor del Instituto Minerva en Cananea, Sonora, para un periodo anual julio 2014 a junio 2015.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar el valor de concentración de PST, así como la cantidad de metales Cu, Mo y Pb; en la zona urbana de Cananea, Sonora.

Evaluar el comportamiento espacial y temporal de PST, Cu, Mo y Pb en aire ambiente de la ciudad de Cananea, Sonora, considerando otras ciudades como Agua Prieta y Hermosillo, Sonora, durante un período anual de julio 2014 a junio 2015.

3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Hipótesis de Trabajo

La concentración de PST y Metales Pesados (Cu, Mo y Pb) en el aire ambiente de la ciudad de Cananea, Sonora, pueden potencialmente rebasar los máximos permisibles o estándares dando como resultado una mala calidad del aire para un periodo anual.

3.2 Hipótesis de Nulidad

La calidad del aire en la ciudad de Cananea, Sonora, respecto de PST y Metales Pesados (Cu, Mo y Pb) para un periodo anual fue satisfactoria.

4 ANTECEDENTES

El uso del carbón para generar energía fue importante factor en la Revolución Industrial (mitad de siglo XVIII y principios de siglo XIX), la cual es la base de nuestra sociedad tecnológica actual, pero la contaminación y la degradación lamentablemente están asociados (Dickson, 1996).

En el ámbito natural, la contaminación del aire siempre ha estado presente, ya sea por incendios forestales, descomposición de vegetación, tormentas de polvo y las erupciones volcánicas. Por ejemplo, en agosto de 1986 en el lago Nyos en el oeste de Camerún, una nube de dióxido de carbono, producto de un proceso volcánico, generó la más grave erupción límnic de la historia (Diario Jornada, 2011). Desde el punto de vista de contribución antropogénica, por ejemplo, la Ciudad de México la cual es una de las áreas mayormente estudiadas, ya que es una ciudad donde viven más de 8 millones de personas y produce contaminación producto de las actividades antropogénicas como tráfico vehicular, actividad industrial y factores naturales como la actividad volcánica de la zona. Se tienen efectos a la salud por si se tiene exposición a concentraciones de cobre y a concentraciones de plomo. Las concentraciones del cobre en el aire son usualmente bastante bajas, así que la exposición al cobre por respiración es descartable. Pero gente que vive cerca de fundiciones que procesan el mineral cobre en metal pueden experimentar esta clase de exposición, si la exposición es de largo periodo al cobre pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas. Una toma grande de cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte. El plomo puede entrar en el agua potable a través de la corrosión de las tuberías. Esto es más común que ocurra cuando el agua es ligeramente ácida. Este es el porqué de los sistemas de tratamiento de aguas públicas son ahora requeridos llevar a cabo un ajuste de pH en agua que sirve para el uso del agua potable. Se tiene entendido que el plomo no cumple ninguna función esencial en el cuerpo humano, este puede principalmente hacer daño después de ser tomado en la comida, aire o agua.

Los primeros trabajos realizados sobre la calidad del aire en zonas mineras se encuentran reportadas por el alemán Georgius Agrícola en *De Re metálica* (1556), y que eran perjudiciales para la salud.

Trabajos recientes que se han realizado en áreas de operación minera a cielo abierto, reportan las máximas concentraciones de material de partículas suspendidas totales

durante diferentes periodos estacionales (Chaulya, 2004; Soni y Agarwal, 1997; Ghose y Majee, 2000; Tayanc, 2000; Nanda y Tiwary, 2001; Reddy y Ruj, 2003).

En el país existe muy pocos trabajos de PST en zonas con explotación minera, uno de ellos es el realizado por Rodríguez et al. (2014), en depósitos de jales en Parral, Chihuahua, el cual evaluó la calidad del aire por PST, así como la contaminación de metales pesados (Pb y Zn), en un periodo estacional. Martínez (2010), realizó un inventario de emisiones de partículas y modelación de su transporte a partir de fuentes de área de una industria minera en San Luís Potosí.

En el Estado de Sonora no se encuentran registros sobre información publicada sobre calidad del aire en zonas mineras. Lo que existe actualmente, es lo reportado por Cruz (2015), y es la evaluación de la calidad del aire, en periodo anual respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr), en las ciudades de Agua Prieta, Nogales, Puerto Peñasco y Hermosillo.

El Pb estuvo presente en el estudio en las cuatro ciudades mencionadas, pero en ninguna de éstas rebasó la norma (NOM-025-SSA1-1993); tampoco se pudo detectar Cd por encima de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como lo establece la Norma, mientras que el Ni estuvo presente en las cuatro ciudades, pero solo en Nogales se superó el criterio permisible. También el Cu está permanentemente en el aire de Nogales y Puerto Peñasco, mientras que en Agua Prieta y Hermosillo se presenta en más del 95% de los días, pero en ninguna se rebasó el criterio de calidad recomendado. No se detectó el Cr en Agua Prieta, Puerto Peñasco y Hermosillo, únicamente en Nogales se identificó un día sin poder rebasar el criterio de calidad. Únicamente el Ni fue el que representó peligro a la población de la ciudad de Nogales (Cruz, 2015).

Por otra parte, se realizó un estudio en la ciudad de Hermosillo Sonora sobre la calidad del aire respecto a partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados durante el período junio de 2001 a mayo de 2002, en los sitios de monitoreo Centro (Mazón), Noreste (CESUES) y Noroeste (CBTIS). Los resultados indicaron que las concentraciones de PST en las estaciones Centro y Noroeste rebasaron frecuentemente el máximo permisible para 24 h ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que en los tres sitios de monitoreo fue rebasado el máximo permisible anual ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ambos establecidos en la Norma NOM-024-SSA1-1993 (SSA 1994a) vigente al momento del estudio (Cruz, 2015).

En la ciudad de Cananea Sonora, México, la población ha manifestado su inconformidad y malestar por la contaminación del aire, específicamente por partículas en suspensión. Esta situación ha sido motivo de numerosas quejas y denuncias, así mismo ha ocupado espacios en los medios de comunicación, generando en las comunidades la incertidumbre del peligro de su salud, por lo cual se realizó el presente estudio.

5 ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Ubicación Geográfica

La ciudad de Cananea se ubica al noreste del Estado de Sonora, México, en el paralelo 30°58' de latitud norte y a los 110°17' de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, a una altura de 1654 (m) sobre el nivel del mar (Figura 2).

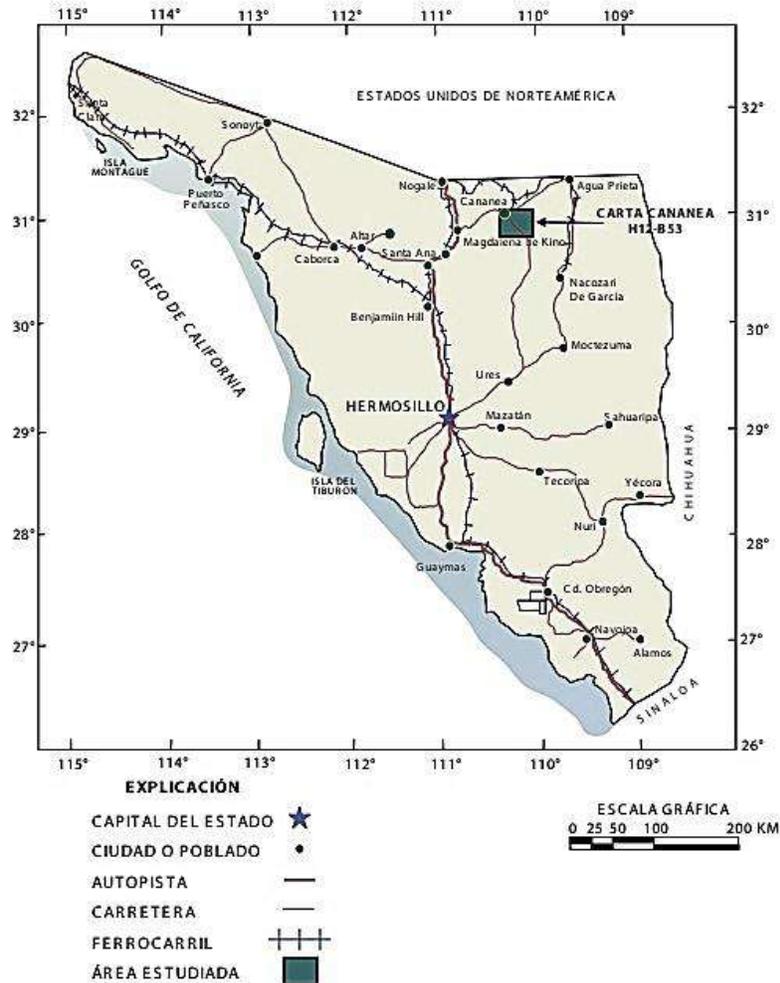


Figura 2. Localización del área de estudio (SGM, 2012).

La localización de la estación de muestreo corresponde a Instituto Minerva en la Cd. de Cananea, Sonora, como se ilustra en la Figura 3 (a y b). En este punto de muestreo se instaló por parte de La Minera Buenavista del Cobre, el equipo y sus respectivos aditamentos y consumibles de funcionamiento, para la obtención de muestras de polvo (filtros) para los estudios.



a)



b)

Figura 3. Ubicación de la estación de muestreo (a) Instituto Minerva y (b) dentro del Instituto.

5.2 Clima

En la entidad de Cananea, Sonora, se cuenta con diversos tipos de climas que va desde semiseco templado, seco templado, y templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad. El rango de temperatura va de aproximadamente 12 a 18 °C en promedio anual y con un rango de precipitación anual de 300 a 700 mm (INEGI, 2009).

Para este estudio fue importante tomar en cuenta las direcciones de procedencia del viento y sus velocidades separadas por periodos estacionales como se muestra en la Figura 4, ya que estos son los principales agentes de transporte del material particulado en la atmosfera y tienden a presentarse de manera diferente en cada una de las épocas del año.

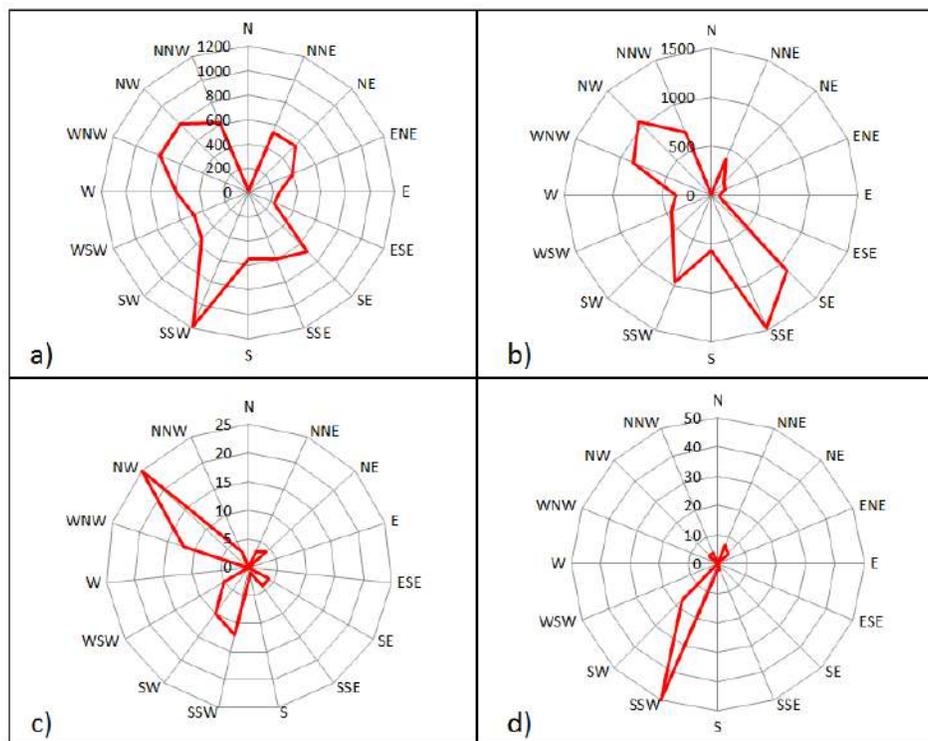


Figura 4. Dirección de procedencia de los vientos. Divididos en cuatro trimestres (a=jul-sep, b=oct-dic, c=ene-mar y d=abr-jun).

En el trimestre julio-septiembre del 2014 (Figura 4a), muestra una procedencia de los vientos al SSW, una segunda dirección de WNW-NW y una tercera dirección NNE-NE y SE con una velocidad en promedio mayor a 15.1 m/s.

Los meses de octubre a diciembre 2014 (Figura 4b), se observa una procedencia de los vientos al SSE, seguida de una NW y una tercera dirección al SSW. Estas direcciones contaron con una velocidad promedio no menor a 15.1 m/s.

Para el trimestre enero-marzo del 2015 (Figura 4c), se observó una dirección de procedencia del NW, seguida de las WNW y una tercera dirección SSW a SW, las cuales contaron con velocidades entre el rango de 7.9-11.4 m/s.

Finalmente, se muestra el trimestre abril-junio del 2015 (Figura 4d), se observó una procedencia de los vientos al SSW-SW, seguida de una dirección no muy frecuente en dirección NNE, con velocidades preferentemente entre los 7.9 a 11.4 m/s.

5.3 Fisiografía

La ciudad de Cananea está situada en la provincia a la Sierra Madre Occidental en un 68.90% y Sierras y Llanuras del Norte con un 31.10%. Como subprovincia Sierras y Valles del Norte con 68.90% y Llanuras y Medanos del Norte con 31.10%. En el sistema de topoformas cuenta con Sierra alta (61.41%), Valle aluvial intermontano (29.98%), Valle intermontano (7.49%) y finalmente Llanura aluvial (1.12%) como se muestra en la Figura 5 (SGM, 2012).

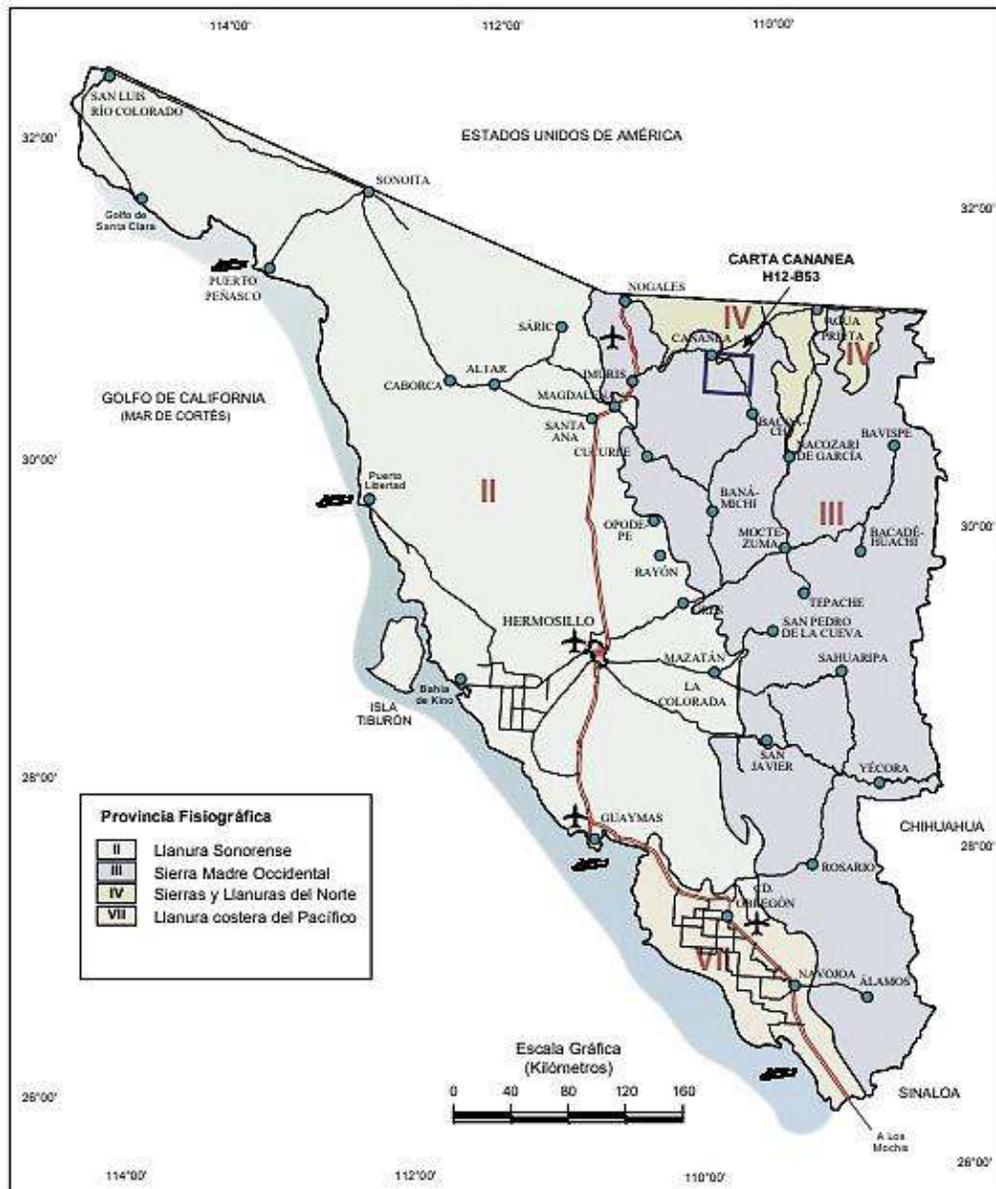


Figura 5. Fisiografía Cananea, Sonora (SGM, 2012).

5.4 Geología

5.4.1 Geología regional

En general, el Estado de Sonora presenta un marco geológico muy complejo, con edades que varían del Precámbrico al Reciente y una gran variedad litológica, predominando las rocas ígneas, las cuales son representadas en la Sierra Madre Occidental, por rocas extrusivas hacia el este y las rocas intrusivas aflorando en todo el estado, destacando las de composición félsicas e intermedio. Mientras que las rocas sedimentarias tanto continentales como marinas, se encuentran distribuidas desde Caborca y Agua Prieta hasta Sinaloa. Por último, las rocas metamórficas afloran principalmente en la porción noroeste y los sedimentos recientes se encuentran formando la llanura Sonorense (INEGI, 2000).

5.4.2 Geología local

La geología del área de estudio fue tomada del trabajo de Del Rio Salas (2011), la cual se presenta las siguientes características.

En la porción suroeste de Norte América, los estados de Arizona y Nuevo México se caracterizan por tener una gran cantidad de depósitos de pórfidos de cobre. Esta región ha sido objeto de numerosos estudios geológicos, que en gran medida han mejorado la comprensión de esta provincia metalogénica (Titley, 2001). En Sonora los depósitos de pórfidos de cobre representan la porción sur de la provincia de pórfidos de cobre del suroeste de norte América (Titley, 1982). La principal actividad magmática-hidrotermal de los pórfidos de cobre de esta provincia ocurrió durante la orogenia Laramide. A pesar de su importancia económica, los pórfidos de cobre del noroeste de México han recibido menos atención, aunque hay trabajos pioneros que han contribuido significativamente, como por ejemplo, Berchenbriter, 1976; Bushnell, 1980; Echavarri, 1971; Meinert, 1982; Valentine, 1936; Velasco, 1966; Wantke, 1925.

El distrito minero de Cananea es el mayor productor de cobre en México, y se encuentra entre los distritos más grandes y productivos del mundo. En este distrito existe un grupo de pórfidos de cobre con mineralización de tubos en brecha y skarn, formados durante un rango de tiempo limitado, y se tiene un estimado de ~ 7,500 millones de toneladas de mineral, con leyes que van desde 0,35 a 1.7 por ciento en peso de Cu (Valencia-Moreno, 2007).

5.4.3 Estratigrafía del distrito Cananea.

La unidad más antigua expuesta en el distrito es el granito de 1.440 +15 Ma Cananea (Anderson y Silver, 1977), que incluye el basamento precámbrico en el noreste de Sonora representado por el Esquisto Pinal 1.7 Ga (Anderson y Schmidt, 1983; Anderson y Silver, 1979; Silver et al., 1977). En 1936 Valentine describió el granito de Cananea en dos facies: (1) un granitoide grueso en una roca pegmatítica compuesta de ortoclasa, oligoclasa, cuarzo y en cantidades más pequeñas hornblenda, magnetita y apatito; y (2), el tipo más abundante, un granitoide granófilo con fenocristales de cuarzo y una matriz microgranitoide compuesta de ortoclasa, microlina, cuarzo y oligoclasa.

El granito de Cananea se encuentra en contacto discordante a una secuencia sedimentaria paleozoica que le sobreyace. Esta secuencia sedimentaria incluye las formaciones Bolsa (Cámbrico), Abrigo (Cámbrico), Martín (Devónico) y Escabrosa (Mississippi), y parte del Grupo Naco (Meinert, 1982; Mulchay y Velasco, 1954; Velasco, 1966) (Fig. 6). A pesar del intenso fallamiento, metasomatismo y alteración hidrotermal en la secuencia del Paleozoico, Mulchay y Velasco (1954) sugirieron una correlación entre la secuencia sedimentaria del Paleozoico en Cananea y las rocas sedimentarias similares al sureste de Arizona. La secuencia sedimentaria del Paleozoico en Cananea es económicamente importante porque alberga la mineralización de skarn de Zn-Pb-Cu descrita por Meinert (1982).

Las rocas volcánicas del Proterozoico y del Paleozoico están subyacidas de manera discordante por rocas volcánicas de Mesozoico a Terciario temprano (Valentine, 1936). Las rocas mesozoicas incluyen Triásico-Jurásico y los arcos magmáticos Laramídicos. Las rocas volcánicas más antiguas son las de la Formación Elenita, compuesta de riolitas a toba y lavas andesíticas, con intercalaciones de areniscas y cuarcitas. Los afloramientos de la Formación Elenita en las partes oeste y suroeste del distrito Cananea se estima un espesor de 1800 m (Valentine, 1936). La Formación Henrietta se encuentra sobre la Formación Elenita (Valentine, 1936) (Fig.6) y está compuesta rocas calcoalcalinas, dacitas a tobas y flujos riolíticos (Wodzicki, 1995). Esta formación es importante en el distrito porque alberga parte de la mineralización de cobre del cuerpo mineral de Cananea (Velasco, 1966). Las rocas más antiguas de Laramide corresponden a la diabasa de Mariquita, que consiste en flujos de basalto-andesita de alto K y cuerpos intrusivos (Wodzicki, 2001).

La Formación Mesa (Fig. 6) representa la mayor parte de la actividad volcánica Cretácica en el distrito (Valentine, 1936), la cual varía desde traquibasáltica, andesita- basáltica, andesítica, dacítica, hasta traquiandesítica, también se tienen presente tobas, aglomerados, lahars y flujos de composición andesítica (Valentine, 1936; Wodzicki, 2001). La Formación Mesa aflora en la parte oriental del distrito y se estima un espesor de 1500 m (Valentine, 1936). Estas rocas son de importancia porque albergan mineralización de cobre diseminado.

La unidad intrusiva Laramídica más reciente es el batolito Tinaja-Cuitaca (Fig. 6), que se presenta como dos cuerpos intrusivos equigranulares espacialmente distintos, llamados diorita Tinaja y granodiorita Cuitaca (Valentine, 1936). La diorita Tinaja intrusiona las formaciones Henrietta y Elenita en la porción occidental de la mina Cananea. La composición varía de gabbro a monzonita a cuarzo monzonita, pero la fase de composición predominante es la monzodiorítica (Wodzicki, 1995). Estudios previos en el distrito apoyan la idea de que las intrusiones de Tinaja y Cuitaca pertenecen al mismo batolito (Bushnell, 1988; Meinert, 1982; Valentine, 1936). El batolito Tinaja-Cuitaca está invadido por numerosos diques máficos verticales orientados NW 60-80 y NE 40 (Valentine, 1936). Estas intrusiones están dominadas por los diques de Campana y tienen una fecha de 58.4 ± 0.6 Ma (Carreón-Pallares, 2002). Las formaciones de Henrietta y Mesa son localmente cortadas por diques similares. Estos diques máficos no están atravesados por pórfidos de feldespatos de cuarzo más jóvenes, y aparentemente se colocaron cerca del momento de la solidificación del cuerpo intrusivo de Cuitaca (Wodzicki, 1995).

Hay pórfidos de mineralización de cuarzo monzonítico y granodioríticos más jóvenes a lo largo de los yacimientos de la mina Cananea, María, La Colorada y Alacrán, cuyos eventos de mineralización producen edades Re-Os de 59 a 60 Ma (Barra et al., 2005).

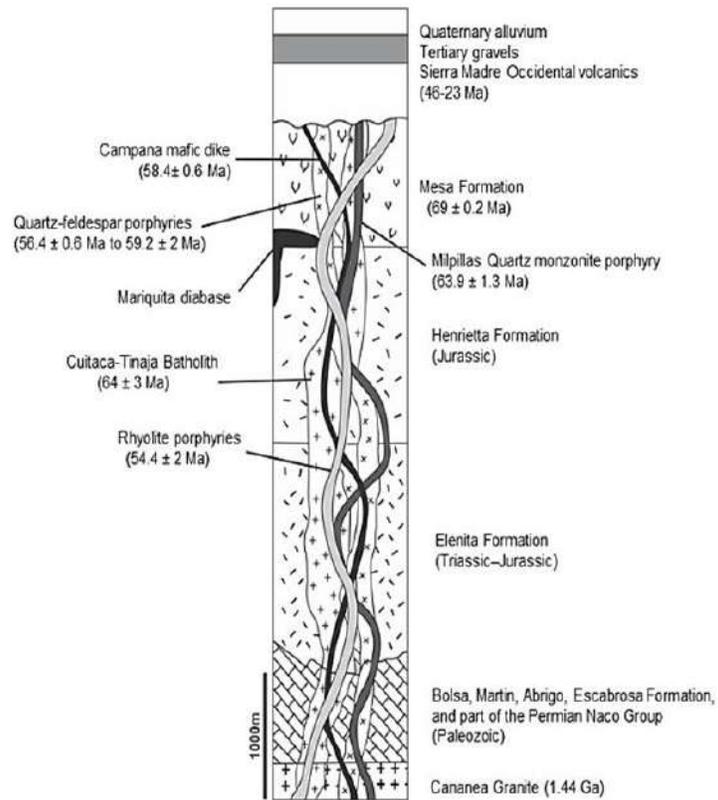


Figura 6. Columna estratigráfica de Cananea, Sonora (Del Rio Salas, 2011).

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Procedimiento de Muestreo

El método utilizado para muestreo y determinación de Partículas Suspendidas Totales (PST) es el señalado por la Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993, que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. Al mismo tiempo se hace referencia a la Norma NOM-156-SEMARNAT-2012 la cual indica que un muestreador de alto volumen es suficiente para cada 500 mil habitantes, ya que el campo de aplicación es en la actividad industrial (minera) para así poder determinar la calidad del aire.

El método de muestreo utilizado fue el de alto volumen (Hi-Vol, Figura 7) establecido en la Norma NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993), el cual permite medir la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente por medio de un muestreador que hace pasar a través de un filtro una cantidad determinada de aire ambiente durante un periodo 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 (μm) de diámetro aerodinámico, dependiendo de la velocidad del viento y su dirección. Los filtros usados tienen una eficiencia de recolección mínima del 99% para partículas de $0.3 \mu\text{m}$. Los filtros pesados antes y después del muestro son utilizados para la determinación y concentración de PST y metales pesados (NOM-035-ECOL-1993).



Figura 7. Muestreador de alto volumen (HI-VOL).

6.2 Partículas Suspendidas Totales (PST)

Para la determinación de las Partículas Suspendidas Totales (PST), se utilizó el método de referencia de alto volumen (Hi-Vol), recomendado por la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993), y que coincide con el método establecido en la normatividad de EUA (CFR 40, 1992). En este método, 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 partículas suspendidas totales en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa de las partículas recolectadas entre el volumen de aire muestreado y se expresa en microgramos por metro cúbico patrón ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), corregidos a las condiciones de referencia (Palomares, 2017).

6.3 Metales Pesados Totales (Cu, Pb y Mo)

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

$$C = \frac{\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{ml}} \right) \left(\frac{100 \text{ ml}}{\text{tira}} \right) (12 \text{ tiras} * \text{filtro}) - F_b}{V_{STP}}$$

Dónde:

- C = Concentración, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- $\mu\text{g}/\text{ml}$ = Lectura registrada por el equipo de absorción atómica.

- 100 ml/tira = Volumen total de muestra.
- 12 tiras = Área total del filtro utilizable, 8" x 9"; área expuesta de una tira, $\frac{3}{4}$ x 7".
- Filtro = Área total de una tira, $\frac{3}{4}$ x 8".
- F_b = Concentración del filtro μg (Filtro Blanco).
- V_{STP} = Volumen de aire total filtrado.

6.4 Control de Calidad en el Análisis de las Muestras de Filtros

Para el procedimiento de control de calidad de muestras de metales en los filtros, se siguió la metodología propuesta en la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-115-SCFI-2001) y la *Environmental Protection Agency* (EPA, 2000). La cual consistió en los siguientes puntos:

- Limpieza del material de laboratorio y equipos de muestreo. El material que se utilizó para la preparación (corte de filtro), descomposición y análisis de los filtros, estos fueron sometidos a un estricto control de higiene para evitar contaminación, principalmente de metales, para esto se utilizó la metodología recomendada por la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-115-SCFI-2001).

Procedimiento de calibración y frecuencia

- El equipo analítico de laboratorio (balanza analítica y espectrofotómetro de absorción atómica) se calibraron de acuerdo con los manuales proporcionados por el fabricante, utilizando reactivos de alta pureza analítica, además, se elaboró una curva de calibración empleándose como mínimo tres estándares para la determinación de metales, para obtener un coeficiente de correlación $r > 0.9990$. Se calculó el coeficiente de correlación (r), el cual se mide el grado de asociación entre dos variables (Miller y Miller, 1993) con el fin de evaluar los puntos experimentales y su ajuste a una línea recta.

6.5 Indicadores de calidad de los datos

6.5.1 Precisión

Se considera como el grado de concordancia entre los análisis múltiples de una muestra dada y es evaluada a partir del análisis de réplicas de análisis repetidas de una muestra o estándar (CNA, 1993). Para muestras duplicadas, la precisión es calculada como la diferencia porcentual relativa (DPR) de la siguiente manera (EPA, 2000).

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

Dónde:

a = Valor mayor del análisis de dos duplicados

b = Valor menor del análisis de los dos duplicados

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

6.5.2 Exactitud

Esta medida nos proporciona información de que tan cercanos o parecidos son los valores obtenidos de un valor real o establecido. Mientras más cercano o parecido sea los valores, mayor es su exactitud. Los resultados obtenidos se expresan en porcentaje de recuperación.

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

Dónde:

a = Concentración teórica adicionada a la muestra

b = Concentración medida en la muestra

Se determinó un límite de aceptación de la recuperación dentro del rango de 80 a 115% para los parámetros contemplados en el sedimento (EPA, 2000).

6.6 Límite de Detección del Instrumento (L.D.)

En el presente estudio fue utilizado el criterio del límite de detección, como la cantidad de concentración del analítico que proporciona una señal igual a la señal del blanco (YB), más tres veces la desviación estándar del blanco (SB) (Miller y Miller, 1993):

$$Y = YB + 3SB$$

6.7 Normas de Calidad o Criterios de Calidad del Aire

En este estudio se utilizaron los criterios de calidad de aire recomendados por la Norma NOM-025-SSA1-1993. Además, se determinó el porcentaje de días por arriba del máximo permisible y se calculó el índice IMECA (Cruz, 2005).

Los criterios que se utilizaron en esta investigación para determinar la calidad del aire respecto a metales pesados estudiados, fueron los siguientes:

- Cobre: Se señalan los criterios establecidos por la *Ontario Ministry of the Environment* (MOE) que fijan un valor para el cobre de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas.
- Plomo: Se señalan los criterios establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSAI-1993 (SSA, 1993b), fijan un valor de 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de tres meses.
- Molibdeno: Se señalan los criterios establecidos por la *Ontario Ministry of the Environment* (MOE) que fijan un valor para molibdeno de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas.

6.8 Análisis estadístico de datos

Para el tratamiento de correlación de datos, se utilizó el Análisis de Componentes Principales (ACP). Dicho ACP es una técnica estadística en la cual se puede presentar un grupo de variables múltiples en un conjunto de combinaciones lineales de factores, que son no correlacionados entre sí, dichos factores dan cuenta de una fracción cada vez más débil de la variabilidad de los datos. Este método permite mostrar los datos originales (individuos y variables) en un espacio de dimensión menor que el espacio original, mientras limita al máximo la pérdida de información. La representación de los datos en espacios de dimensión débil (2 dimensiones) facilita en gran medida el análisis (Pérez et al., 2004).

El ACP difiere del análisis factorial en la que conduce a un conjunto de factores no correlacionados entre sí, lo que corresponde al caso particular de las comunidades todas iguales a 1 (varianzas específicas nulas) (Pérez et al., 2004)

El uso del ACP para resumir la estructura de datos descritos por varias variables cuantitativas, mientras adquiere factores no correlacionados entre sí. Estos factores pueden ser utilizados como nuevas variables que permiten: evitar la multicolinealidad en regresión múltiple o en análisis factorial discriminante y, efectuar una clasificación automática teniendo únicamente en cuenta la información esencial, es decir, que conserve solamente los primeros factores.

6.9 Índice de calidad del aire (siglas en inglés: AQI).

El AQI es un índice de notificación diario de la calidad del aire donde se indica el grado de pureza o de contaminación atmosférica y los efectos a la salud, se basa en los efectos a la salud que se pueden tener al estar expuesto por horas o días al aire contaminado. El sistema AQI es una regla que va de los 0 a 500, cuanto más alto sea el valor AQI más riesgos a la salud se tienen (EPA, 1999).

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los máximos permisibles son valores de concentración para compuestos o elementos contaminantes, que han sido establecidos para garantizar que mientras las condiciones ambientales se encuentren por debajo de éstos, no existe riesgo a la salud de la población. Idealmente, los límites que establecen las normas deberían estar basados en estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición tanto en animales como en seres humanos, que identifiquen los niveles del contaminante capaz 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 La Agencia de Protección del Medio Ambiente (SEMARNAT, 2003).

Para PST en la localidad de Cananea, Sonora, se llevó a cabo una campaña de recolección de 58 muestras (comprendido desde julio de 2014 a junio de 2015) donde se obtuvieron tres (5.16%) muestras por encima del valor normado (Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1), pero en sus promedios mensuales del año en estudio de la localidad se encuentran dentro de los valores permisibles.

7.1 Valores máximos permisibles para Partículas Suspendidas Totales (PST)

La comunidad europea ha establecido en la Directiva 1999/30/CE, entre otros, el límite de partículas en el aire ambiente, el cual queda definido como $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} en 24 horas y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} en un año.

En Estados Unidos de América, los máximos permisibles han sido publicados como estándares nacionales de calidad del aire o NAAQS (*National Ambient Air Quality Standards*) por la EPA (1990), y se tiene determinado un máximo permisible de concentración de partículas menores PM_{10} de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas y una concentración de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como media aritmética anual.

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

En el caso de las PST del presente estudio, durante el trimestre julio-septiembre no se reporta ninguna muestra con valores fuera de Norma, es decir por arriba de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el trimestre de octubre-diciembre solamente se obtuvo una muestra con valor de PST por arriba del valor normado con $254 \mu\text{g}/\text{m}^3$, particularmente para la muestra del día 28 de noviembre de 2014, donde se tienen datos climáticos como velocidades de viento de 21.7 m/s, humedad relativa 19.4% y con una temperatura de 16.5°C y precipitación nula. Para el correspondiente trimestre de enero-marzo ocurren dos fechas en las que el valor permisible es superado (17 de enero y 24 de marzo). Para el 17 de enero del 2015 se registró la concentración de $232 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ sin precipitación, velocidad de viento de 8.6 m/s con temperatura de 11.6°C y una humedad relativa de 39.4%; la concentración registrada el día 24 de marzo del 2015 fue de $335 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, sin precipitación, con velocidad de viento de 7.07 m/s, teniendo humedad relativa de 20.3% y un temperatura de 17.6°C (Tabla 1).

Dicho lo anterior, se puede definir que se tiene incidencia de PST con los variables climáticas en especial, velocidad de viento y precipitación, donde se esperan suelos secos que puede promover la suspensión de partículas debido a las velocidades de los vientos, los cuales varían entre los 7 a 21 m/s, en conjunto con la actividad de flujo vehicular que ayudan a la resuspensión de las partículas y de igual manera transportados por estos vientos.

Tabla 1. Valores climáticos en los días de presencia de PST fuera de norma, registrados en la campaña de muestreo en Cananea Sonora.

Fecha	Velocidad del Viento(^{m/s})	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mmHg)
28 de noviembre 2014	21.74	16.5	19.4	762.8
17 de enero 2015	8.6	11.6	39.4	768.3
24 de marzo 2015	7.07	17.6	20.3	759.9

7.2 Análisis estadístico

Como se mencionó anteriormente (Capítulo 6.8 de Materiales y Métodos) se utilizó la técnica CPA, donde se considerando las variables: viento, humedad y PST; para hacer las correlaciones, con la finalidad de observar el tipo de combinaciones lineales que presentan entre sí en cada uno de los trimestres estudiados, durante 2014 y 2015.

En el primer trimestre que corresponde al periodo de julio-septiembre del 2014 se puede observar que el primer componente principal es representado por 56.85% de la varianza total (Tabla 2), en este componente las variables con correlación positiva son PST (0.5950) y la humedad (0.5187), la correlación con el viento es más alta, pero negativa (-0.6137), estas correlaciones pueden ser observadas en la Figura 8. Se tiene un acumulado del 81.65% de la varianza total entre el componente principal uno (56.85%) y componente principal dos (24.79%), en el componente principal dos existe una fuerte correlación con la humedad (0.8466) y una correlación muy mala con el viento (0.2721) y PST (-0.4573).

El tercer componente principal (CP3) le corresponde un 18.34% de la varianza total, todas las variables se presentan positivas, siendo el viento el que presenta una correlación mayor de 0.7410, seguido por las PST (0.6608) y finalmente con valores muy bajas la humedad (0.1188).

Tabla 2. Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación del trimestre julio - septiembre de 2014.

Valor Propio	1.7057	0.7439	0.5505
Proporción	56.8562	24.7953	18.3485
Acumulada	56.8562	81.6515	100.0000
Vectores propios	PC1	PC2	PC3
Viento	-0.61379	0.27213	0.74108
Humedad	0.51879	0.84661	0.11880
PST	0.59508	-0.45739	0.66082

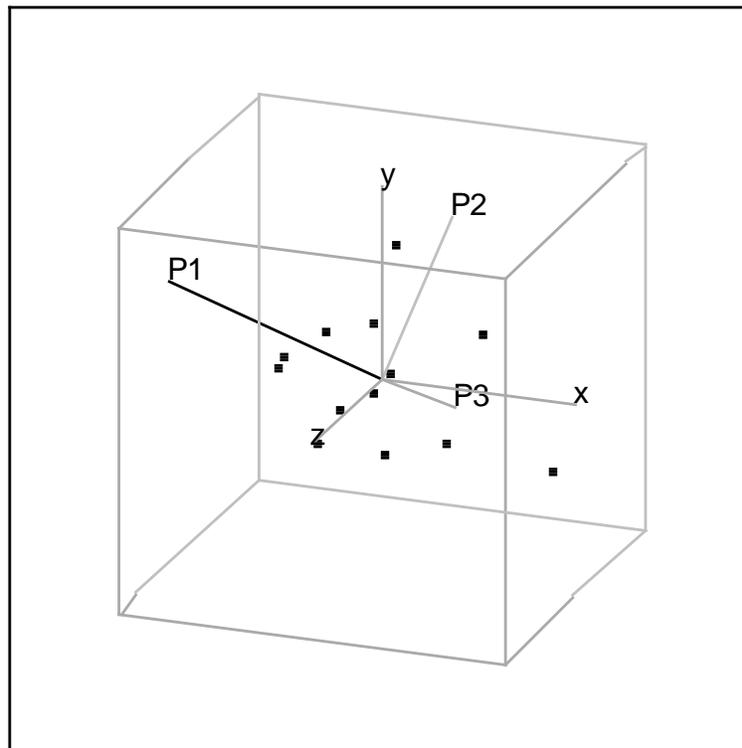


Figura 8. Distribución de datos del trimestre julio - septiembre de 2014 (Las coordenadas X, Y y Z representan las variables viento, humedad y PST respectivamente; P1 el vector del CP1, P2 el vector del CP2 y P3 el vector del CP3).

Para el segundo trimestre de octubre – diciembre del 2014 (Tabla 3), se observa que el componente principal representa el 50.49% de la varianza total, en este componente la variable que más se correlaciona es la humedad (0.7113) y PST (-0.7004), pero este último es negativo, mientras que el viento su correlación es casi cero (0.0601), como se observa en la Figura 9. Se tiene un 84.78% de varianza total acumulada en este segundo componente, donde se observa que la viento es la variable que más se correlaciona

(0.9712) seguido por PST (0.2056) y con valores muy inferiores la humedad (0.1203). Para complementar se tiene el componente principal (CP3) representando el 15.21% de la varianza total, las variables que más se correlacionan son la humedad (0.6926) y PST (0.6834), siendo el viento el que presenta un valor muy bajo y negativo (-0.2305) (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación del Trimestre octubre – diciembre de 2014.

Valor Propio	1.5148	1.0286	0.4565
Proporción	50.4941	34.2880	15.2179
Acumulada	50.4941	84.7821	100.0000
Vectores Propios	PC1	PC2	PC3
Viento	0.06019	0.97120	-0.23052
Humedad	0.71113	0.12034	0.69269
PST	-0.70048	0.20562	0.68341

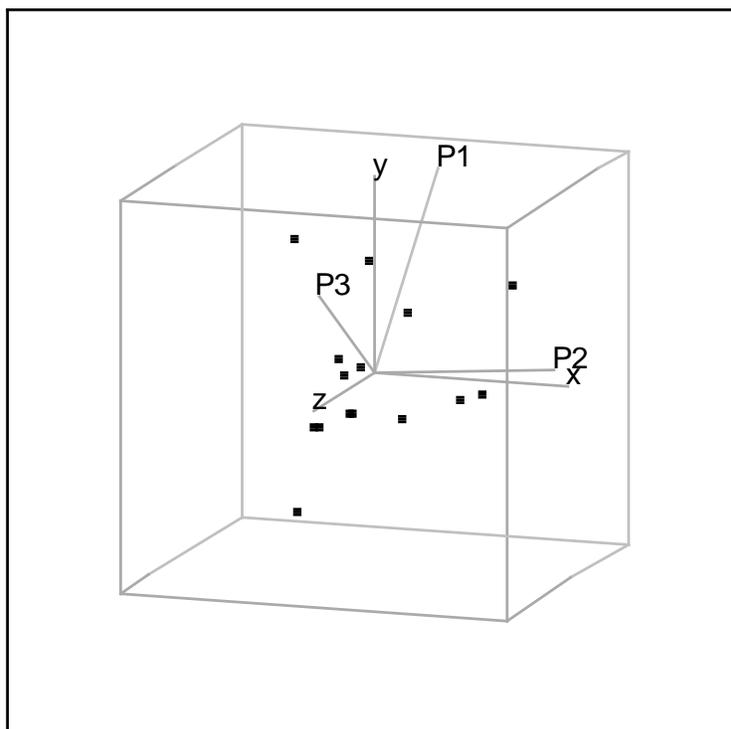


Figura 9. Distribución de datos tomados durante el trimestre octubre - diciembre de 2014 (Las coordenadas X, Y y Z representan las variables viento, humedad y PST respectivamente; P1 el vector del CP1, P2 el vector del CP2 y P3 el vector del CP3).

Para el trimestre correspondiente de enero a marzo del 2015 (Tabla 4), se observa que el primer componente principal representa el 47.12% de la varianza total, las variables que más se correlacionan con el primer componente principal es la humedad (0.662), la correlación con viento es muy baja, siendo de 0.134, mientras que existe una correlación negativa de -0.736 con las PST; dichas correlaciones también pueden observarse en la Figura 10. El segundo componente principal aporta el 38.97% de la variación total, donde existe una fuerte correlación del segundo componente principal (CP2) con el viento (0.866) y siendo baja y negativa en los casos de humedad (-0.439) y PST (-0.236).

En el tercer componente principal (CP3) explica el 13.89% de la variación total de los datos, como son 3 componentes principales entre los 3 explican el 100%, donde se observa una buena correlación de este componente principal con humedad (0.606) y PST (0.633), y una baja correlación con viento (0.480), como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación del trimestre enero- marzo de 2015.

Valor propio	1.4139	1.1691	0.4170
Proporción	47.1295	38.9712	13.8993
Acumulada	47.1295	86.1007	100.0000
Vectores propios	PC1	PC2	PC3
Viento	0.13477	0.86664	0.48039
Humedad	0.66277	-0.43924	0.60647
PST	-0.73660	-0.23666	0.63358

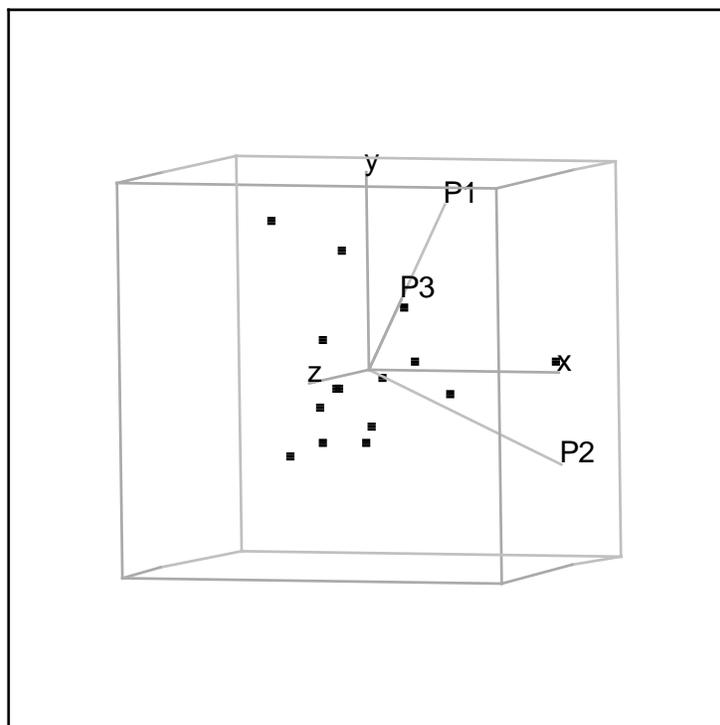


Figura 10. Distribución de datos tomados durante el trimestre enero-marzo de 2015 (Las coordenadas X, Y y Z representan las variables viento, humedad y PST respectivamente; P1 el vector del CP1, P2 el vector del CP2 y P3 el vector del CP3).

Finalmente, los datos obtenidos en abril-junio del 2015 (Tabla 5), se observa que el CP1 representa el 55.53% de la varianza total, en este componente las variables que más se correlacionan son PST (0.7075) y velocidad de viento (0.7064), en el caso la humedad es la más baja y negativa (-0.0201) como se observa en la Figura 11.

Se tiene un 86.99% acumulado que corresponde a los dos primeros componentes principales, donde el segundo componente principal aporta el 33.43% de lo acumulado, siendo en este componente que la humedad es la que más se relaciona (.9970) y la más baja y negativa en este componente son las PST (-0.0385). El tercer componente principal representa el 13.0 de la varianza total con la cual se tiene el 100%, en este componente la variable que más se correlaciona son las PST (0.7056) y velocidad (-0.7046) siendo este último negativo, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación del Trimestre abril- junio de 2015.

Valor propio	1.6066	1.0032	0.3902
Proporción	53.5536	33.4391	13.0073
Acumulada	53.5536	86.9927	100.0000
Vectores Propios	PC1	PC2	PC3
velocidad	0.70643	0.06706	-0.70460
Humedad	-0.02016	0.99700	0.07467
PST	0.70750	-0.03855	0.70566

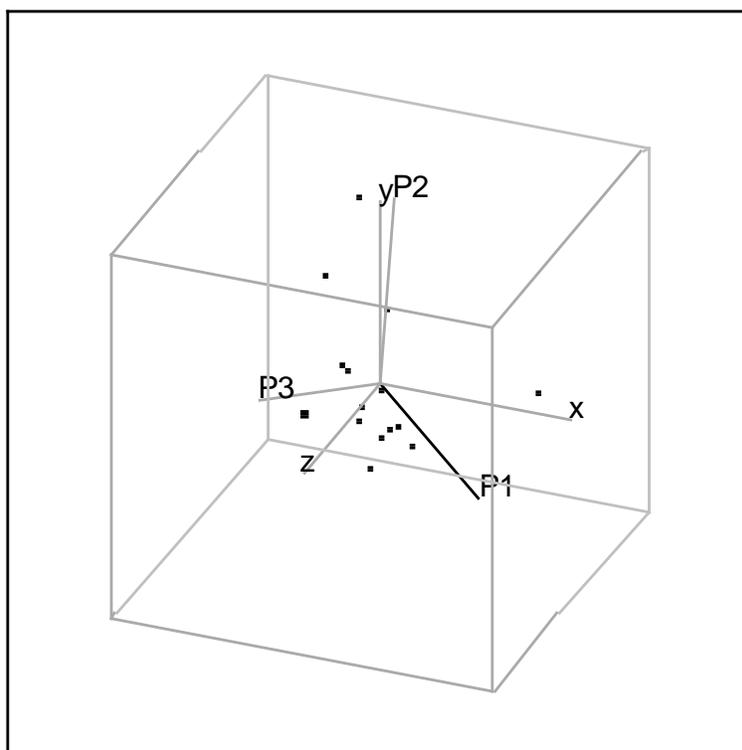


Figura 11. Distribución de datos tomados durante el trimestre abril-junio de 2015 (Las coordenadas X, Y y Z representan las variables viento, humedad y PST respectivamente; P1 el vector del CP1, P2 el vector del CP2 y P3 el vector del CP3).

7.2.1 Percentil 98.

El percentil 98 se utiliza para evaluar el valor límite permisible para la concentración de partículas PST, PM₁₀ PM_{2.5}, (SSA, 2005). Conforme a lo establecido en la Norma NOM-025-SSA1-1993 para poder examinar su ejecución se requiere de un mínimo de datos en un año. Este mínimo se evalúa a partir de la cantidad de muestras de 24 horas válidas obtenidas en cada uno de los trimestres del año, así para cada trimestre se requiere un mínimo de 75% de muestras válidas. En los sitios donde el monitoreo no se realice diariamente se tomará como base el número de muestreos calendarizados para dicho periodo, caso que corresponde al muestreo de PST en Sonora.

La frecuencia máxima que se permite para rebasar el valor límite de PST es de 2% de las concentraciones diarias en un año (percentil 98), establecido en la NOM-025-SSA1-1993. Para esto, se ordenan los valores diarios de concentración obtenidos durante un año en una serie ascendente, en la que cada valor es igual o mayor que el valor anterior. Se multiplica el número total de valores por 0.98. Se toma la parte entera del valor resultante.

Para este estudio fueron un total de 58 muestras el cual se multiplicó por 0.98. Se tomó la parte entera del valor resultante (56 en este caso). Finalmente, el valor del percentil es $56 + 1 = 57$. Para el caso particular, el valor del percentil 98 es la concentración del dato 57 en orden ascendente de los resultados en el estudio, con $232 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual incumple la NOM-025-SSA1-1993 ($210 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

7.2.2 Índice de calidad del aire (siglas en inglés: AQI).

Se determinó el índice de calidad del aire en base a la EPA (EPA-454/R-99-010), con la finalidad de poder demostrar la contaminación que puede existir en la localidad, a partir de los valores obtenidos en este estudio. Los valores obtenidos fueron comparados con los mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Categoría de los rangos de AQI establecidos por la EPA (1999).

Tabla de Valores de AQI EPA's	
AQI	AQI
<i>low - high</i>	<i>Categoría</i>
0 - 50	Buena
51 - 100	Regular
101 - 150	Mala
151 - 200	Muy mala
201 - 300	Extremadamente mala
301 - 400	Peligroso
401 - 500	

Se determinó un valor AQI para cada trimestre del año de estudio para poder observar valores más detallados a lo largo del año.

Para el trimestre jul-sep 2014 se determinó un AQI= 83, lo que indica que es regular con una calidad de aire aceptable (Tabla 6). En el trimestre oct-dic 2014 se obtuvo un valor de AQI= 80 con las mismas características del anterior (Tabla 6), para el trimestre ene-mar 2015 se tiene un AQI de 125 el cual es el más elevado que se presenta aquí se indica que es de calidad mala (Tabla 6), la cual puede ser dañina a la salud de ciertos grupos sensibles. Finalmente, en el trimestre abr-jun se valoró AQI=83, calidad de aire aceptable.

Por lo tanto, en el trimestre de enero a marzo del 2015 se observaron dos valores fuera de la Norma establecida (NOM-025-SSA1-2014), por lo cual tenemos el valor más elevado de AQI.

7.3 Comparativo mensual de PST en Cananea con otras ciudades del Estado de Sonora.

Este comparativo se lleva a cabo específicamente para PST, el cual da referencia a lo constatado que ocurre en la Ciudad de Cananea respecto a otras ciudades del Estado de Sonora, en relación con la proporción de días con resultados de PST fuera de Norma respecto a los días monitoreados en un año de estudio. Este estudio da idea de la realidad en las principales ciudades de la entidad en relación con este componente atmosférico (PST), independientemente de que sólo Nogales y Hermosillo cumplen con el criterio de muestras válidas en los trimestres del estudio, suficientes para evaluar el cumplimiento a la Norma en el ciclo anual.

Las ciudades que reportan mayor porcentaje de días fuera de Norma son Nogales, Puerto Peñasco y Obregón con 77.55%, 76.31% y 63.63 % respectivamente, con relación al total de días monitoreados. Las localidades con menos días fuera de norma son Hermosillo y Guaymas con 5.16 y 2.85 % del total de días muestreados.

Particularmente para el presente estudio, en Cananea, se observa que es la segunda ciudad del estado con mejores condiciones de aire ambiente en lo que a PST, como se refiere en la Figura 12, con un 5.16% considerando un total de 58 días muestreados ubicándose como la ciudad que más muestreos se logró en un año de monitoreo. Esto le otorga una mejor calidad de aire en cuanto a PST, con respecto a Hermosillo, Agua Prieta, Cd. Obregón, Puerto Peñasco y Nogales (Tabla 11). La ciudad de Guaymas presentó una mejor calidad de aire ambiente por PST con 2.85 % considerando un total de 35 muestreos en un monitoreo anual (Figura 12).

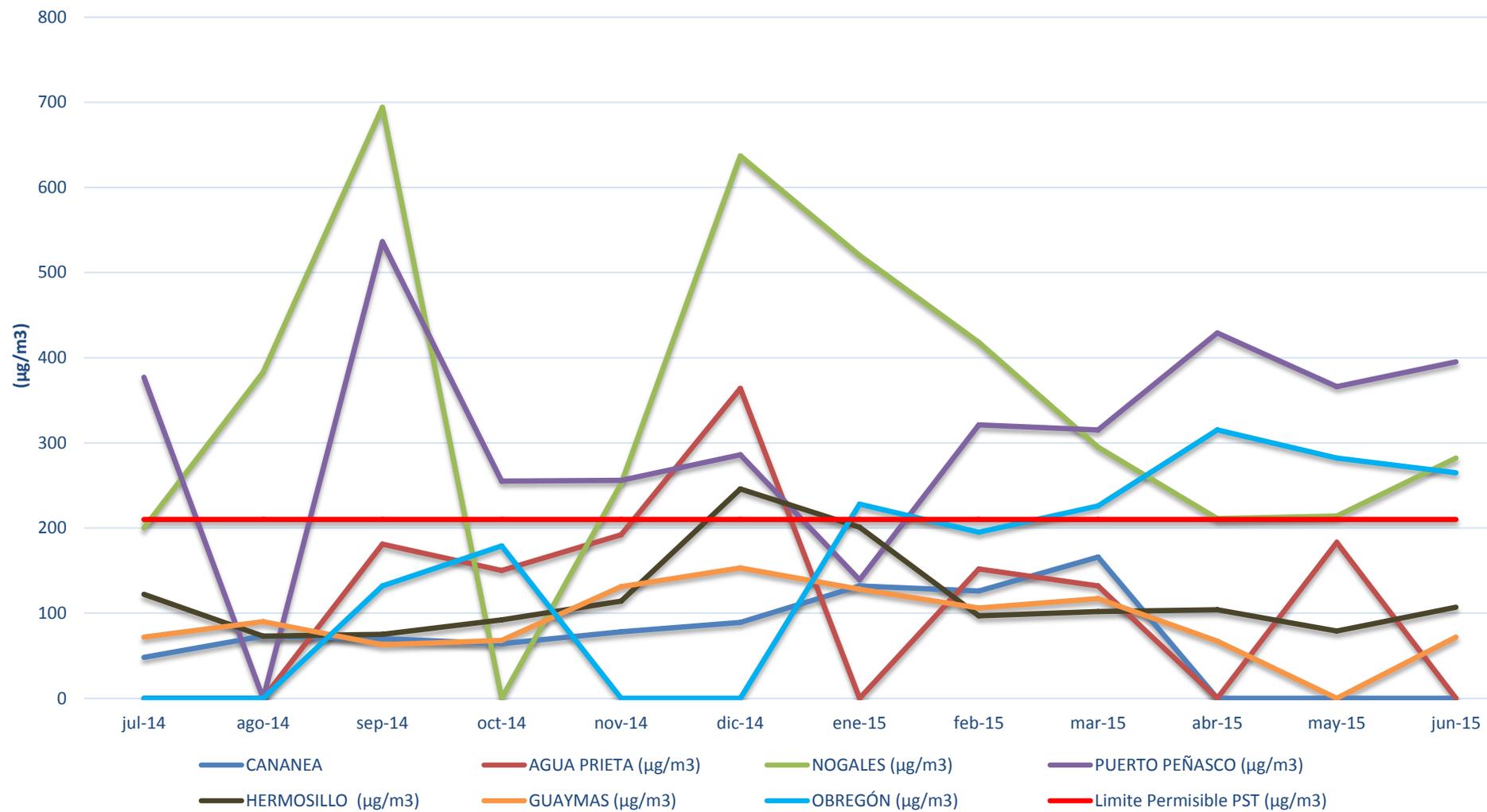


Figura 12. Comparativo de PST de Cananea con otras ciudades de la entidad.

7.4 Concentración de metales pesados.

Los resultados de metales pesados en aire ambiente se reportan en las Tablas 7, 8, 9 y 10, correspondiente a los trimestres del año en estudio donde se muestra que el molibdeno se encuentra por debajo del límite de detección del método de cuantificación. En el caso del Cu y el Pb no es así. Del primero se observa un rango de presencia de $0.0222 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la muestra del día 13 de julio de 2014, a un máximo en la muestra del día 08 de agosto de 2014 con $0.3585 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con presencia de este metal en todos los días programados de muestreo en este trimestre. Para el caso del plomo el valor mínimo de los detectables es de $0.0917 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la muestra del 24 de septiembre de 2014, en tanto que la de máximo valor es la del día 08 de agosto con $0.1376 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con presencia en cuatro de los 13 días programados.

Para el caso de Cu, se encuentra presente en todos los días de monitoreo, para el trimestre julio-septiembre 2014 se observa un mínimo de $0.0222 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo de $0.3585 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para el trimestre octubre-diciembre 2014 se reporta con un mínimo de $0.1057 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo de $0.7748 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el 2015 es el único metal presente para enero-marzo se tiene un valor de $0.1149 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como mínimo y un valor máximo de $1.2971 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el trimestre abril-junio se tiene un ND a $0.6196 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estos valores no se encuentran fuera de la Norma extranjera.

Tabla 7. Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PST de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre julio-septiembre de 2014.

FECHA DE MUESTREO	ESTACIÓN DE MUESTREO I. MINERVA		
	METALES PESADOS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Cu	Mo	Pb
4 Julio 2014	0.1382	ND< LD	ND< LD
13 Julio 2014	0.0222	ND< LD	ND< LD
17 Julio 2014	0.1226	ND< LD	0.0936
26 Julio 2014	0.2003	ND< LD	ND< LD
30 Julio 2014	0.2341	ND< LD	ND< LD
Duplicado 30 Julio	0.2381	ND< LD	ND< LD
8 Agosto 2014	0.3585	ND< LD	0.1405
13 Agosto 2014	0.0200	ND< LD	ND< LD
21 Agosto 2014	0.0682	ND< LD	ND< LD
28 Agosto 2014	0.1158	ND< LD	ND< LD
3 Septiembre 2014	0.1841	ND< LD	ND< LD
10 Septiembre 2014	0.1501	ND< LD	ND< LD
18 Septiembre 2014	0.0316	ND< LD	0.0921
24 Septiembre 2014	0.3443	ND< LD	0.0917
Duplicado 24 Sept.	0.3434	ND< LD	0.1376
Límite de Detección (LD)	0.02	0.02	0.06
No detectado (ND)			

Tabla 8. Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PST de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre octubre-diciembre de 2014.

FECHA DE MUESTREO	ESTACIÓN DE MUESTREO I. MINERVA		
	METALES PESADOS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Cu	Mo	Pb
1 Octubre 2014	0.3600	ND< LD	ND< LD
7 Octubre 2014	0.1057	ND< LD	ND< LD
13 Octubre 2014	0.1236	ND< LD	ND< LD
21 Octubre 2014	0.1564	ND< LD	ND< LD
30 Octubre 2014	0.2806	ND< LD	ND< LD
Duplicado 30 Octubre	0.2815	ND< LD	ND< LD
4 Noviembre 2014	0.1127	ND< LD	ND< LD
10 Noviembre 2014	0.2982	ND< LD	ND< LD
16 Noviembre 2014	0.2369	ND< LD	ND< LD
22 Noviembre 2014	0.5621	ND< LD	ND< LD
28 Noviembre 2014	0.7748	ND< LD	ND< LD
Duplicado 28 Noviembre	0.7704	ND< LD	ND< LD
4 Diciembre 2014	0.2309	ND< LD	ND< LD
10 Diciembre 2014	0.4526	ND< LD	ND< LD
16 Diciembre 2014	0.2760	ND< LD	ND< LD
22 Diciembre 2014	0.1768	ND< LD	ND< LD
28 Diciembre 2014	0.3267	ND< LD	ND< LD
Límite de Detección (LD)	0.02	0.02	0.06
No detectado (ND)			

Tabla 9. Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PST de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el tercer trimestre enero-marzo de 2015.

FECHA DE MUESTREO	ESTACIÓN DE MUESTREO I. MINERVA		
	METALES PESADOS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Cu	Mo	Pb
3 Enero 2015	0.4333	ND< LD	ND< LD
11 Enero 2015	0.3118	ND< LD	ND< LD
Duplicado 11 Enero	0.3145	ND< LD	ND< LD
17 Enero 2015	0.7545	ND< LD	ND< LD
23 Enero 2015	0.1149	ND< LD	ND< LD
29 Enero 2015	0.2561	ND< LD	ND< LD
4 Febrero 2015	0.2048	ND< LD	ND< LD
10 Febrero 2015	0.1559	ND< LD	ND< LD
16 Febrero 2015	0.3258	ND< LD	ND< LD
22 Febrero 2015	0.4764	ND< LD	ND< LD
28 Febrero 2015	0.1197	ND< LD	ND< LD
6 Marzo 2015	0.1404	ND< LD	ND< LD
12 Marzo 2015	0.2434	ND< LD	ND< LD
18 Marzo 2015	0.2744	ND< LD	ND< LD
24 Marzo 2015	1.2971	ND< LD	ND< LD
Duplicado 24 Marzo	1.2989	ND< LD	ND< LD
30 Marzo 2015	0.5437	ND< LD	ND< LD
Límite de Detección (LD)	0.02	0.02	0.06
No detectado (ND)			

Tabla 10. Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PST de aire ambiente en Cananea, Sonora, durante el trimestre abril-junio de 2015.

FECHA DE MUESTREO	ESTACIÓN DE MUESTREO I. MINERVA		
	METALES PESADOS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Cu	Mo	Pb
05-abr-15	0.6196	ND< LD	ND< LD
11-abr-15	0.523	ND< LD	ND< LD
17-abr-15	0.2351	ND< LD	ND< LD
23-abr-15	0.5206	ND< LD	ND< LD
29-abr-15	0.1789	ND< LD	ND< LD
05-may-15	0.4425	ND< LD	ND< LD
11-may-15	0.3096	ND< LD	ND< LD
17-may-15	0.473	ND< LD	ND< LD
Duplicado 17 Mayo	0.4721	ND< LD	ND< LD
23-may-15	0.4182	ND< LD	ND< LD
29-may-15	0.4659	ND< LD	ND< LD
04-jun-15	0.4939	ND< LD	ND< LD
10-jun-15	0.4538	ND< LD	ND< LD
Duplicado 10 Junio	0.452	ND< LD	ND< LD
16-jun-15	0.2658	ND< LD	ND< LD
22-jun-15	0.3957	ND< LD	ND< LD
28-jun-15	ND< LD	ND< LD	ND< LD
Límite de Detección (LD)	0.02	0.02	0.06
No detectado (ND)			

7.5 Comparación de metales con Máximos Permisibles.

7.5.1 Cobre.

La Agencia Ambiental Europea tiene en su base de datos (STAR) registrado el estándar de calidad de aire ambiente para cobre con un valor límite de $0.002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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. (<http://star.eea.eu.int/default.asp>). En México no existe norma sobre calidad del aire para este metal. El Criterio de Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente de Ontario, Canadá (OME, 2012), fija un valor máximo permisible de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 24 hrs. Con base a esta referencia los resultados de cobre obtenidos en este trimestre (julio-septiembre de 2014), no rebasan el valor normado en Cananea. A pesar de que este metal es detectable en todos los días de muestreo del presente estudio, el máximo registrado es de $1.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para la muestra del día 24 de marzo de 2015 que se reporta muy saturada en lo que a material particulado se refiere. Dicha concentración se ubica muy por debajo de lo establecido en el criterio utilizado de calidad del aire como se muestra en la Figura 13, por lo que se asume que al momento del proyecto no existe peligro a la salud de la población por este metal. Lo mismo ocurre para el trimestre octubre-diciembre, cuyo valor máximo es de $0.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

7.5.2 Plomo.

En los Estados Unidos de América, existe la normativa conocida como estándares nacionales primario y secundario de calidad de aire para plomo, siendo el máximo permisible de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio trimestral (CFR 40, 1992). Respecto a metales en aire en México, sólo existe referencia de máximo permisible para plomo y está establecido en la NOM-026-SSA1-1993, correspondiendo a un valor de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en un período de tres meses promedio aritmético (DOF, 1994). El valor promedio para el trimestre julio-septiembre, considerando los valores detectables, es de $0.1111 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual está muy por abajo del valor permisible como se puede observar en la Figura 13.

Es importante señalar que este parámetro está normado en otros países con valores máximos permisibles más estrictos al permisible en México. La normativa de la Comunidad Europea (EC, 2014) establece un valor $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor límite promedio anual para la protección de la salud humana y es coincidente con el de la Organización

Mundial de la Salud (OMS, 2000a). En Estados Unidos de América (USEPA, 2008) se tiene establecido un máximo permisible de $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio trimestral.

7.5.3 Molibdeno.

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

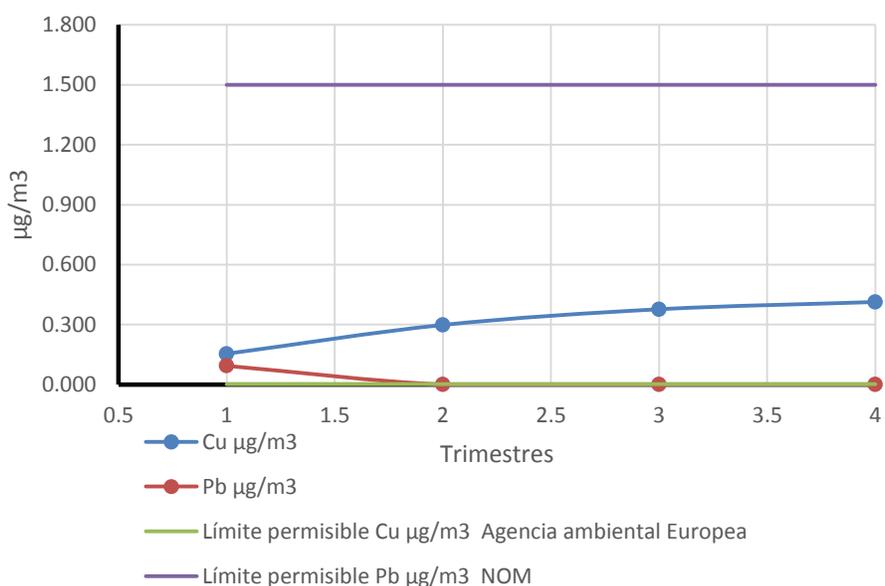


Figura 13. Metales (Cu y Pb) respecto a la norma NOM-026-SSA1-1993 para Pb y GOST 17.2.3.01-86 para Cu.

8 CONCLUSIONES.

La ciudad de Cananea, Sonora cumple con la normatividad establecida por la Secretaría de Salud, sobre la concentración de Partículas Suspendidas Totales, con un 94.84% del total de sus muestras que se encuentran dentro del rango establecido por la NOM-025-SSA1-2014, mientras que el 5.16% se encuentran encima del valor del máximo permisible incumpliendo la normativa Estas muestras fuera de la norma corresponden una al trimestre octubre-diciembre 2014, y las otras dos corresponden al trimestre enero-marzo 2015.

En base al índice de calidad del aire, se tiene que la calidad del aire es mala para el trimestre de enero-marzo 2015, mientras que para los otros trimestres la calidad del aire es aceptable.

En el caso de los metales estudiados el Mo se encuentra por abajo del límite de detección en el trimestre julio-septiembre 2014, y en los siguientes trimestres fue no detectable. El Pb se encuentra detectado en el trimestre julio-septiembre donde se observa un valor mínimo de $0.0917 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor máximo de $0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con presencia en cuatro de los trece días programados, estos valores no se encuentran fuera de la Norma Mexicana o extranjera, para el resto de los trimestres no hubo detección. Finalmente, el Cu se tiene presente en todos los días de muestreo, pero está muy por debajo de lo establecido OME, 2012 que son $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ teniendo en el estudio un valor máximo de registro de $1.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para el indicador Percentil 98 en este estudio incumple con la Norma ya que el valor en este caso fue de la concentración 57 con un valor de $232 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual es mayor de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como lo indica la Norma.

9 RECOMENDACIONES.

Realizar nuevos programas de monitoreo constante cumpliendo con las normativas establecidas, para obtener resultados de calidad del aire ambiente y poder tomar alguna medida por parte de las instituciones involucradas en el estudio y el Ayuntamiento de la localidad.

Se puede recomendar riegos permanentes para poder controlar la suspensión de las partículas, sin utilizar aguas negras debido a los efectos secundarios que puede ocasionar a la salud.

Se recomienda una mayor infraestructura en pavimentación de calles más transitadas y a la elaboración de libramientos para vehículos pesados.

Programas de reforestación.

A los grupos sensibles (niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares) se les recomienda limitar esfuerzos en las actividades físicas que tengan al aire libre.

Implementar criterios normativos para otros metales que no se encuentra dentro de la norma oficial.

10 BIBLIOGRAFÍA.

- Agricolae G. (1556). De re Metallica Libri XII. Editorial Basileae.
- Cruz, M.E. (2015). Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en seis ciudades de Sonora México, durante un periodo anual. Tesis doctoral. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. México, 135 p.
- Cruz, M.E. et al. (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. Ambie.29 (2), 269-283.
- Chaulya, S. K. (2004). Assessment and management of air quality for an opencast coal mining area. Journal of Environmental Management, 70, 1-14.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993, que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. 18 de octubre de 1993.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. 23 de diciembre de 1994.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2005). Norma MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a material particulado. Valor de concentración máxima de material particulado para partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM10 y partículas menores de 2.5 micrómetros PM2.5 en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población, para quedar como Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM10 y partículas menores de 2.5 micrómetros PM2.5 de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire. 26 de septiembre de 2005.
- DOF (Diario Oficial de la Federación), (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud Ambiental. Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. 20 de Agosto de 2015.
- EC (Community European) (2014). Air quality in Europe – 2014 report. European Environment Agency, No. 5

- EPA (Environmental Protection Agency), (1999). Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (SPM) and PM10 using high volume (HV) sampler. Compendium Method 10-2.1. 74 p.
- Ghose, M.K. y S.R. Majee, (2000). Assessment of the impact on the air environment due to opencast coal mining an Indian case study. Atmospheric Environment, 34, 2791-2796
- Martínez, G. E., (2010). Inventario de emisiones de partículas y modelado de su transporte a partir de fuentes de área de una industria minera. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, México, 113 p.
- (s.f.). Obtenido de <https://www.xlstat.com/es/soluciones/funciones/analisis-de-componentes-principales-acp>
- INEGI. (2006). Datos Geográficos. Obtenido de INEGI: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/26/26019.pdf>
- Lenntech. (s.f.). Propiedades químicas del Cobre. Obtenido de Lenntech: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm>
- Lenntech. (s.f.). Propiedades químicas del Plomo. Obtenido de Lenntech: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm>
- Nanda, S. N. and Tiwary, S. N. (2001), Concentration of SPM in the Burla-Hirakud-Sambalpur region (Orissa)', Indian J. Environ. Protect. 21(3), 193–202.
- Occupational Safety & Health Administration. (2000). Potential Health Risks to DOD Firing-Range Personnel from Recurrent Lead Exposure. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK206974/>
- OMS (Organización Mundial de la Salud) (2000). Guía para la Calidad del Aire. Publicado por la Organización Mundial de la Salud, Ginebra Cluster of Sustainable Development and Healthy Environment Departamento de Protección del Medio Humano Programa de Salud Ocupacional y Ambiental.
- Palomares, M. (2017). Estudio de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Cu, Cr y Mo) en la ciudad de Cananea Sonora, México. Tesis de maestría, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.
- Pérez, Vidal, H., Luna Gomez, M., & Acosta Pérez, L. (3 de 08 de 2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. Obtenido de Scielo: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792010000200003&script=sci_arttext
- Reddy, G. S. and B. Ruj, (2003). Ambient Air Quality Status in Raniganj-Asansol Area, India, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 89, No. 2, pp. 153-163.

- Rodríguez, V., Hernández E., Sáenz M., Torres C., Campos T., Miranda S., Carrillo F. y Herrera P. (2014). Metales pesados, Pb y Zn, en PST y Pm10 derivados de los jales de las minas de Parral. *Academia Journal*, 6 (2), 810-815.
- Secretaria de Economía. (s.f.). PROYECTO “CABULLONA”, SONORA. Obtenido de Gubernamental:
http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/mineria/pdf/Cabullona.pdf
- SEDEMA. (s.f.). Índice de Calidad del Aire. Obtenido de Gubernamental:
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Zw==>
- SEMARNAT. (s.f.). Partículas. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <http://www.publicaciones.inecc.gob.mx/>
- Soni, D. K. and Agarwal, A.(1997), Characterisation of dust emission in coal mining activities – case study, *Indian J. Environ. Protect.* 17(11), 80–814.
- Tayanc, M.: (2000), An assessment of spatial and temporal variation of sulphur dioxide levels over Istanbul, Turkey, *Environ. Pollut.* 107, 61–69.
- USEPA (2008). Lead (Pb) National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Implementation Actions Fact Sheets. <https://www.epa.gov/lead-air-pollution/2008-lead-pb-national-ambient-air-quality-standards-naaqs-implementation-0>.
- Valencia, M., Ochoa, L., Noguez, B., Ruiz, J., & Perez, E. (15 de 02 de 2006). Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. Obtenido de Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: <http://www.redalyc.org/pdf/943/94320219001.pdf>
- Wikipedia. (07 de 02 de 2018). Air quality index. Obtenido de Enciclopedia Libre: https://en.wikipedia.org/wiki/Air_quality_index
- XLSTAT. (s.f.). Su solución de análisis de datos. Obtenido de Su solución de análisis de datos: <https://www.xlstat.com/es/soluciones/funciones/analisis-de-componentes-principales-acp>
- XLSTAT. (s.f.). Su solución de analisis de datos. Obtenido de Analisis de Componentes Principales (ACP): www.xlstat.com/es/soluciones/funciones/analisis-de-componentes-principales-acp

11 ANEXOS.

Tabla 11. Calidad del aire ambiente por PST en la Cd. de Cananea, Sonora, en el trimestre julio-septiembre de 2014.

FECHA DE MUESTRA	MONITOR
	PST
	MINERVA
03-jul-14	28
13-jul-14	4
17-jul-14	61
26-jul-14	63
30-jul-14	85
08-ago-14	103
13-ago-14	62
21-ago-14	49
28-ago-14	79
03-sep-14	48
10-sep-14	59
18-sep-14	72
24-sep-14	102

PST = 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

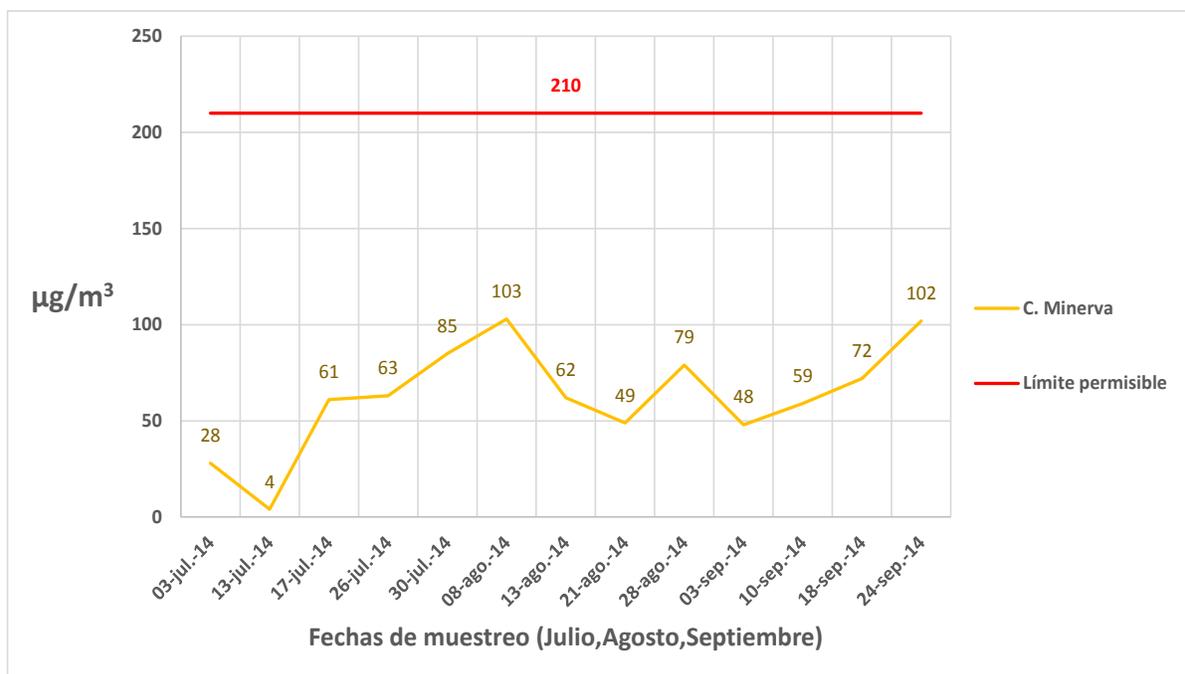


Figura 14. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre julio-septiembre de 2014.

Tabla 12. Calidad del aire ambiente por PST en la Cd. de Cananea, Sonora, en el trimestre octubre-diciembre de 2014.

FECHA DE MUESTRA	MONITOR
	PST
	MINERVA
01-oct-14	90
07-oct-14	22
13-oct-14	54
21-oct-14	91
30/oct/14	113
04-nov-14	99
10-nov-14	101
16-nov-14	88
22-nov-14	113
28-nov-14	254
04-dic-14	106
10-dic-14	152
16-dic-14	112
22-dic-14	92
28-dic-14	127

PST = 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

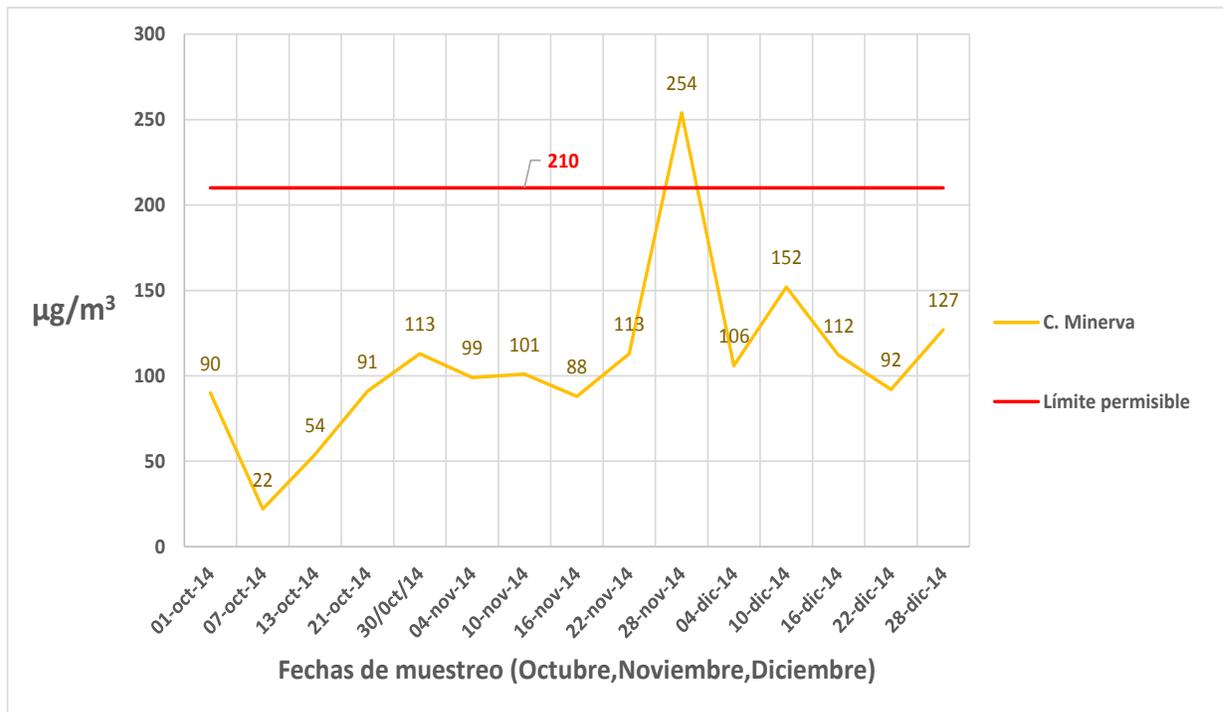


Figura 15. Resultados de PST en el monitor Instituto Minerva, en el trimestre octubre-diciembre de 2014.

Tabla 13. Calidad del aire ambiente por PST en la Cd. de Cananea, Sonora, en el trimestre de enero-marzo de 2015.

FECHA DE MUESTRA	MONITOR
	PST
	MINERVA
03-ene-15	130
11-ene-15	93
17-ene-15	232
23-ene-15	85
29-ene-15	120
04-feb-15	139
10-feb-15	208
16-feb-15	159
22-feb-15	64
28-feb-15	59
06/Mzo/15	135
12/Mzo/15	100
18/Mzo/15	91
24/Mzo/15	335
30/Mzo/15	171

PST = 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

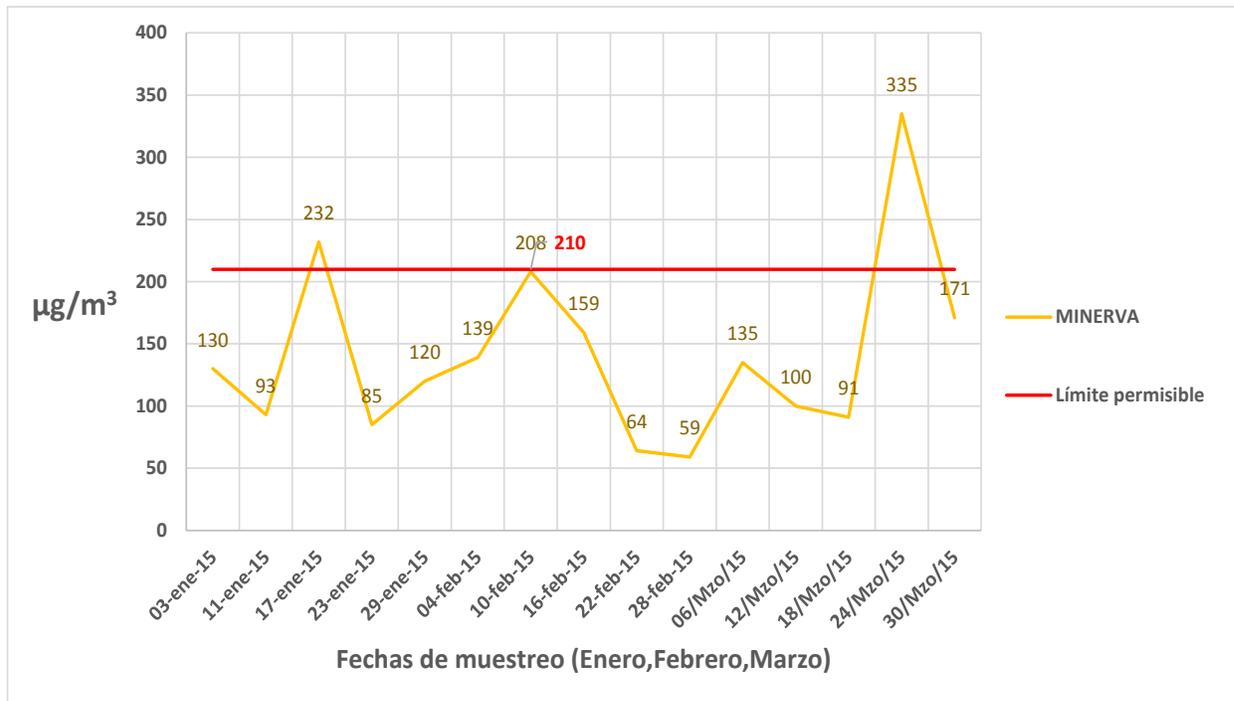


Figura 16. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre enero-marzo de 2015.

Tabla 14. Calidad del aire ambiente por PST en la Cd. de Cananea, Sonora, en el trimestre abril-junio de 2015.

FECHA DE MUESTRA	MONITOR
	PST MINERVA
05-abr-15	176
11-abr-15	161
17-abr-15	82
23-abr-15	149
29-abr-15	126
05-may-15	118
11-may-15	103
17-may-15	106
23-may-15	112
29-may-15	98
04-jun-15	119
10-jun-15	139
16-jun-15	120
22-jun-15	125
28-jun-15	21

PST = 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

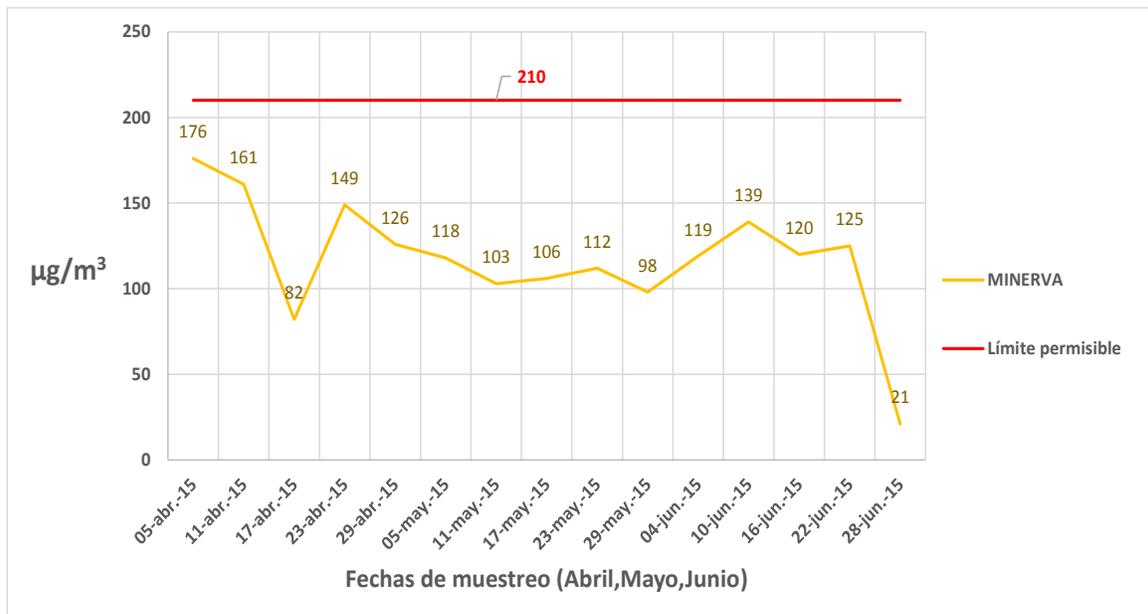


Figura 17. Resultados de PST en la estación Instituto Minerva, trimestre abril-junio de 2015.

Tabla 15. Valor promedio mensual de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Cananea, Sonora, en comparación con otros sitios de la entidad.

MES	CANANEA (I. MINERVA)	AGUA PRIETA	NOGALES	PUERTO PEÑASCO	HERMOSILLO	GUAYMAS	OBREGON
Enero	132	-	520	139	201	128	228
Febrero	126	152	418	321	97	106	195
Marzo	166	132	295	315	102	117	226
Abril	139	-	211	429	104	67	315
Mayo	107	183	214	366	79	-	282
Junio	105	-	282	395	107	72	265
Julio	48	-	200	377	122	72	-
Agosto	73	-	383	-	73	90	-
Septiembre	70	181	694	536	75	63	132
Octubre	64	150	-	255	92	68	179
Noviembre	78	192	252	256	114	131	-
Diciembre	89	364	637	286	246	153	-