PLAN PARA LA ATENCIÓN INTEGRAL DE CANANEA MESA DE SALUD AMBIENTAL

COMPONENTE DE SUELO Y AIRE

SEPTIEMBRE, 2021



COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL





DIRECTORIO INSTITUCIONAL

Dra. María Amparo Martínez Arroyo

Directora General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Dr. Luis Gerardo Ruíz Suárez

Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

COORDINACIÓN TÉCNICA

Dr. Arturo Gavilán García

Director de Investigación sobre Contaminación, Sustancias, Residuos y Bioseguridad

Dra. Ania Mendoza Cantú

Subdirectora de Investigación sobre Sustancias y Residuos

Dr. Víctor López Gómez

Subdirector de Bioseguridad

M. en I. Tania Ramírez Muñoz

Jefa de Departamento de Estudios de Residuos

I. Q. Valia Maritza Goitia Leal

Directora de Laboratorios del INECC

I. Q. Luis Felipe Abreu García

Subdirector de Evaluación analítica de Contaminantes

Q. A. Víctor Hugo Ríos Baza

Jefe de Departamento de Espectrometría de Elementos

Q. Eduardo Gutiérrez Feria

Enlace de Análisis de Espectroscopía de Emisión Atómica

M. en C. José Abraham Ortínez Álvarez

Director de Investigación sobre Transporte e Impactos de los Contaminantes

M. en C. Roberto Basaldud Cruz

Subdirector de Investigación de Exposición a la Contaminación

M. en I. Francisco Hernández Ortega

Subdirector de Modelación Ambiental

M. en I. A. Miguel Ángel Flores Román

Jefe de Departamento de Estudios de Sustancias y Residuos

I. Q. I. Becki Jiménez Gatica

Enlace de Evaluación de Exposición Personal



ÍNDICE

RE	SUM	EN EJECUTIVO	7
7.	PAN	ORAMA GENERAL Y ANTECEDENTES	9
	1.1.	SUELO	9
	1.2.	AIRE	21
	1.3.	DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS OFICIALES	23
2.	MUE	STREO PRELIMINAR	29
	2.1.	MONITOREO DE MERCURIO EN AIRE AMBIENTE	31
	2.2.	DETECCIÓN DE METALES Y METALOIDES EN SUELO, POLVO URBANO Y BIOTA VEGETAL	41
	2.3.	MONITOREO DE EXPOSICIÓN PERSONAL	50
<i>3</i> .	PLAI	N DE MEDICIÓN A MEDIANO Y LARGO PLAZO	60
	3.1.	MONITOREO DE MERCURIO EN AIRE AMBIENTE	60
	3.2.	MONITOREO DE SUELO Y POLVO URBANO	60
	3.3.	MONITOREO DE LA EXPOSICIÓN PERSONAL	61
4.	REF	ERENCIAS CONSULTADAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Estado de Sonora dentro de la República Mexicana	9
Figura 2. Regiones y distritos mineros del Estado de Sonora Figura 3. Cuenca alta del río Sonora	10 11
Figura 4. Cambios ocurridos en la región de Cananea en el periodo 2010-2020	14
Figura 5. Ubicación de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en los nueve municipios de la cuenca alta del río Sonora	16
Figura 6. Ubicación de la ciudad de Cananea	22
Figura 7. Porcentaje por municipio de empresas o establecimientos de competencia federal que reportan al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes	26
Figura 8. Número de empresas o establecimientos por sector o giro productivo que reportan al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes en los municipios de la cuenca alta del río Sonora	27
Figura 9. Áreas con actividad minera detectada en la zona de Cananea	29
Figura 10. Zona minera en Cananea	30
Figura 11. Recorrido de la Ruta 1 para el monitoreo preliminar exploratorio	32
Figura 12. Monitoreo de mercurio en aire en Ruta 1	32
Figura 13. Recorrido de la Ruta 2 para el monitoreo preliminar exploratorio	33
Figura 14. Monitoreo de mercurio en aire en Ruta 2	33
Figura 15. Recorrido de la Ruta 3 para el monitoreo preliminar exploratorio	34
Figura 16. Monitoreo de mercurio en aire en Ruta 3	34
Figura 17. Mapa de isoconcentraciones de mercurio detectadas en el monitoreo de mercurio de la Ruta 1, 2 y 3	35
Figura 18. Mapa de isoconcentraciones de mercurio detectadas en el monitoreo de mercurio de la Ruta 1	37
Figura 19. Mapa de isoconcentraciones de mercurio detectadas en el monitoreo de mercurio de la Ruta 2	39
Figura 20. Mapa de isoconcentraciones de mercurio detectadas en el monitoreo de mercurio de la Ruta 3	40
Figura 21. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo superficial	43
Figura 22. Ubicación de los sitios de muestreo de perfiles de suelo	44

4
5
2
4
5
ŝ
7
3

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación de depósitos de jales en la cuenca alta del río Sonora	15
Tabla 2. Principales datos sobre la gestión de residuos sólidos urbanos en los nueve municipios que conforman la cuenca alta del río Sonora	17
Tabla 3. Zonas en las que se dividió el sitio afectado por el derrame de la mina Buenavista del Cobre ocurrido en 2014, con fines de remediación	23
Tabla 4. Resultados de los análisis de metales en las muestras de suelo tomadas en las cinco zonas de estudio definidas para la remediación del sitio afectado por el derrame de la mina Buenavista del Cobre ocurrido en 2014	24
Tabla 5. Número de sustancias reportadas por municipio por sus emisiones al aire o al suelo por las empresas o establecimientos ubicados en los municipios de la cuenta alta del río Sonora	27
Tabla 6. Cantidades totales de las principales sustancias emitidas al aire y suelo por las empresas o establecimientos ubicados en los municipios de la cuenta alta del río Sonora	28
Tabla 7. Calendario de actividades para el monitoreo preliminar exploratorio	30
Tabla 8. Resultados de las concentraciones de mercurio medidas en los puntos de las Ruta 1	36
Tabla 9. Resultados de las concentraciones de mercurio medidas en los puntos de las Ruta 2	37
Tabla 10. Resultados de las concentraciones de mercurio medidas en los puntos de las Ruta 3	39
Tabla 11. Sitios de muestreo para la detección de metales y metaloides en suelo, polvo urbano y biota vegetal	42
Tabla 12. Concentraciones de metales y metaloides de suelo superficial	46
Tabla 13. Concentraciones de metales y metaloides de suelo superficial (continuación)	47
Tabla 14. Concentraciones de metales y metaloides en los perfiles de suelo	48
Tabla 15. Concentraciones de metales y metaloides en los perfiles de suelo (continuación)	48
Tabla 16. Concentraciones de metales y metaloides en polvo urbano	49

Plan para la Atención Integral de Cananea Componentes de Suelo, Aire y Biota

Tabla 17. Concentraciones de metales y metaloides en polvo urbano	49
(continuación)	
Tabla 18. Concentraciones de metales y metaloides en biota vegetal	49
Tabla 19. Concentraciones de metales y metaloides en biota vegetal	
(continuación)	50
Tabla 20. Concentración de partículas PM _{2.5} obtenidas del muestreo	
a lo largo de las rutas de transporte público y en las	
principales vialidades de la ciudad de Cananea	54
Tabla 21. Concentraciones de PM _{2.5} en aire ambiente en dos sitios de	
la ciudad de Cananea	55

RESUMEN EJECUTIVO

La prolongada historia geológica del estado de Sonora le han transmitido características favorables para el emplazamiento de yacimientos minerales metálicos y no metálicos, haciendo de él un importante estado minero que explota yacimientos de cobre, molibdeno y oro, así como de grafito, wollastonita y barita, pero también una región con elevados niveles naturales de diversos metales en sus suelos. Dentro de este territorio, el área de interés del presente Plan de Atención, es decir la cuenca alta del río Sonora, se ubica entre el poblado de Cananea al norte y la presa El Molinito al sur y tienen una superficie total de 9292 km². Esta zona tiene varios desarrollos mineros, la mayoría de ellos con actividad intermitente y, algunos de ellos, en producción, incluida la mina Buenavista del Cobre, que es la más grande de México y uno de los depósitos de cobre más grandes del mundo.

Además de otras actividades antropogénicas, los desarrollos mineros en esta zona, dada la naturaleza de sus operaciones, emiten y liberan diversos contaminantes al ambiente. Entre ellos se encuentran las emisiones al aire de vehículos y maquinaria utilizada en los procesos de beneficio, los minerales y metales pesados que se extraen y que quedan como remanente en el suelo, que se disponen como depósitos o presas de jales o cuyas partículas se volatilizan y depositan en lugares alejados al punto de emisión. De esta manera, estas actividades se pueden convertir en importantes fuentes de exposición de las poblaciones aledañas y representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

En adición a estas emisiones de las actividades rutinarias, en esta zona se han registrado varios incidentes que han perjudicado al ambiente. Tal es el caso del derrame de 40000 m³ de disolución ácida de hierro-cobre (Fe-Cu) ocurrido el 6 de agosto de 2014 en la parte más alta del arroyo Tinajas, debido a una falla de la presa Tinajas, en la mina Buenavista del Cobre.

En este contexto y como parte de un plan de monitoreo preliminar en esta zona, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) realizó un estudio exploratorio del 9 al 20 de agosto de 2021, en el que se buscó recorrer la mayor extensión posible de área de estudio para identificar los sitios donde las concentraciones fueran más elevadas. La campaña de monitoreo tuvo una duración de cuatro días (del 17 al 20 de agosto de 2021), en los cuales se reconoció la zona impactada, se tuvo acercamiento con las autoridades involucradas y la población afectada y se monitorearon los puntos críticos en donde se ha detectado un impacto al ambiente, para así desarrollar los muestreos pertinentes. El monitoreo se dividió en tres componentes: 1) Monitoreo de mercurio en aire ambiente, 2) Toma de muestras de suelo, polvo y biota vegetal para determinación de metales y 3) Monitoreo de exposición personal.

Para el monitoreo de mercurio en aire ambiente, se evaluaron tres rutas en dirección norte, centro y sureste del municipio de Cananea, y la concentración promedio más alta para este metal se identificó en la zona sureste del municipio, en dirección al municipio de Arizpe (303.7 ng/m³), y la concentración más baja en la zona norte del municipio (145.8 ng/m³). Cabe destacar que, en las tres rutas evaluadas, los niveles detectados de mercurio en aire fueron inferiores al valor de exposición máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud, que es igual a 1000 ng/m³ promedio anual; sin embargo, algunos estudios realizados en otras zonas mineras han identificado que los niveles de mercurio en aire varían en diferentes periodos del año y con los cambios de temperatura durante el día; por lo tanto, no es posible descartar que las concentraciones de mercurio en el área de estudio puedan incrementarse en diferentes temporadas y horarios.

En el muestreo exploratorio de suelo, polvo urbano y biota vegetal, se encontraron valores importantes de arsénico, cobre, selenio, plomo, zinc, cadmio y molibdeno, los cuales superan los valores establecidos por en los estándares canadienses para suelos de uso agrícola y/o, residencial y, en varias ocasiones, para los usos comercial e industrial. La presencia de estos metales, como una fuente permanente de exposición a lo largo de todo el año, requieren ser verificada mediante un muestreo intensivo tanto en época de lluvias como en temporada de sequía, en conjunto con el monitoreo de partículas atmosféricas para determinar los posibles riesgos a la salud humana y al ambiente.

Aun cuando México no cuenta con una normatividad que establezca valores máximos permisibles para exposición personal, varios estudios han identificado diversos impactos en la salud de la población cuando ésta se expone a altas concentraciones de partículas respirables (PM_{2.5}), como las determinadas en el presente estudio, aun en periodos cortos de tiempo.

Las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ determinadas en las muestras colectadas en las azoteas del Hospital General de Cananea y la Unidad Medico Familiar 55 (IMSS) no rebasaron el límite de 24 horas establecido en la NOM-025-SSA1-2014, además de ser consistentes con los resultados reportados en otros estudios realizados en la ciudad de Cananea.

La modelación, a partir de los datos de partículas, de trayectorias inversas de las masas de aire mostró, como una primera aproximación, que las parcelas de aire que llegan a los dos sitios de monitoreo (Hospital General de Cananea y Unidad Medico Familiar No 55) pasan a través de la zona industrial y la presa de jales de la minera Buenavista del Cobre; que la zona urbana de la ciudad de Cananea recibe aportaciones importantes de depósito atmosférico provenientes de esa zona industrial; y que , con alta probabilidad, dicho depósito ocurre mayoritariamente en calles, techos de viviendas y escuelas donde habitan y desarrollan sus actividades cotidianas los habitantes de Cananea.

1. PANORAMA GENERAL Y ANTECEDENTES

1.1. Suelo

a) Descripción de las características geológicas y edafológicas de la región de la cuenca del río Sonora

La región de interés del presente Plan de Atención es parte del Estado de Sonora, el cual se localiza en la porción noroeste de la República Mexicana (Figura I), su extensión territorial corresponde al 9.4% de la superficie continental nacional y cuenta con 1209 km de litorales, a lo largo del Golfo de California. La entidad está integrada por 72 municipios. Su población es de 2 944 840 habitantes (INEGI, 2021a).

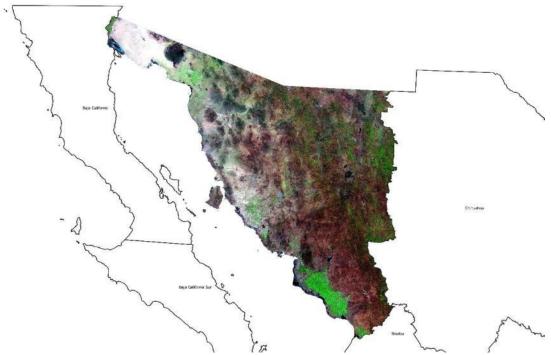


Figura 1. Ubicación del Estado de Sonora dentro de la República Mexicana. Fuente: INEGI. 2019. Geomediana Landsat 7.8.

Fisiográficamente el estado comprende porciones de cuatro provincias: la provincia de la Sierra Madre Occidental, la provincia de Sierras Sepultadas, la provincia de Sierras y Llanuras del Norte (Basins and Ranges) y la provincia de la Llanura Costera del Pacífico (Raisz, 1959; INEGI, 1989).

En Sonora las rocas que forman su basamento son metamórficas de los bloques Caborca y Norte América, con edades entre 1600 y 1800 Ma, así como granitoides que las cortan. Las primeras rocas sedimentarias se depositan desde finales del Precámbrico (~800 millones de años) y durante todo el Paleozoico. Ya en el

Mesozoico, la secuencia sedimentaria dio origen a los yacimientos de carbón que hoy se explotan. A fines del Cretácico (~80 millones de años (Ma)) y principios del Terciario la actividad de un arco volcánico produce un volcanismo generalizado y la formación de la mayoría de los yacimientos minerales de esta región. La formación de la Sierra Madre Occidental (~33-27 Ma) y la apertura del Golfo de California (~12 Ma) delinean la actual conformación del relieve del estado de Sonora (González León, 2013).

La prolongada historia geológica del estado de Sonora sintetizada anteriormente, le han transmitido características favorables para el emplazamiento de yacimientos minerales metálicos y no metálicos, haciendo que Sonora sea un importante estado minero que explota yacimientos de cobre, molibdeno y oro, así como de grafito, wollastonita y barita; sobresaliendo por su producción las minas de Cananea y La Caridad. En la Figura 2 se muestran las regiones y distritos mineros del Estado de Sonora.

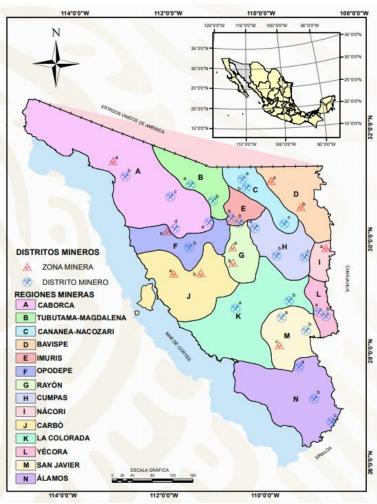


Figura 2. Regiones y distritos mineros del Estado de Sonora. Fuente: SGM, 2020.

La región de interés, es decir la cuenca alta del río Sonora, que se ubica entre el poblado de Cananea al norte y la presa El Molinito al sur, tienen una superficie total de 9292 km². Esta región tiene varios desarrollos mineros, la mayoría de ellos con actividad intermitente y, algunos de ellos, en producción, incluida la mina Buenavista del Cobre, que es la mina más grande de México y uno de los depósitos de cobre más grandes del mundo (Figura 3) (Calmus et al., 2018).

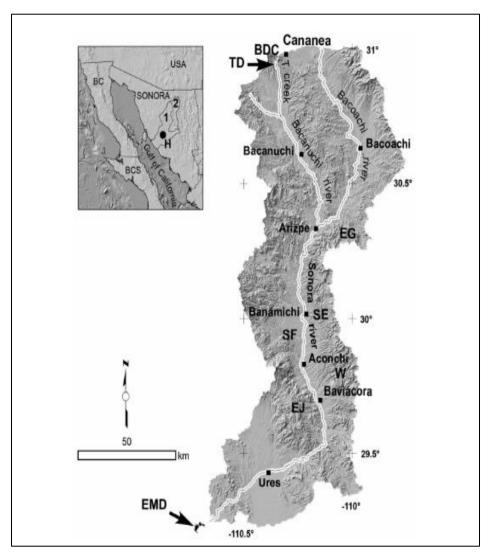


Figura 3. Cuenca alta del río Sonora. 1: Cuenca del río Sonora; 2: Cuenca alta del río Sonora; BC: Estado de Baja California; BCS: Estado de Baja California Sur; BDC: Buenavista del Cobre; EG: El Gachi; EJ: El Jaralito; EMD: Represa El Molinito; H: Hermosillo; SE: Santa Elena; SF: San Felipe; TD: Presa de Tinajas; W: Washington. Fuente: Calmus et al., 2018.

En esta región el basamento corresponde a un complejo ígneo-metamórfico del Precámbrico-Proterozoico medio, representado por el Esquisto Pinal (1640-1700

Ma) y por el Granito Cananea (1,440 ± 15 Ma), ambas litologías pertenecen al Cratón de Norteamérica (Anderson y Silver, 1977).

Las calizas del Paleozoico (Devónico-Pérmico) cubren discordantemente al basamento y subyacen a secuencias volcánicas del Mesozoico (Jurásico) y sedimentarias (Cretácico). Toda esta secuencia sedimentaria y volcánica está afectada por el Batolito de Sonora e intrusivos porfídicos de edades del Mesozoico. A finales del Cretácico y principios del Terciario ocurren emplazamientos de diques de composición basáltica, previos a la intrusión porfirítica asociada a la mineralización de cobre en esta región, que produjo también alteración hidrotermal: sericitización, silicificación, argilitización y propilitización. La tectónica distensiva del Terciario es responsable del depósito de sedimentos continentales como areniscas y conglomerados, así como de derrames basálticos aislados. (Damon et al., 1983; Wodzicki, 1995).

A lo largo de la cuenca alta del río Sonora existen varias zonas caracterizadas por alteración hidrotermal o mineralización, que forman parte del fondo geoquímico. Por lo tanto, algunos de ellos incluyen minas actualmente activas, mientras que muchos otros depósitos están sin explotar o en producción. La Figura 3 muestra, de norte a sur, los principales desarrollos mineros, que corresponden al Cu-Mo Buenavista del Cobre, el Pb-Zn El Gachi, el Ag (Au) Santa Elena, el Pb-Zn (Au) San Felipe, los sitios mineros de tungsteno El Jaralito y Cu-W-Mo Washington.

Esta región incluye, total o parcialmente, los municipios de Santa Cruz, Cananea, Nogales, Naco, Ímuris, Cucurpe, Arizpe, Bacoachi y Fronteras, y alberga las principales minas de cobre activas en Sonora, además de Buenavista del Cobre (filial del Grupo México) ya antes mencionadas, tales como las minas de cobre Puertecitos (mina en exploración, empresa Paget Resources Corporation), María (empresa Minera María, S.A. de C.V.) y Milpillas (mina subterránea, empresa Minera La Pareña, S.A. de C.V.). Otras minas existentes son la mina de bórax El Álamo (exploración avanzada, empresa Materiales Primas Magdalena, S.A. de C.V.), la mina de cobre y oro, El Pilar (exploración avanzada, empresa Santa Fe Gold Corp.), la mina de oro Amelia (exploración avanzada, empresa Firts Silver Reserve, S.A. de C.V.), la mina de oro y plata Bacoachi (empresa Minera La Escuadra, S.A. de C.V.) y la mina de cal hidratada Sonocal (empresa Sonocal, S.A. de C.V.) (Dávila-Luna et al., 2018).

En el caso de la actividad minera que se desarrolla en esta región, la determinación de cualquier perturbación ambiental requiere establecer un nivel de fondo geoquímico de las rocas como marco de referencia. En los estudios ambientales, los valores de referencia que constituyen la línea base geoquímica son comúnmente el resultado de una combinación entre contribuciones antropogénicas y geogénicas. Asimismo, el término fondo natural se ha acuñado para representar el elemento geogénico, que refleja la composición geoquímica debida a procesos naturales no influidos por las actividades humanas. En el caso de los distritos mineros, el fondo geoquímico toma en cuenta los posibles valores elevados de las zonas ricas en minerales; por lo tanto,

estos valores no representan aportes antropogénicos. Por ejemplo, una zona rica en Cu proporcionará naturalmente altos valores de metal al fondo geoquímico. En otras palabras, las rocas constituyen la única fuente para definir un fondo geoquímico no perturbado por las actividades humanas.

En contexto anterior, Calmus y colaboradores (2018) realizaron un estudio para establecer el nivel de fondo geoquímico de la cuenca alta del río Sonora, el cual incluyó áreas mineras activas e históricas. Los datos obtenidos mostraron que las rocas en esta región tienen un comportamiento geoquímico similar entre ellas, caracterizado por anomalías positivas (concentraciones superiores al valor promedio de la corteza terrestres de Mn, Ca, P, Ba, Zn, As, Ag, Sb, W, Pb y Bi en relación con la corteza continental superior. Los valores de coeficiente de variación revelan que Sc, Y, Zr, Ce, Yb, Fe, Ti y Al muestran un comportamiento conservador (es decir, son elementos que abundan en la corteza terrestre, y sus concentraciones no se modifican sustancialmente por las actividades humanas y los ciclos biogeoquímicos) y, por lo tanto, se recomiendan para sean utilizados en estudios ambientales en la cuenca.

Dentro de esta región, destaca el municipio de Cananea dada su historia minera que data del siglo XVIII, cuando los misioneros jesuitas descubren y empiezan a explotar los minerales ricos en oro y plata en la Mina Cobre Grande (SGM, 2012).

Actualmente, la zona minera de Cananea es una de las más grandes del país por la explotación de metales como cobre, oro, plata y zinc, y porque alberga los principales centros mineros productores de oro, plata y cobre. La producción de cobre de 2018 a 2019 tuvo un crecimiento de 378 mil a 390 mil toneladas; la plata aumento en el mismo periodo de 262 a 298 toneladas, mientras que el oro presentó una reducción de 3,070 a 2,813 kg. Los datos oficiales registran en el 2019 una contribución de este municipio del 6.1% de oro, 45.65% de plata y 65.52% de cobre a la participación estatal. Además de estos metales, también se explota otros recursos, como el molibdeno (43.06% estatal) (SGM, 2020).

En la actualidad, la población del municipio es de 39,451 habitantes, con tasa de alfabetización de 99.4% en el rango de 15 a 24 años y de 98.8% en el rango de 25 años y más; y donde el 55.6% es población económicamente activa (PEA). El 97.8% de la población cuenta con agua entubada, 99.5% cuenta con drenaje y servicio sanitario y el 99.4% cuenta con energía eléctrica (INEGI, 2021a).

Los desarrollos mineros en esta región, dada la naturaleza de sus operaciones, emiten y liberan contaminantes al ambiente, entre los cuales están las emisiones de vehículos y maquinaria utilizada en los procesos de beneficio, los minerales y metales pesados que quedan como remanente en el suelo, que se disponen como residuos o cuyas partículas se volatilizan y depositan en lugares alejados al punto de emisión. Asimismo, se han registrado diversos incidentes que han perjudicado al ambiente de la zona.

Aprovechando las ventajas que ofrece el Cubo de Datos Geoespacial implementado por el INEGI con la serie histórica de imágenes Landsat para el territorio nacional, se realizó un extracto para la región de Cananea (Figura 4).

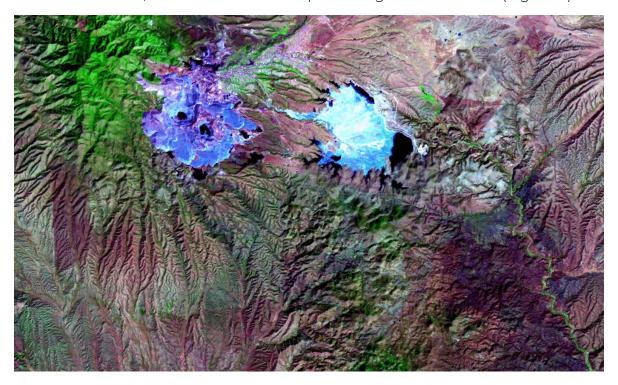


Figura 4. Cambios ocurridos en la región de Cananea en el periodo 2010-2020. Fuente: INEGI, 2021b.

En esta secuencia de imágenes de la Figura 4, que cubren el periodo 2010-2020, puede observarse lo siguiente:

- La expansión de la mina a cielo abierto a partir de 2014.
- La afectación de la cobertura de bosques de encino y bosques de coníferas, como resultado de este incremento de la actividad minera.
- La construcción de la presa desde 2015.
- La geometría constante del cuerpo de agua localizado al sureste de Cananea.

b) Descripción de los depósitos de jales y el manejo de residuos sólidos urbanos en la región

Dado que la actividad minera se ha dado de manera histórica en esta región, existen en ella múltiples depósitos de jales que también pueden representar fuentes de contaminación de los suelos por metales. Para determinar la ubicación precisa de estos depósitos, además de las instalaciones mineras de la cuenta alta del río Sonora, Dávila Luna y colaboradores (2018) llevaron a cabo un estudio a través de métodos de percepción remota y análisis espectral en el cual ubicaron varios de estos depósitos. En la Tabla 1 se resumen su ubicación con sus respectivas coordenadas geográficas.

Datos del CENAPRED identifican varias plantas de jales activas en el municipio de Cananea clasificadas como de "Muy Alto" peligro, las cuales, en conjunto, tienen una capacidad de 100,000 toneladas por día y trabajan mediante un proceso de lixiviación la explotación de cobre, oro, plata y zinc (CENAPRED, 2018).

Tabla 1. Ubicación de depósitos de jales en la cuenca alta del río Sonora. Fuente:

Dávila-Luna et al., 2018.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		
		X	Υ	
Jale Mina Milpillas	Presa de jales de la Mina de cobre Milpillas	-110.4324	31.1125	
Jale Mina María	Mina de cobre María	-110.4136	31.0470	
Jale Mina BVC	Presa de jales de la Mina Buenavista del Cobre	-110.2332	30.9583	
New Jale BVC	Nueva presa de jales de la Mina Buenavista del Cobre	-110.2927	30.8484	

Los impactos al ambiente de los jales abarcan una zona mayor que sólo el municipio de Cananea. El propio CENAPRED registra tres plantas de jales en la región. La primera en el municipio de Santa Cruz en donde se explota el cobre por un proceso de lixiviación, que cuenta con una capacidad de 8,000 toneladas por día y está clasificada como de "Muy Alto" peligro. La segunda ubicada en el municipio de Bacoachi donde se explota oro y plata por flotación, tiene una capacidad de 300 toneladas por día y está clasificada como de "Muy Alto" peligro. Finalmente se ubica una planta de jales inactiva en el municipio de Arizpe donde se explotada oro y plata con una capacidad de 50 toneladas por día y una clasificación de "Alto" peligro (CENAPRED, 2018).

Dado que el manejo inadecuado de residuos sólidos urbanos (RSU), además de la actividad minera, puede ser una fuente de contaminación del suelo, es conveniente analizar la situación del servicio que se brinda en los municipios que conforman la cuenca alta del río Sonora. A partir del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2019 (INEGI, 2020), se extrajeron los principales datos relativos a la gestión de RSU de los municipios de Arizpe, Bacoachi, Cananea, Cucurpe, Fronteras, Ímuris, Naco, Nogales y Santa Cruz, en particular los relacionados con los sitios de disposición final, los cuales se resumen en la Tabla 2. En la Figura 5 se muestra la ubicación de dichos sitios.

Tabla 2. Principales datos sobre la gestión de residuos sólidos urbanos en los nueve municipios que conforman la cuenca alta del río Sonora.

	CANTIDAD PROMEDIO	NÚMERO TOTAL DE	SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN		SISTEMA DE CAPTACIÓN Y EXTRACCIÓN DE LIXIVIADOS		SISTEMA DE CONTROL DE BIOGÁS	
MUNICIPIO	DIARIA DE RESIDUOS RECOLECTADOS (kg)	SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL	ARCILLA COMPACTADA Y GEOMEMBRANA	NINGUNO	RECIRCULACIÓN Y TRATAMIENTO	NINGUNO	APROVECHAMIENT O ENERGÉTICO	NINGUNO
Arizpe	2000	1	0	1	0	1	0	1
Bacoachi	900	1	0	1	0	1	0	1
Cananea	32000	1	1	0	1	0	0	1
Cucupe	1000	1	0	1	0	1	0	1
Fronteras	3120	3	0	3	0	3	0	3
Ímuris	3500	1	0	1	0	1	0	1
Naco	7650	1	0	1	0	1	0	1
Nogales	380000	1	1	0	1	0	1	0
Santa Cruz	500	1	0	1	0	1	0	1

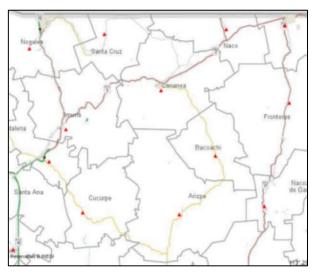


Figura 5. Ubicación de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en los nueve municipios de la cuenca alta del río Sonora. Fuente: INEGI, 2020.

c) Evidencias sobre la contaminación de suelos en la región

El 6 de agosto de 2014 se produjo un derrame de 40000 m³ de disolución ácida de Fe-Cu en la parte más alta del arroyo Tinajas, debido a una falla de la presa Tinajas, en la mina Buenavista del Cobre. Debido a que el arroyo Tinajas desemboca aguas abajo en la parte superior del sistema hidrológico del río Sonora y contribuye a la recarga del acuífero, este incidente desencadenó una gran preocupación socioeconómica y política, principalmente porque este sistema proporciona agua superficial para las actividades agrícolas y ganaderas. Además, el río Sonora abastece de agua a la represa El Molinito, que a su vez abastece de agua la ciudad de Hermosillo. A partir de la incidencia de esta emergencia ambiental, varios investigadores realizaron estudios para evaluar el efecto de la disolución ácida derramada sobre el suelo. A continuación, se resumen los resultados de dichos estudios.

El derrame de ácido sulfúrico al río Sonora, rico en iones de hierro y cobre, de la mina Buenavista del Cobre (Cananea) dio paso a la formación de varias fases sólidas de hierro (Fe). En un estudio efectuado por Escobar Quiroz y colaboradores (2019), las fases minerales fueron identificadas por espectroscopía de absorción de rayos X (XAS) y difracción de rayos X en polvo a granel (XRD), y químicamente a través de digestiones ácidas para la determinación multielemental, así como una extracción secuencial selectiva (SSE) de 3 pasos para cuantificar los tipos de fases de óxido de Fe y la contribución de los elementos asociados. La jarosita fue el único mineral de Fe identificado por XRD, pero la XAS permitió el reconocimiento de jarosita con elementos potencialmente tóxicos (PTE) incorporados en su estructura, haciendo que estos elementos sean menos propensos a la lixiviación. Además, sus fases poco cristalinas, como schwertmannita y ferrihidrita, se identificaron en varias muestras a través de XAS, que fueron confirmadas por SSE. También se identificaron otros posibles minerales adsorbentes de Fe (III), como maghemita y goethita; así como minerales mixtos de Fe (II)-Fe (III), como óxidos de color verde. Fue posible inferir la influencia del derrame de ácido en las diferentes áreas muestreadas a través de las distintas fases de Fe identificadas o la presencia de yeso. Se detectó que la influencia es menor donde la mineralogía no se asoció a pH bajo y existen concentraciones altas de sulfato. Todas las fases de Fe (III) precipitadas río abajo del derrame de ácido son conocidas por su alta capacidad de retención de PTE, ya sea por incorporación a sus estructuras o por adsorción superficial, contribuyendo así a la inmovilización de la contaminación de metales causada por el derrame de ácido. Además, varias otras muestras de desechos minero-metalúrgicos fueron analizadas por las mismas tres técnicas, lo que sugiere que muchos de los hallazgos de la mineralogía secundaria de Fe derivada del derrame ácido de la Mina Buenavista del Cobre son procesos comunes que ocurren en entornos afectados por la minería.

Rivera Uria y colaboradores (2018) estudiaron indicadores micromorfológicos de la interacción entre la disolución acida y material edáfico de un Fluvisol del río Bacanuchi, de una terraza afectada por el derrame de la mina Buenavista del Cobre, y una muestra de una columna de suelo tratada con la disolución acida

imitando el derrame. El suelo original no afectado es arenoso con características pedogenéticas poco desarrolladas; sin embargo, presenta abundantes carbonatos primarios y secundarios de tamaño micrítico y esparítico con valores altos de pH. En el suelo afectado por la disolución ácida, bajo condiciones naturales y de laboratorio, ya no se encuentran los carbonatos; mientras que se observaron minerales neoformados de yeso con intercrecimiento radial, junto con material fino ferruginoso. La cuantificación micromorfológica del material fino rico en hierro ha demostrado su aumento después de la interacción con la disolución ácida. Con estas evidencias se concluye que la interacción consistió en la reacción de neutralización entre las fases más reactivas del suelo y la disolución ácida, durante la cual se consumieron los carbonatos y se produjo la neoformación del yeso. Después de la neutralización, ocurrió una precipitaron de los óxidos de hierro finos, aumentó el pH y cambió el color del suelo. Es altamente probable que otros contaminantes metálicos co-precipitaran con los componentes ferruginosos.

Rivera-Uria y colaboradores (2019) realizaron una investigación con el fin de estudiar y comprender la interacción que se produjo entre la disolución ácida, derramada de la mina Buenavista del Cobre, y los suelos ubicados en el área del río Bacanuchi. La pregunta de investigación fue ¿los suelos en el área fueron capaces de amortiguar el impacto del paso de la disolución ácida? Dos perfiles de suelo fueron estudiados y caracterizados químicamente. El perfil afectado, 8A, se encontró en la ribera del río y el perfil no afectado, 8B, en la primera terraza del río. Además, se tomaron tres muestras superficiales (0-30 cm) RBI, SB2 (que pertenecen a 8B) y SB3 (que pertenece a 8A), para realizar pruebas de geodisponibilidad. Finalmente, se tomaron dos muestras inalteradas de los perfiles 8A y 8B para su estudio micromorfológico. Los resultados mostraron una diferencia entre los dos perfiles. El perfil 8A presentó un pH ácido, una conductividad eléctrica mayor y altas concentraciones de Fe. Pb. Cu y As en comparación con 8B. La geodisponibilidad mostró que los elementos enriquecidos de SB3 eran suficientemente estables y no estaban libres en la fase acuosa. La interacción con carbonatos presentes en los suelos formó nuevos minerales tales como yeso y copiapita. Los suelos del río Bacanuchi presentan carbonatos, los cuales interactuaron y estabilizaron a los elementos tóxicos presentes en la disolución ácida. De acuerdo con los resultados obtenidos de geodisponibilidad sería muy difícil que los elementos potencialmente tóxicos (EPT) se liberen a la fase acuosa; a menos que las condiciones redox cambien o un nuevo derrame ocurra provocando la liberación de los EPT al ambiente. En este trabajo se muestra la importancia de los carbonatos pedogénicos en suelos de ambientes áridos y semiáridos; estos carbonatos representan una barrera geoquímica natural que puede prevenir la migración de los EPT en áreas mineras.

Romero-Lázaro y colaboradores (2019) realizaron una investigación sobre el derrame de disolución ácida ferro-cuprífera en Cananea, Sonora, que alcanzó las principales corrientes superficiales de la cuenca del río Sonora, afectando suelos y sedimentos y aportándoles una coloración anómala parda amarillenta. En el presente estudio se dio seguimiento a la contaminación residual (CR) en suelos y

sedimentos, evaluando color, pH y conductividad eléctrica (CE) en 41 muestras obtenidas a lo largo de la cuenca, así como en los ejes vertical y horizontal de un perfil de suelo (TIIZ1B) afectado con CR. Estas propiedades podrían ser indicadores indirectos, va que se modificaron por influencia del vertido minero. En las muestras también se determinó la concentración total de elementos potencialmente tóxicos presentes en el vertido. Los resultados indicaron correlación lineal aceptable (0.75) entre la Conductividad eléctrica (CE) y el vector de color amarillo (b*), así como entre éstos y las concentraciones de As, Cu, Fe y Zn (r = 0.52-0.91). El análisis del perfil de suelo realizado en la pared vertical de la terraza del arroyo Tinajas (TIIZ1B) permitió relacionar color, pH y CE con cambios mineralógicos y aumento en las concentraciones de As, Cu y Fe. El incremento en los vectores de color hacia tonalidades rojas (a*) y amarillas se relaciona con aumento en la concentración de Fe, y el incremento en la luminosidad (L*) se vincula con la precipitación de yeso. El Fe y el As aumentaron donde el pH fue más ácido y el Cu se incrementó con el aumento del pH y cuando el punto de carga cero fue negativo. El Color, el pH y la CE son parámetros útiles en la determinación indirecta de la CR.

González Bórguez (2017), realizó un estudio en el cual identificó la bioaccesibilidad oral de los contaminantes contenidos en las fracciones finas (menor a 250 micras) del suelo en la localidad de Ures, Sonora, con el fin de evaluar el posible nivel de contaminación, así como la posibilidad de que la textura del suelo, en las que estos contaminantes pueden estar siendo transportados, influye como un factor en la bioaccesibilidad de los metales. Siguiendo la metodología indicada según las normas mexicanas establecidas para el muestreo y evaluación de suelos contaminados se utilizaron técnicas de análisis textural, fluorescencia portátil de rayos X con tubos miniaturizados (PXRF) y la caracterización de la bioaccesibilidad para identificar y cuantificar los contaminantes presentes en el suelo. Con los resultados de estos análisis se calculó el índice de polución (IP) y riesgo según los modelos de cociente de peligro (HQ), incluyendo el modelo biocinético integrado de exposición y absorción para el plomo en niños (IEUBK). Los resultados muestran una clara tendencia de los metales analizados a concentrarse dentro de las fracciones más finas del suelo y, debido a que la bioaccesibilidad aumenta en partículas con diámetro menor con respecto a la fracción gruesa, se espera una afectación en los niveles de bioaccesibilidad analizados. Los contaminantes que se han reconocido en este estudio (Pb, V, As) presentan distribuciones espaciales que indican un origen antropogénico, ya sea urbano o por las actividades presentes en la zona de estudio, aparentemente no asociados al derrame del 2014. Con respecto al riesgo en la zona, los niveles de contaminación observados son generalmente moderados y con riesgo bajo.

Por otra parte, en el *Diagnóstico de la situación ambiental asociado al derrame de disolución ácida ferro-cuprífera de Buenavista del Cobre hacia la cuenca del río Sonora*, elaborado por el grupo interdisciplinario e interinstitucional conformado por investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad de Sonora y el Instituto Tecnológico de Sonora analizó y reinterpreto los resultados de los estudios realizados inmediatamente después del derrame y

los integró con los resultados propios obtenidos del denominado "muestreo orientativo" que realizó en dos periodos: 13-15 de septiembre de 2014 y 01-04 de octubre de 2014 (Fideicomiso Río Sonora, 2014). La interpretación de los datos generados por otros grupos de la UNAM permitió puntualizar algunos de los resultados sobre la situación ambiental. Los resultados del monitoreo de la calidad de suelos, realizados y reportados en su momento por la Universidad de San Luis Potosí, se interpretaron considerando los valores genéricos de referencia señalados en NOM-147-SEMARNAT/SSA-2004 (DOF, 2007). Para los elementos no contemplados en la NOM-147 se seleccionaron los valores de referencia de la US-EPA. Estos valores genéricos de referencia fueron calculados considerando el riesgo a la salud humana y asumiendo la biodisponibilidad total de los contaminantes considerados. Esta interpretación permitió concluir lo siguiente:

- Las concentraciones totales de Se, Be, Cd. Ag, Tl, Hg y Cr VI fueron inferiores al límite de detección de la técnica de análisis. Por otro lado, las concentraciones totales de Ba, Ni, Al, Cr, Mn, Zn y Cu fueron inferiores a los valores genéricos de referencia. Estos resultados permitieron concluir que estos metales (Se, Ba, Cd, Ag, Tl, Hg, Cr Vl, Ba, Ni, Al, Cr, Mn, Zn y Cu) no representaron un riesgo para la salud humana.
- Entre los elementos traza que fueron detectados por la técnica de análisis y que en alguna de las muestras superaron el valor de referencia genérico están el As, V y Pb. La distribución de las concentraciones totales de As indicó que, al parecer, el impacto del derrame en los suelos se extiende desde el represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi y posiblemente hasta Arizpe. Desde Arizpe hasta casi El Molinito hay algunas muestras con valores de As que superan el valor genérico de referencia; sin embargo, las anomalías naturales o asociadas a actividades mineras antiguas de As y de otros elementos traza, desde Banámichi hasta Mazacohaui en el flanco este de la cuenca. permitieron especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1", que pudo deberse a zonas mineralizadas. En el caso del Pb, solamente en dos muestras (una cercana a Huepac y otra a unos 15 km antes de El Molinito) se infiere la existencia de anomalías naturales o asociadas a actividades mineras antiquas de Pb, desde Banámichi hasta Mazacohaui, en el flanco este de la cuenca, que también permitieron resultar de una fuente de contaminación distinta al derrame del represo y que pudieron deberse a zonas mineralizadas.
- En el caso de elementos mayores (Al, Fe y Mn), solamente el Fe superó el valor genérico de referencia, en un par de muestras (en las cercanías de El Molinito). Al igual que en el caso del Pb, de la información del Servicio Geológico Mexicano, se infiere a la existencia de anomalías naturales o asociadas a actividades mineras antiguas, a partir de Baviácora hasta Mazacohaui, tanto en el flanco oeste y este de la cuenca, por lo en este caso también puede especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame.

1.2. Aire

Estudios realizados por la Universidad de Sonora indican que la ciudad de Cananea presenta un clima semicálido subhúmedo, con una temperatura promedio 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 (Quintana Anguamea, 2019).

En el caso de contaminación de aire, se han realizaron varios estudios por parte de la Universidad de Sonora desde los años 2014 a 2018 respecto a metales y metaloides en material particulado, todos utilizando los datos de la estación de monitoreo ubicada en el Tecnológico de Cananea (coordenadas 39°59´20.12" de latitud norte y 110°15´58.52" de latitud oeste) (Figura 6).

La ciudad de Cananea forma parte de la Red Estatal de Infraestructura e Información sobre Calidad del Aire y su estación de monitoreo reporta una frecuencia de muestreo cada 6 días con un máximo de 60 muestras al año. Dicha estación cuenta con un muestreador de alto volumen que ha operado irregularmente. Además, existen cinco estaciones para medir dióxidos de azufre de la Compañía Mexicana de Cobre, S.A. de C.V., la cual reporta a la PROFEPA. El principal problema en esta ciudad son la PM_{2.5} provenientes de actividades mineras (SEMARNAT, 2017).

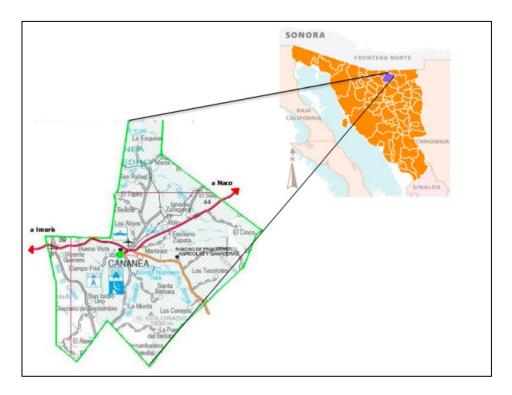


Figura 6. Ubicación de la ciudad de Cananea. Fuente: Quintana Anguamea, 2019.

Palomares Morales (2017) estudió la calidad del aire de Cananea considerando las PST y metales pesados (Cu, Cr y Mo) en el periodo de julio de 2014 a junio de 2015. Las concentraciones de metales no rebasaron los límites de referencia internacionales, pero los valores de PST superaron los niveles establecidos en la NOM-025-SSA1-1993. De forma muy similar, Herrera Ramírez (2019) estudió la calidad del aire en esta ciudad considerando también las PST y metales pesados (Cu, Pb y Mo) durante el mismo periodo. Los valores encontrados de PST rebasaron la normatividad mexicana en tres ocasiones, mientras que los valores de metales se hallaron por debajo de los límites de la OMS.

Martínez Martínez (2019) también analizó las concentraciones de PM_{10} , Cu, Fe, Mn, Pb en el aire ambiente para la región de Cananea para el año de 2017. Para las PM_{10} , las concentraciones se encontraron dentro de los límites normados en México en 77% de los días muestreados, pero el promedio anual sobrepaso lo establecido en la NOM-025-SSA1-1993. Los valores de Cu y Mn fueron menores a los límites internacionales de referencia y los de Pb fueron inferiores al límite de detección. Pero, los niveles de Fe sí excedieron los valores de referencia en dos ocasiones.

Cisneros González (2019) igualmente realizó un estudio para evaluar la calidad del aire en esta ciudad, tomado los parámetros de $PM_{2.5}$, Cr, Cu, Mo y Zn durante el año 2018. Los valores de Cr y Mo se encontraron por debajo del límite de

detección; mientras que el Cu y el Zn no rebasaron los límites de referencia de la USEPA. Por su parte, las $PM_{2.5}$ cumplieron con los valores de la normatividad mexicana. Por tanto, se concluyó que las concentraciones de estos contaminantes no representaron un peligro para la salud.

Por su parte Quintana Anguamea (2019) evaluó la calidad del aire respecto al material particulado (PM_{2.5}), Pb, Cd y Cu, As y Si para el mismo periodo anual de 2018. El método de muestreo fue con un equipo de alto volumen (Hi-Vol), según la norma NOM-035-ECOL-1993, por un periodo de 24 horas. Los metales se analizaron a través del procedimiento de espectroscopía de absorción atómica recomendado por la EPA para análisis de metales en PST y PM_{2.5}, y el Mo se determinó siguiendo el criterio de la Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) del 2017. Los resultados obtenidos para PM_{2.5} no rebasaron el máximo permisible y promedio anual establecidos por la NOM-025-SSA-1993. La distribución de días con buena y regular calidad del aire fue de 96.7 y 3.3, respectivamente. Se identificó que las concentraciones de Cu, Pb, As y Si se encontraron muy por debajo de los límites de comparación. En conclusión, se encontró que la ciudad de Cananea presentó en 2018 concentraciones por debajo de los estándares internacionales y una buena calidad del aire.

1.3. Descripción de los datos oficiales

a) Información de la Dirección de General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas de la SEMARNAT

Mediante información compartida mediante oficio por parte de la Dirección General de Gestión Integran de Materiales y Actividades Riesgosas de la SEMARNAT, dependencia encargada de revisar y aprobar, en su momento, el programa de remediación de los sitios afectados por el derrame de la mina Buena Vista del Cobre ocurrido en agosto de 2014, se tiene conocimiento sobre las siguientes medidas adoptadas:

 Considerando la extensión de la afectación (288 km), para la realización de las actividades de remediación, el sitio se dividió en cinco zonas, las cuales se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Zonas en las que se dividió el sitio afectado por el derrame de la mina Buenavista del Cobre ocurrido en 2014, con fines de remediación.

ZONAS	DESCRIPCIÓN GENERAL			
Zona 1	Tramo comprendido entre el punto del derrame en el represo tinajas 1 considerado el kilómetro 0 hasta el kilómetro 30, ubicado en el cauce del río Bacanuchi. 30 km de longitud, con una superficie de 2.81 ha.			
Tramo comprendido del kilómetro 30 hasta el kilómetro Zona 2 ubicado al sur de la localidad de Banámichi. 110 km de longitud, con una superficie de 947.5 ha.				

ZONAS	DESCRIPCIÓN GENERAL				
Zona 3	Tramo comprendido del kilómetro 140 hasta el kilómetro 180, localizado al sur del poblado de Baviácora. 40 km de longitud, con una superficie de 1,902 ha.				
Zona 4 Tramo comprendido del kilómetro 180 hasta el kilómetro Zona 4 Zona 4					
Zona 5	Tramo comprendido del kilómetro 224 hasta el kilómetro 276 y que corresponde al punto de descarga del río Sonora en la presa el				

- Se evaluó el Programa de Remediación el cual incluyó un estudio de caracterización del sitio, investigaciones históricas y la propuesta de remediación de las cinco zonas de estudio antes mencionadas.
- Para las zonas 2 a 5, además de lo antes señalado, en el programa de remediación se incluyó un estudio de evaluación de riesgo ambiental.
- Con el fin de elaborar y presentar su Programa de Remediación, las empresas Buenavista del Cobre, S.A. de C.V. y Operadora de Minas e Instalaciones Mineras, S.A. de C.V. siguieron los procedimientos señalados en la normatividad aplicable y tomaron como referencia la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Para la caracterización del sitio se realizó un muestreo. Para ello las muestras fueron distribuidas de manera sistemática a lo largo de las cinco zonas de estudio, las cuales fueron tomadas y analizadas por laboratorios acreditados y aprobados.
- Se analizaron todos los metales normados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y metales no normados como el Hierro, Aluminio, Cobre, Cromo, Zinc, Manganeso y Antimonio.
- Los resultados analíticos de las muestras tomadas para cada una de las zonas de estudio se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de los análisis de metales en las muestras de suelo tomadas en las cinco zonas de estudio definidas para la remediación del sitio afectado por el derrame de la mina Buenavista del Cobre ocurrido en 2014.

ZONAS	CONTAMINANTE CRÍTICO			
Zona 1	Arsénico superó los LMP de la NOM-147 (en 6 de 301 muestras). Hierro superó los límites extranjeros (en 17 de 301 muestras).			
Zona 2	Arsénico superó los LMP de la NOM-147 (en 19 de 954 muestras). Vanadio superó los LMP de la NOM-147 (en 13 de 954 muestras). Hierro superó los límites extranjeros (en 189 de 954 muestras).			

ZONAS	CONTAMINANTE CRÍTICO				
	Arsénico superó los LMP de la NOM-147 (en 19 de 954 muestras). Vanadio superó los LMP de la NOM-147 (en 13 de 954 muestras). Hierro superó los límites extranjeros (189 de 954 muestras).				
Zona 4	ona 4 Arsénico superó los LMP de la NOM-147 (en 2 de 810 muestras Hierro superó los límites extranjeros (en 57 de 810 muestras).				
	Arsénico superó los LMP de la NOM-147 (en 6 de 1005 muestras). Vanadio superó los LMP de la NOM-147 (en 6 de 1005 muestras). Hierro superó los límites extranjeros (en 54 de 1005 muestras).				

- Se aprobó el programa de remediación de la zona 1 con una duración de 8 semanas y el plan de muestreo final comprobatorio, correspondiente a un volumen de 2, 818.357 m³ en una superficie de 28, 183.57 m².
- En las zonas 2 a 5, se realizó un estudio de evaluación de riesgo al ambiente y a la salud humana y se determinaron niveles de remediación específicos (NRE) para arsénico, vanadio y hierro. Debido a que las concentraciones de estos tres elementos, para las zonas 2, 3 y 5, y de arsénico y hierro, para la zona 4, no rebasaron los NRE, no se llevaron a cabo acciones de remediación, ya que los riesgos eran aceptables, de acuerdo con lo señalado por el estudio de evaluación de riesgo ambiental, del cual la COFEPRIS dio su visto bueno. Sin embargo, se determinó que existía un riesgo no aceptable para la flora y fauna de las cinco zonas, el cual requería de un monitoreo a mediano plazo, para evaluar el estado del ecosistema y observar si se presentaban modificaciones que apuntaran a una recuperación después de la emergencia, por lo cual se propuso llevar a cabo un programa de monitoreo por un periodo de 3 años.
- En mayo de 2016, se presentaron los resultados del muestreo final comprobatorio y el aviso de conclusión del programa de remediación de un volumen de 2,843.60 m³ de suelo contaminado con hierro en un área de 28, 183.57 m² de la zona 1. Se concluyó que se alcanzaron los niveles de remediación propuestos y autorizados para este caso. Asimismo, se presentaron los avisos de conclusión de los programas de remediación específicos para las zonas 2, 3, 4 y 5, y sólo quedó pendiente el monitoreo ambiental correspondiente.
- En enero de 2020, la Segunda Sala de la Suprema Corte de Justicia de la Nación emite la sentencia que otorga el aparo por el que se deja sin efectos el oficio de Conclusión del Programa de Remediación previamente aprobado.

b) Información de la Dirección de General de Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de la SEMARNAT

Según la información compartida por la Dirección de General de Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de la SEMARNAT, para el periodo comprendido de 2014 a 2019, de los nueve municipios de la cuenca alta del río Sonora, sólo en cinco de ellos se localizan empresas o establecimientos industriales, comerciales o de servicios de competencia federal que reportan al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)

y éstos corresponden a Cananea, Cucupe, Naco, Nogales y Santa Cruz, los cuales suman en total 253 de estas empresas o establecimientos, con varios giros o sectores productivos representados. En la Figura 7 se muestra la distribución en porcentaje empresas o establecimientos que reportan al RETC de cada uno de esos municipios y en la Figura 8 los giros o sectores industriales que representan.

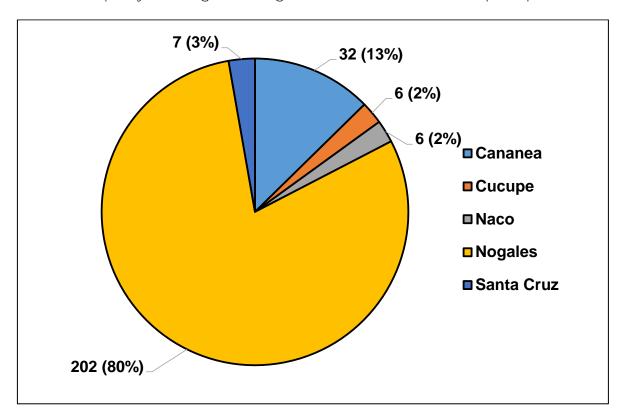


Figura 7. Porcentaje por municipio de empresas o establecimientos de competencia federal que reportan al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.

Considerando todas las empresas o establecimientos, todo el período analizado y tanto las emisiones al aire como al suelo, se identificó un total de 44 sustancias diferentes reportadas, entre las cuales se incluyen algunas de composición indefinida como la neblina ácida o las partículas suspendidas totales (PST), en el caso de las emisiones al aire, o los sólidos suspendidos totales (SST) o sólidos suspendidos sedimentables (SS), en el caso de las emisiones al suelo.

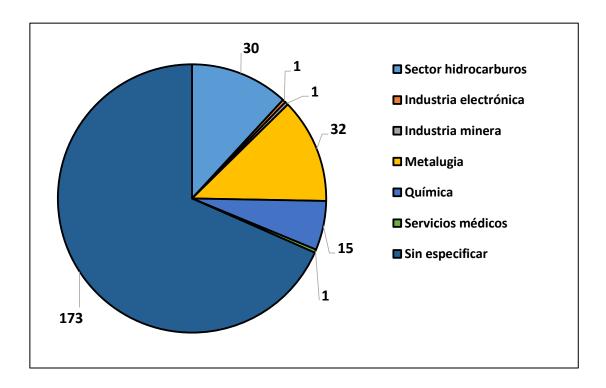


Figura 8. Número de empresas o establecimientos por sector o giro productivo que reportan al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes en los municipios de la cuenca alta del río Sonora.

Del total anterior, las sustancias más reportadas por sus emisiones al aire en el periodo estudiado son los óxidos de nitrógeno y de azufre, el monóxido y el bióxido de carbono, así como las PST. Para el último año analizado (2019) también son notorios los reportes de metano, benceno, etilbenceno, tolueno, xileno y hexano. Por su parte, para el caso del suelo se reportan 13 sustancias que incluyen ocho metales (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn) y otros elementos químicos (P y N), así como cianuro, SST y SS. El número de sustancias reportadas por municipio para aire y suelo se resumen en la Tabla 5 y las cantidades totales emitidas para las principales sustancias en la Tabla 6.

Tabla 5. Número de sustancias reportadas por municipio por sus emisiones al aire o al suelo por las empresas o establecimientos ubicados en los municipios de la cuenta alta del río Sonora.

MUNICIPIO	NÚMERO DE SUSTANCIAS EMITIDAS		
MUNICIPIO	AIRE	SUELO	
Cananea	23	-	
Cucupe	3	11	
Naco	6	-	
Nogales	19	13	
Santa Cruz	15	-	

Tabla 6. Cantidades totales de las principales sustancias emitidas al aire y suelo por las empresas o establecimientos ubicados en los municipios de la cuenta alta del río Sonora.

SUSTANCIA	CANTIDAD TOTAL EMITIDA AL AIRE (kg/año)	
Óxidos de nitrógeno	1,092,276,847.00	
Óxidos de azufre	1,142,468.87	
Monóxido de carbono	49,395053.60	
Bióxido de carbono	75,012,874.34	
Partículas suspendidas totales	187,602,772.60	
SUSTANCIA	CANTIDAD TOTAL EMITIDA AL SUELO (kg/año)*	
Arsénico	0.767	
Cadmio	1.333	
Cobre	13.933	
Cromo	13.881	
Mercurio	1.454	
Níquel	0	
Plomo	62.417	
Zinc	14.121	
Cianuro	0.371	

^{*}Valores reportados por dos empresas para los años 2017-2019.

2. MUESTREO PRELIMINAR

El área mínima estimada en donde se realizan actividades relacionadas con la minería y, por lo tanto, donde puede haber mayores afectaciones al ambiente y a la salud humana abarca un polígono de aproximadamente 222 km², esto incluye cuerpos de agua, minas y presas de jales mineros a los cuales no se tiene acceso público (Figura 9).

Como parte del plan de monitoreo preliminar el INECC realizó un estudio exploratorio los días 10 al 19 de agosto de 2021, en el que se buscó recorrer la mayor extensión posible de área de estudio para identificar las zonas donde las concentraciones fueran más elevadas y haciendo énfasis en los puntos marcados con color amarillo que se muestran en la Figura 9.

La campaña inicial de monitoreo ambiental exploratorio tuvo una duración de diez días en los cuales se reconoció la zona impactada (Figura 10), se tuvo acercamiento con las autoridades involucradas y la población afectada, y se monitorearon los puntos críticos en donde se ha detectado un impacto al ambiente, para así desarrollar los muestreos pertinentes (Tabla 7). El monitoreo se dividió en tres partes:

- 1) Monitoreo de mercurio en aire ambiente;
- 2) Muestreo de suelo, polvo urbano y biota vegetal para determinación de metales
- 3) Monitoreo de exposición personal.



Figura 9. Áreas con actividad minera detectada en la zona de Cananea.



Figura 10. Zona minera en Cananea.

Tabla 7. Calendario de actividades para el monitoreo preliminar exploratorio.

	ACTIVIDAD			
FECHA	MONITOREO DE MERCURIO	TOMA DE MUESTRAS DE SUELO, POLVO URBANO Y BIOTA VEGETAL	MONITOREO DE EXPOSICIÓN PERSONAL	
10/08/2021			X	
11/08/2021			X	
12/08/2021			X	
13/08/2021			X	
14/08/2021			X	
15/08/2021			X	
16/08/2021	X	X	X	
17/08/2021	X	X	X	
18/08/2021	X	X	X	
19/08/2021	X	X	X	

2.1. Monitoreo de mercurio en aire ambiente

a) Objetivo

Monitorear la concentración de vapores de mercurio en el aire ambiente en el municipio de Cananea, empleando un analizador portátil para identificar los sitios con los niveles más elevados, que pudieran producir daños al ambiente y la salud.

b) Metodología

Se diseñaron tres rutas, las cuales recorren en conjunto 33.4 km lineales y abarcan las diferentes zonas del polígono antes mencionado. Estas tres rutas se recorrieron en cuatro días de monitoreo, tomando mediciones directas de mercurio en forma de vapor presente en el aire ambiente en la zona norte del municipio y la más alejada de la población; la zona sureste, en donde se encuentran algunos cuerpos de agua; y la zona centro, en donde se concentra la mayor parte de los habitantes del municipio. Además, se realizó el monitoreo de un sitio de referencia ubicado el norte del municipio en donde se tomaron lecturas continuas en diferentes horarios del día. Para el monitoreo de mercurio en aire se utilizó el equipo portátil OHIO LUMEX RA915+ que funciona bajo el principio de espectrometría de absorción atómica, con un límite de detección entre 2 ng/m³ y 200,000 ng/m³ de mercurio en forma de vapor.

Monitoreo de mercurio en el Sitio de Referencia

El sitio de referencia se considera como sitio de "Fondo", se seleccionó en dirección distinta de los vientos predominantes, considerando que, si los vientos predominantes no soplan en esta dirección, el transporte de los contaminantes debe ser menor; por lo tanto, la concentración del contaminante encontrada en el sitio es presuntamente la mínima dentro del área de estudio. En el sitio se tomaron lecturas continuas de vapor de mercurio en aire ambiente.

Monitoreo de mercurio en la Ruta 1

La Ruta 1 abarca la zona norte centro del polígono y recorre aproximadamente 10 km lineales (Figura 11 y 12). Esta zona recibe los vientos predominantes durante la mayor parte del año, por lo cual se esperaban las concentraciones más elevadas.



Figura 11. Recorrido de la Ruta 1 para el monitoreo preliminar exploratorio.



Figura 12. Monitoreo de mercurio en aire en Ruta 1.

Monitoreo de mercurio en la Ruta 2

La Ruta 2 recorre 18 km en la zona centro del municipio y abarca 8.7 km², en donde se concentra la mayor parte de la población, además se tomaron algunos puntos en la zona norte donde se localiza una mina de cobre (Figura 13 y 14).



Figura 13. Recorrido de la Ruta 2 para el monitoreo preliminar exploratorio.



Figura 14. Monitoreo de mercurio en aire en Ruta 2.

Monitoreo de mercurio en la Ruta 3

La Ruta 3 recorre 5.4 km de la región del arroyo Bacoachi, mas 5.6 km en el municipio de Arizpe, en donde se encuentran puntos del río Sonora, principal cuerpo de agua afectado por los incidentes de derrames de jales mineros en años anteriores (Figura 15 y 16).



Figura 15. Recorrido de la Ruta 3 para el monitoreo preliminar exploratorio.



Figura 16. Monitoreo de mercurio en aire en Ruta 3.

c) Resultados

La campaña abarco 48 puntos de monitoreo de vapores de mercurio en aire ambiente (Figura 17), localizando las mayores concentraciones de mercurio en aire en la zona centro del municipio de Cananea con una población de 39,451

habitantes, así como en la zona centro del municipio de Arizpe con 1,666 habitantes.

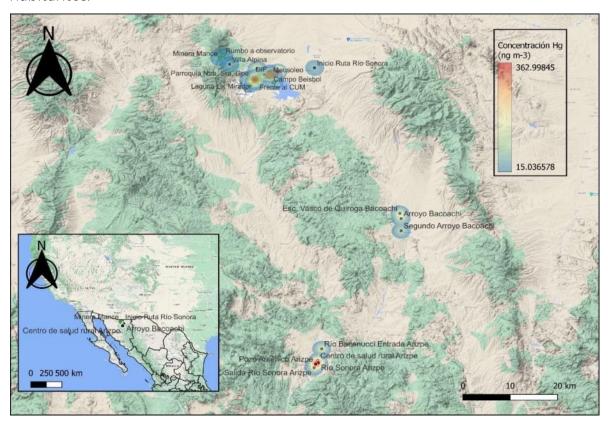


Figura 17. Mapa de isoconcentraciones de mercurio detectadas en el monitoreo de mercurio de la Ruta 1, 2 y 3.

Cabe destacar que los niveles de mercurio detectados superan las concentraciones típicas de mercurio en otras ciudades, como Monterrey o la Ciudad de México, en las cuales se han detectado niveles de mercurio en aire que oscilan entre 40 y 100 ng/m³. Además, el mercurio puede bioacumularse en el ambiente y en diferentes especies; de acuerdo con Borchardt y colaboradores (1988) la bioacumulación por mercurio dependerá de diferentes variables como la talla, sexo, posición del organismo en la cadena trófica, relaciones genéticas entre poblaciones, etc. Asimismo, en algunas especies de machos se han encontrado niveles de mercurio superiores a los medidos en hembras (IPCS, 1989). Por otro lado, el monitoreo de mercurio efectuado en este estudio no fue realizado en la temporada del año en la que las condiciones ambientales favorecen más la dispersión y la resuspensión de contaminantes; por lo cual, las concentraciones de este metal podrían incrementar considerablemente en temporada de "secas", cuando se presentan temperaturas elevadas, baja humedad en el ambiente y pocos vientos.

La Ruta 1 consideró 11 mediciones y se identificó una concentración promedio de 145.8 ng/m³ de vapor de mercurio en aire ambiente; en esta región, la concentración máxima identificada fue de 363 ng/m³ (Tabla 8).

Tabla 8. Resultados de las concentraciones de mercurio medidas en los puntos de las Ruta 1.

FECHA	COORDENADAS		CONCENTRACIÓN COORDENADAS DE MERCURIO ng/m³	
17/08/2021	30°59'50''	-110°15'12''	363	Hospital Cananea
17/08/2021	30°59'26"	-110°16'02"	177	Campo Beisbol
17/08/2021	30°59'36''	-110°16'06"	337	Mausoleo
17/08/2021	30°59'49"	-110°16'14'	284	Cuerpo agua 1
17/08/2021	31°00'11''	-110°17'54''	144	CFE Cananea
17/08/2021	30°58'27"	-110°18'18''	142	Laguna Lix Mirador
17/08/2021	30°59'0"	-110°18'05"	15	Kiosko Ayuntamiento
17/08/2021	30°59'26''	-110°16'56''	33	IMSS Centro Asist Social Infantil
17/08/2021	30°59'25"	-110°16'58"	35	Jardín de niños
17/08/2021	31°00'50"	-110°21'30''	39	Villa Alpina
17/08/2021	31°00'21"	-110°18'20''	35	Inicio Ruta río Sonora

La zona roja de la Figura 18 señala la concentración máxima de los vapores de mercurio, esto debido a la cercanía con las zonas de actividades mineras, así como las diversas presas de jales del área, teniendo diversos sitios públicos de gran afluencia como el Hospital de Cananea y la glorieta del Mausoleo.

Es importante realizar estos monitoreos porque, de acuerdo con la Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR), el cuerpo absorbe muy poco mercurio metálico (menos del 0,01%), incluso si se ingiere; sin embargo, si el mismo mercurio se inhala en forma de vapor, aproximadamente el 80% se absorbe en el torrente sanguíneo.

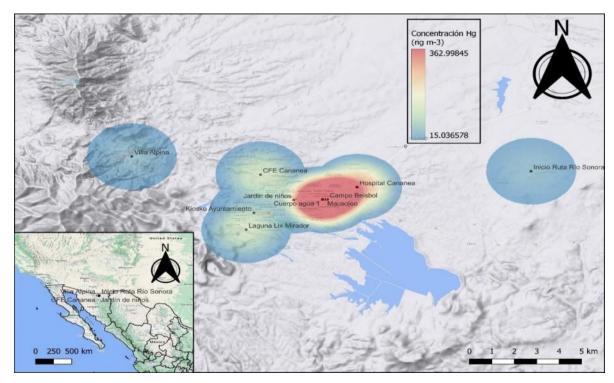


Figura 18. Mapa de isoconcentraciones de mercurio detectadas en el monitoreo de mercurio de la Ruta 1.

Para la Ruta 2 se tomaron 28 puntos. La zona de mayor afectación vuelve a ser el centro del municipio, en donde se concentra la mayor parte de la población. La concentración promedio fue de 266.8 ng/m³ de vapor de mercurio en aire ambiente (Figura 19).

De estos 28 puntos, destacan por sus elevadas concentraciones el Museo de la Cárcel de Cananea, la Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe y el mirador a la laguna de lixiviados (Tabla 9).

Tabla 9. Resultados de las concentraciones de mercurio medidas en los puntos de las Ruta 2.

FECHA	HORA	COORDENADAS		CONCENTRACIÓN DE MERCURIO ng/m³	LUGAR
18/08/2021	09:23	30°59'20''	-110°15'47"	268	Ministerio Público
18/08/2021	09:27	30°59'43"	-110°16'12''	213	Esc. Primaria Luis D.C.
18/08/2021	09:32	30°59'30''	-110°16'15''	275	DIF
18/08/2021	09:38	30°59'12''	-110°16'18"	280	Mercado agropecuario
18/08/2021	09:45	30°59'10"	-110°16'44"	347	STPS Junta de conciliación
18/08/2021	09:54	30°59'12"	-110°17'42''	376	Agencia fiscal

FECHA	HORA	COORE	DENADAS	CONCENTRACIÓN DE MERCURIO ng/m³	LUGAR
18/08/2021	09:59	30°59'07''	-110°18'01''	334	Esc Primaria
18/08/2021	10:04	30°58'59"	-110°18'24"	464	Parroquia Ntra. Sra. Gpe.
18/08/2021	10:10	30°58'58"	-110°18'13"	554	Museo Cárcel Cananea
18/08/2021	10:22	30°58'48''	-110°18'52''	307	Tres Marías Biblioteca
18/08/2021	10:33	30°58'54"	-110°18'58''	326	Cerca puerta minas
18/08/2021	10:45	30°58'54"	-110°18'12"	149	Segunda La Pasadita
18/08/2021	10:50	30°58'34"	-110°18'08''	291	Escuela Melchor Ocampo
18/08/2021	10:52	30°58'27"	-110°18'07''	225	Supervisión de P. Federal
18/08/2021	10:58	30°58'20"	-110°17'54''	304	Frente al CUM
18/08/2021	11:10	30°58'27"	-110°18'18"	436	Laguna Lix Mirador
18/08/2021	11:17	30°58'45"	-110°17'33"	263	Club Campestre
18/08/2021	11:28	30°58'23"	-110°15'41"	333	Parque Mártires de Cananea
18/08/2021	12:05	31°01'40''	-110°22'49"	66	Minería María
18/08/2021	12:20	31°02'03"	-110°22'22"	155	Rumbo a observatorio
18/08/2021	16:00	30°58'58"	-110°18'19"	76	Cerca Parroquia Ntra. Sra. Gpe
18/08/2021	16:00	30°58'59"	-110°18'24"	79	Parroquia Ntra. Sra. Gpe.
18/08/2021	16:02	30°58'58"	-110°18'13''	186	Museo Cárcel Cananea
18/08/2021	16:06	30°58'51''	-110°18'11"	175	Rumbo al mirador
18/08/2021	16:11	30°58'27"	-110°18'18"	175	Laguna Lix Mirador
18/08/2021	16:16	30°58'54"	-110°18'58"	230	Cerca puerta minas
18/08/2021	16:23	30°58'27"	-110°18'07''	282	Supervisión de P. Federal
18/08/2021	16:25	30°58'20"	-110°17'54''	302	Frente al CUM

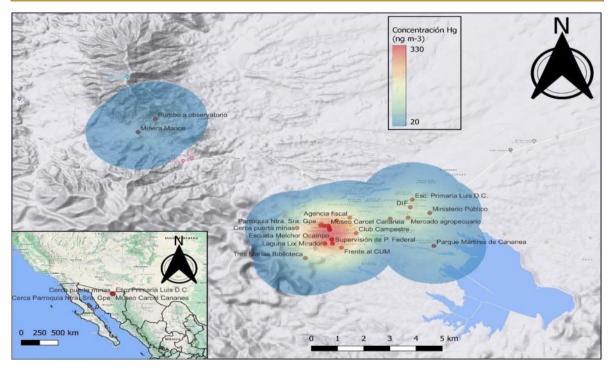


Figura 19. Mapa de isoconcentraciones de mercurio detectadas en el monitoreo de mercurio de la Ruta 2.

Finalmente, en la ruta 3, en la zona del arroyo Bacoachi la concentración promedio de mercurio vapor en aire ambiente fue igual a 283 ng/m³, mientras que en Arizpe la concentración promedio es de 303.7 ng/m³, teniendo el valor más alto registrado en un cruce con el río Sonora alcanzando 384 ng/m³ de mercurio (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados de las concentraciones de mercurio medidas en los puntos de las Ruta 3.

FECHA	COORE	CONCENTRACIÓN COORDENADAS DE MERCURIO ng/m³		LUGAR
19/08/2021	30°40'29"	-109°59'06''	346	Esc. Vasco de Quiroga Bacoachi
19/08/2021	30°39'47''	-109°58'56"	262	Arroyo Bacoachi
19/08/2021	30°38'07"	-109°58'56"	241	Segundo Arroyo Bacoachi
19/08/2021	30°22'00''	-110°09'23"	359	Río Bacanucci Entrada Arizpe
19/08/2021	30°20'23''	-110°09'54''	299	Centro de salud rural Arizpe
19/08/2021	30°20'09"	-110°10'00''	133	Centro histórico Arizpe
19/08/2021	30°20'06"	-110°09'49"	384	Río Sonora Arizpe
19/08/2021	30°19'25"	-110°10'23''	309	Salida río Sonora Arizpe
19/08/2021	30°19'55"	-110°10'11''	338	Pozo Arsénico Arizpe

Esto sugiere el transporte de los vapores de mercurio por diferentes municipios de la región y, de manera particular, que esta zona es de gran interés ya que contiene dos de los cuerpos de agua más importantes de la región, los cuáles han sido afectados por las diversas actividades antropogénicas desarrolladas en sus alrededores (Figura 20).

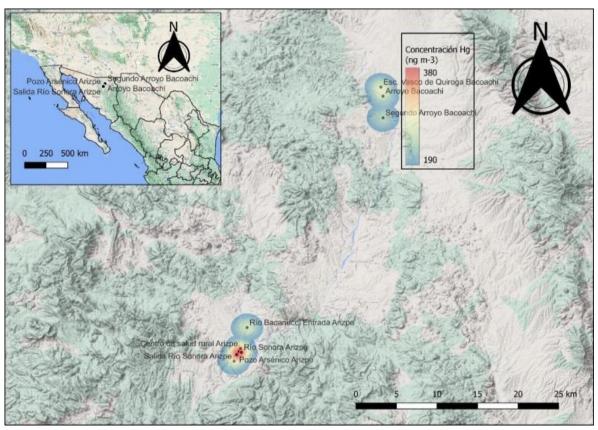


Figura 20. Mapa de isoconcentraciones de mercurio detectadas en el monitoreo de mercurio de la Ruta 3.

d) Principales hallazgos

En este muestreo preliminar se evaluaron tres rutas en dirección norte, centro y sureste del municipio de Cananea, en las cuales se encontró que la concentración promedio de mercurio más alta se ubicó en la zona sureste del municipio, en dirección al municipio de Arizpe (303.7 ng/m³), mientras que la concentración más baja se localizó en la zona norte del municipio (145.8 ng/m³). Cabe destacar que, aunque en las tres zonas los niveles detectados de mercurio en aire fueron inferiores al valor de exposición máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud, que es igual a 1000 ng/m³ promedio anual, los niveles detectados superan las concentraciones típicas de mercurio de otras ciudades, como Monterrey o la Ciudad de México donde se han medido concentraciones en aire que oscilan entre 40 y 100 ng/m³.

Es importante considerar que una exposición crónica a estos niveles puede causar problemas de bioacumulación de mercurio en los organismos, causando daños en la salud humana y en la flora y fauna locales. Agudelo y colaboradores (2016) han identificado que los niveles de mercurio en aire varían en diferentes periodos del año y con los cambios en la temperatura durante el día en otras zonas mineras que han sido objeto de estudio; por lo tanto, no es posible descartar que las concentraciones de mercurio en las zonas estudiadas puedan incrementarse a diferentes horarios. Por otro lado, es posible que el mercurio se transporte en la atmosfera y se deposite en los cuerpos de agua, donde se pueden generar procesos de oxidación y metilación, que producen sustancias más peligrosas como el metilmercurio.

Las condiciones climatológicas son determinantes para las variaciones que se presentan, por lo que, en temporada de secas, donde la temperatura se eleva considerablemente, es probable que estas concentraciones se eleven, causando mayor impacto en la población y el ambiente. Este fenómeno fue identificado durante este monitoreo de mercurio en el sitio de referencia, en el cual se registró una concentración promedio de 135 ng/m³ en la mañana con una temperatura 30 °C y una concentración promedio de 14 ng/m³ en la noche con una temperatura 17 °C.

Por lo anterior, se recomienda realizar un monitoreo continuo de mercurio en el municipio, considerando periodos de estudio más amplios, diferentes estaciones del año y horarios, a fin de reducir la incertidumbre asociada a las condiciones climatológicas y evitar posibles daños crónicos a poblaciones vulnerables como niñas, niños y mujeres embarazadas por la exposición a mercurio y otros contaminantes.

2.2. Detección de metales y metaloides en suelo, polvo urbano y biota vegetal

a) Objetivo

Realizar un muestreo preliminar para evaluar la presencia de metales y metaloides tóxicos en muestras ambientales de suelo, polvo urbano y biota vegetal, compararlos contra lo establecido en la normatividad nacional e internacional

b) Metodología

Como parte del "Plan para la atención integral de Cananea", se realizó un muestreo exploratorio puntual de suelo, polvo urbano y biota vegetal para la determinación de metales y metaloides en varios sitios del Municipio de Cananea

La descripción y ubicación de dichos sitios o puntos de muestreo se describen, junto con el tipo de muestra que se colectó en cada uno, en la Tabla 11 y en las Figuras 21 a 24.

Tabla 11. Sitios de muestreo para la detección de metales y metaloides en suelo, polvo urbano y biota vegetal.

CLAVE DEL SITIO	NOMBRE DEL SITIO	COORD	ENADAS	TIPO DE MUESTRA
		30°59'54.74"N	110°15'10.87"O	
		30°59'54.47"N	110°15'11.02"O	Suelo superficial
6 01	Hospital General	30°59'55.20"N	110°15'10.29"O	
S-01	Cananea	30°59'54.92"N	110°15'10.59"O	Perfil de suelo
		30°59'54.39"N	110°15'11.25"O	Biota vegetal
		30°59'50.52"N	110°15'13.90"O	Polvo urbano
S-02	Mausoleo a los Mártires de 1906	30°59'35.81"N	110°16'49.58"O	Polvo urbano
		31° 0'23.13"N	110°18'16.64"O	
		31° 0'22.70"N	110°18'16.12"O	Suelo superficial
S-03	CFE Cananea	31° 0'22.35"N	110°18'15.70"O	
		31° 0'22.94"N	110°18'16.40"O	Perfil de suelo
		31°0'11.71"N	110°17'56.95"O	Biota vegetal
		30°59'1.44"N	110°18'3.67"O	
	Plaza Juárez	30°59'1.19"N	110°18'5.06"O	Suelo superficial
S-04		30°58'59.84"N	110°18'6.51"O	
		30°59'1.03"N	110°18'3.79"O	Perfil de suelo
		30°58'59.69"N	110°18'5.21"O	Biota vegetal
S-05	Parque DIF	30°59'26.07"N	110°16'14.03"O	Polvo urbano
		30°59'17.12"N	110°16'48.94"O	
	El Capote, Col.	30°59'16.93"N	110°16'48.33"O	Suelo superficial
S-06	Nueva	30°59'16.67"N	110°16'47.43"O	
	Buenavista	30°59'16.75"N	110°16'47.88"O	Perfil de suelo
		30°59'16.90"N	110°16'47.49"O	Biota vegetal
		30°58'23.26"N	110°15'39.81"O	
	Parque Mártires	30°58'22.74"N	110°15'40.01"O	Suelo superficial
S-07	de Cananea	30°58'22.48"N	110°15'40.15"O	
		30°58'22.98"N	110°15'39.90"O	Perfil de suelo
		30°58'24.88"N	110°15'40.47"O	Biota vegetal
S-08	Xochimilco, Col. Mártires de Cananea	30°58'42.17"N	110°16'18.11"O	Polvo urbano
S-09	la Este y Sonora, Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe	30°59'0.03"N	110°18'24.04"O	Polvo urbano

CLAVE	NOMBRE DEL	COORD	TIPO DE	
DEL SITIO	SITIO		MUESTRA	
S-10	Río Sonora, Municipio de Arizpe	30°20'06"N	-110°09'49'O'	Biota vegetal

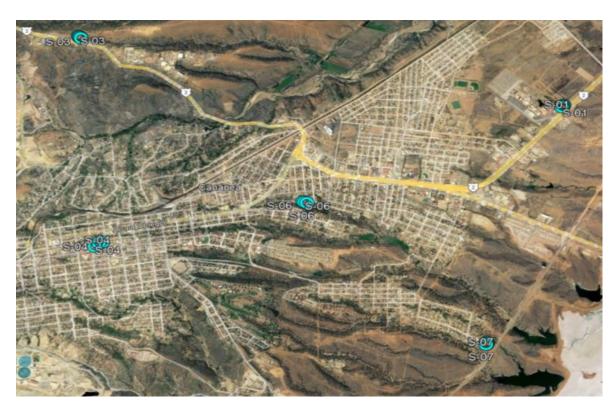


Figura 21. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo superficial.

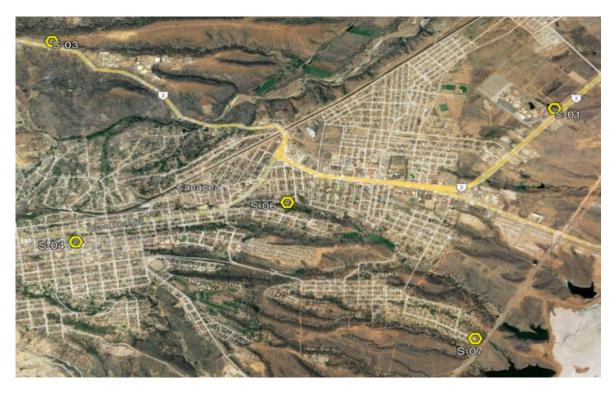


Figura 22. Ubicación de los sitios de muestreo de perfiles de suelo.

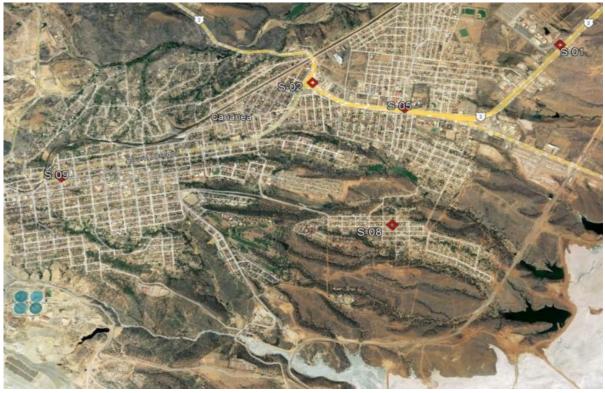


Figura 23. Ubicación de los sitios de muestreo de polvos urbanos.

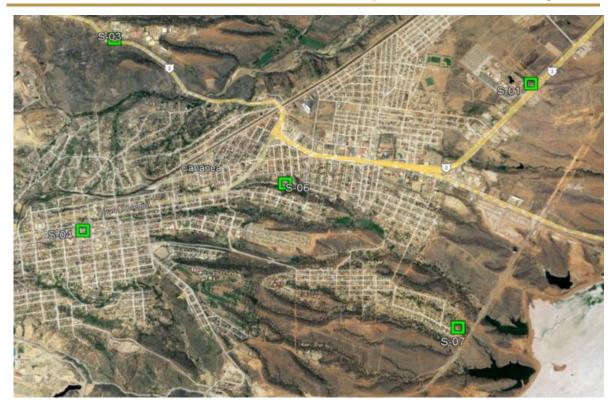


Figura 24. Ubicación de los sitios de muestreo de biota vegetal.

Las muestras de perfil de suelo fueron obtenidas mediante el hincado de un muestreador manual para obtener núcleos del suelo, con el objetivo de evaluar si había distintos horizontes a partir de la superficie y si éstos contenían diferentes concentraciones de los metales y metaloides por las distintas propiedades de los estratos que conforman el suelo.

Se observó que no había presencia de horizontes en los perfiles de suelo obtenidos durante el muestreo y que no era posible colectar por debajo de los 50 cm de profundidad en ninguno de los sitios, por la existencia de roca firme o material consolidado. Al no existir distintos horizontes se integró una muestra simple y se trasladó a los laboratorios del INECC para su análisis.

Las muestras de suelo superficial fueron de tipo simple de una profundidad de 0-5 cm a partir de la superficie; las de polvo urbano fueron obtenidas a pie de camino mediante un procedimiento de barrido en un área aproximada de un metro cuadrado; y las muestras de biota vegetal fueron colectadas de especies predominantes de la zona, preponderando la especie arbustiva *Baccharis sarothroides*. Todas las muestras fueron trasladadas a los laboratorios del INECC para su análisis.

Las muestras fueron analizadas mediante espectroscopía de emisión de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) y espectrometría de masas acoplada inductivamente (ICP-MS), por los métodos propios del INECC para los distintos tipos de matrices obtenidas en el presente muestreo.

c) Resultados

Las concentraciones de arsénico, cobre y selenio en todas las muestras de suelo analizadas (superficial y del perfil) de todos los sitios muestreados superaron los valores de referencia canadienses (CCME, 1997; CCME, 1999a; 2009) para los diferentes tipos de uso de suelo (agrícola, residencial, comercial e industrial) (Tablas 12 a 15). En comparación con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2007), los resultados de arsénico en suelo superficial de al menos una de las muestras de todos los sitios estudiados excedieron en límite máximo permisible para suelo agrícola/residencial/comercial (22 mg/kg) (Tabla 12). Esto mismo se observó para las muestras de perfil de suelo en los sitios S-04 y S-07.

Las concentraciones de plomo en varias de las muestras de suelo superficial de los sitios S-03, S-04, S-06 y S-07 se encontraron por arriba de nivel de referencia de la guía canadiense para suelo agrícola (70 mg/kg) (CCME, 1999b). En algunos casos en los sitios S-04 y S-07 se llegó inclusive a superar los valores de referencia para el uso residencial (140 mg/kg) y de uso comercial (260 mg/kg) (Tabla 13). De forma similar, en las muestras del perfil de suelo de los sitios S-04, S-06 y S-07 se rebasaron los valores para el uso residencial agrícola y comercial, respectivamente (Tabla 15).

Tabla 12. Concentraciones de metales y metaloides de suelo superficial.

SITIO	Ag	Al	As	Ba	Be	Cd	Со	Cr	Cu	Mn	Мо
31110					mg/kg	BASE	SECA				
	<0.4	4468.8	18.1*	101.1	<0.4	<0.4	8.1	10.5	91.1*	281.1	0.7
S-01	<0.4	3848.3	13.3*	64.7	<0.4	<0.4	7.9	8.4	112.3*	273.6	0.5
	0.3	5650.2	27.5**	100.0	0.5	<0.4	5.2	7.6	192.6*	361.1	0.9
	<0.4	5512.0	15.7*	93.5	<0.4	<0.4	6.9	13.5	953.7*	259.9	3.7
S-03	0.8	3028.2	101.3**	67.4	<0.4	1.0	6.2	11.4	879.1*	234.7	17.1*
	<0.4	3890.1	29.4**	71.5	<0.4	0.7	9.1	10.4	732.0*	419.7	13.0*
	0.5	7895.2	38.2*+	101.2	<0.4	1.6*	10.1	9.9	992.3*	1138.4	7.4*
S-04	0.6	6388.8	49.5**	102.2	<0.4	2.0*	10.2	20.5	875.9*	684.9	7.7*
	0.6	6979.6	39.3**	104.5	<0.4	1.3	11.1	9.9	995.2*	1078.3	4.0
	<0.4	3713.9	14.9*	71.1	<0.4	<0.4	5.9	5.7	163.2*	216.9	1.3
S-06	<0.4	3571.2	33.4**	69.8	<0.4	0.4	6.0	6.5	223.7*	492.3	1.2
	<0.4	6274.9	42.5**	314.1	0.7	1.9*	18.9	7.8	306.6*	1365.5	2.4
C 07	0.5	8538.7	68.5**	238.7	0.8	0.8	8.4	12.9	281.9*	1260.2	1.6
S-07	0.6	7898.0	78.3*+	278.1	0.7	0.9	8.3	13.8	586.5*	1258.0	2.4

CITIO	Ag	Al	As	Ba	Ве	Cd	Со	Cr	Cu	Mn	Мо
31110	mg/kg BASE SECA										
	0.6	11095.7	92.1*+	241.3	1.1	1.0	11.6	14.0	613.7*	1684.7	2.3

^{*}Concentraciones por arriba de los valores internacionales de referencia.

En el caso del Zinc, nuevamente las concentraciones de las todas muestras de suelo superficial y de perfil colectadas en los sitios S-04 y S-07 sobrepasaron los niveles de referencia canadienses para suelo agrícola/residencial (250 mg/kg) y comercial (410 mg/kg) (CCME, 2018). Esto mismo ocurrió para una de las muestras del sitio S-06 que superó el nivel establecido para el uso agrícola/residencial (Tabla 13).

Por su parte, las concentraciones de cadmio encontradas en algunas de las muestras de suelo superficial en los sitios S-04 y S-06 superaron el valor de la guía canadiense de (CCME, 1999c) para uso agrícola (1.4 mg/kg), como lo muestra la Tabla 12. Esta misma situación se presentó en el caso de una de las muestras del perfil de suelo en el sitio S-06 (Tabla 14).

Respecto al elemento molibdeno se encontró que sus concentraciones en un par de muestras de suelo superficial de los sitios S-03 y S-04 resultaron ser superiores a los niveles establecidos en la guía para la remediación de suelos del Estado de Alberta, en Canadá (AEP, 2019).

Tabla 13. Concentraciones de metales y metaloides de suelo superficial (continuación).

CITIO	Ni	Pb	Se	V	Zn					
SITIO	mg/kg BASE SECA									
	3.7	50.0	8.0*	22.3	60.0					
S-01	2.8	47.9	7.5*	13.6	66.2					
	4.9	64.6	11.1*	19.7	105.6					
	3.1	45.2	3.6*	27.1	55.8					
S-03	6.7	95.9*	3.8*	19.6	198.8					
	6.5	50.2	6.7*	21.6	175.4					
	9.2	139.1*	7.4*	20.3	294.4*					
S-04	9.2	184.0*	7.7*	22.5	470.4*					
	9.3	129.1*	7.6*	29.9	303.6*					
	1.9	64.3	7.4*	12.4	83.7					
S-06	2.1	91.4*	3.7*	14.5	87.5					
	11.5	109.3*	9.1*	19.7	305.3*					
	7.5	247.7*	15.9*	28.2	285.6*					
S-07	7.8	266.3*	18.0*	28.2	282.8*					
	8.7	427.9**	18.5*	25.8	444.2*					

^{*}Concentraciones por arriba de los valores internacionales de referencia.

⁺ Concentraciones por arriba de los valores nacionales de referencia.

Es de resaltar que en el sitio S-04, que corresponden a la Plaza Juárez, coinciden los niveles elevados para siete de los 16 metales que se cuantificaron. Al ser este lugar un espacio público, es de llamar la atención por las probabilidades de exposición que puedan tener las personas que suelen acudir a él de forma frecuente, en particular los niños como población de mayor vulnerabilidad.

Tabla 14. Concentraciones d	e metales y metalo	bides en los r	perfiles de suelo.

SITIO	Ag	Al	As	Ba	Ве	Cd	Со	Cr	Cu	Mn	Мо
31110		mg/kg BASE SECA									
S-01	0.5	8561.7	15.7*	102.3	0.6	<0.4	2.9	8.5	109.1*	131.2	<0.4
S-03	<0.4	17303.1	12.8*	97.0	0.7	0.6	3.7	15.4	239.2*	120.6	<0.4
S-04	3.5	6756.1	51.7*+	100.5	<0.4	1.6*	8.7	16.2	515.3*	816.2	3.4
S-06	<0.4	4117.5	32.7*+	61.6	<0.4	0.7	6.5	6.5	262.2*	655.2	1.2
S-07	<0.4	21357.3	73.6**	186.7	0.9	0.6	7.5	14.2	297.8*	1020.5	1.0

^{*}Concentraciones por arriba de los valores internacionales de referencia.

En relación con las muestras de polvo urbano, los resultados de las concentraciones medidas se presentan en las Tablas 16 y 17. De ellas, es importante recalcar que en todas las muestras se detectaron 12 de los 16 metales y metaloides analizados; sin embargo, no se cuenta con niveles de referencia nacionales, ni internacionales, para determinar si representan un riesgo para la salud humana o el medio ambiente. No obstante, como parte del plan a mediano y largo plazo, se puede plantear una comparación entre los niveles que se midan en polvo con los que se cuantifiquen en muestras de partículas atmosféricas.

Tabla 15. Concentraciones de metales y metaloides en los perfiles de suelo (continuación).

SITIO	Ni	Pb	Se	V	Zn
31110		mg,	kg BASE SEC	CA	
5	56.1*	69.6	7.3*	21.2	53.9
S-03	12.2	48.8	7.8*	44.1	97.7
S-04	44.6	147.1*	7.1*	23.1	273.3*
S-06	13.6	107.5*	6.8*	14.3	112.0
S-07	17.2	262.5*	14.2*	30.0	463.8*

^{*}Concentraciones por arriba de los valores internacionales de referencia.

⁺ Concentraciones por arriba de los valores nacionales de referencia.

Tabla 16. Concentraciones de metales y metaloides en polvo urbano.

SITIO	Ag	Al	As	Ba	Ве	Cd	Со	Cr	Cu	Mn	Мо
31110		mg/kg BASE SECA									
S-01	0.9	2310.3	40.3	54.6	<0.4	0.9	7.7	7.6	187.6	389.3	7.3
S-02	<0.4	1523.0	9.7	42.3	<0.4	<0.4	7.1	7.6	207.1	254.4	9.2
S-05	<0.4	1494.8	13.1	<25.0	<0.4	<0.4	6.6	9.4	411.3	183.0	17.5
S-08	<0.4	2398.3	15.9	56.3	<0.4	1.7	5.7	7.0	941.7	441.5	5.8
S-09	<0.4	3071.3	38.2	65.9	<0.4	1.2	12.2	11.2	728.1	554.3	23.9

Tabla 17. Concentraciones de metales y metaloides en polvo urbano (continuación).

CITIO	Ni	Pb	Se	V	Zn			
SITIO	mg/kg BASE SECA							
S-01	7.4	91.6	3.6	11.3	394.2			
S-02	3.4	30.6	2.2	7.5	90.8			
S-05	3.1	28.5	1.8	10.8	78.2			
S-08	3.9	63.5	3.1	10.8	117.2			
S-09 10.4		82.0	3.5	14.1	416.7			

En general, las muestras de biota vegetal colectadas de especies arbustivas presentaron poca bioacumulación de metales y metaloides en sus tejidos (Tablas 18 y 19). Por este motivo, estas especies parecen no estar siendo afectadas por estos elementos y mostrar una apariencia externa saludable.

Tabla 18. Concentraciones de metales y metaloides en biota vegetal.

SITIO	Ag	Al	As	Ba	Ве	Cd	Со	Cr	Cu	Mn	Мо
31110		mg/kg BASE SECA									
S-01	<0.4	<25.0	<0.4	<25.0	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	28.5	<25.0	<0.4
S-03	<0.4	<25.0	<0.4	<25.0	<0.4	1.2	<0.4	<0.4	50.2	<25.0	<0.4
S-04	<0.4	294.9	1.0	<25.0	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0	<25.0	1.6
S-06	<0.4	<25.0	<0.4	<25.0	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0	<25.0	<0.4
S-07	<0.4	<25.0	<0.4	<25.0	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0	<25.0	<0.4
S-10	<0.4	<25.0	<0.4	<25.0	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0	<25.0	<0.4
3-10	<0.4	66.4	<0.4	<25.0	<0.4	<0.4	0.4	<0.4	<25.0	1072.4	<0.4

Tabla 19. Concentraciones de metales y metaloides en biota vegetal (continuación).

SITIO	Ni Pb		Se	V	Zn			
31110	mg/kg BASE SECA							
S-01	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0			
S-03	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	176.4			
S-04	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0			
S-06	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0			
S-07	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0			
S-10	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0			
3-10	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<25.0			

d) Principales hallazgos

En el muestreo exploratorio de suelo (superficial y de su perfil), se encontraron valores importantes de arsénico, cobre, selenio, plomo, zinc, cadmio y molibdeno, los cuales superan los valores establecidos por en los estándares canadienses para suelos de uso agrícola y/o, residencial y, en varias ocasiones, para los usos comercial e industrial.

En todas las muestras de polvo colectadas se detectaron 12 de los 16 metales y metaloides analizados; sin embargo, no se cuenta con niveles de referencia nacionales, ni internacionales, para determinar si representan un riesgo para la salud humana o el medio ambiente.

Las muestras de biota vegetal colectadas de especies arbustivas presentaron poca bioacumulación de metales y metaloides en sus tejidos.

2.3. Monitoreo de exposición personal

a) Objetivo

Cuantificar las concentraciones de material particulado (PM_{25}) en las rutas de transporte público urbano y las principales vialidades de la ciudad de Cananea a partir de una breve campaña de mediciones con muestreadores y monitores portátiles.

b) Metodología

Evaluación de concentraciones de PM2.5 a nivel de calle en rutas definidas

Del 10 al 19 de agosto de 2021 se realizó un monitoreo que compendió al menos dos recorridos por día a lo largo de las rutas que cubren los vehículos que brindan el servicio de transporte público en la ciudad de Cananea (Figura 25), así como, recorridos a nivel de banqueta por las principales vialidades, mientras se portaban muestreadores y sensores de material particulado PM₂₅, para determinar las concentraciones a las que se expone la población que circula por esos medios.



Figura 25. Recorridos realizados por vehículos empleados para transporte público en la ciudad de Cananea.

Aunado a lo anterior y con el objeto de colectar muestras ambientales de material particulado (PM_{2.5}), los días 17 al 19 de agosto de 2021 se instalaron dos equipos portátiles minivol, dentro de las instalaciones del Hospital General de Cananea (ubicado dentro del Parque Tamosura, con coordenadas 30.99826, -110.25318) y en la Unidad Medico Familiar 55 del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) (ubicada en la calle Sinaloa no. 23 campo frio y sierra del cobre, coordenadas 30.99039, -110.28130) (Figura 26). De acuerdo con plan de trabajo, se colectaron tres muestras, de un periodo de 24 horas, en cada uno de los sitios.





Figura 26. Sitios donde se instalaron los muestreadores PM₂₅.

Para la colecta de muestras y la realización de las mediciones, personal técnico del INECC portó sensores y muestreadores de material particulado PM_{2.5}, cerca del área respiratoria. A continuación, se presenta una breve descripción de los equipos empleados:



Partículas suspendidas PM_{2.5}. Se usaron bombas marca SKC, modelo 224-PCXR8 con impactadores personales marca MSP-Corp, modelo 200, y se operaron a un flujo de 4 L/min. La bomba succiona aire a través de un filtro de teflón de 37 mm de diámetro, sobre el cual se acumulan las partículas suspendidas. La determinación gravimétrica de la concentración de PM_{2.5} se efectúa pesando los filtros antes y después de la colección de la muestra.



Sensor portátil de calidad del aire, Temtop, mod. M2000C, tiene la capacidad de medir de manera simultánea HCHO, PM_{2.5}, PM₁₀, partículas, CO₂, temperatura y humedad. Cuenta con un sensor electroquímico de formaldehído de alta precisión y un sensor de partículas láser estadounidense "TEMTOP" y un sensor de dióxido de carbono basado en la teoría de detección NDIR



Para georreferenciar las concentraciones de PM_{2.5} medidas con el sensor portátil, se empleó un GPSMAP® 62sc, Garmin. El GPS necesita tener cobertura de al menos tres satélites, de los que recibe señales que le permiten estimar la posición o coordenadas reales del punto de medición.



Para los muestreos ambientales de material particulado (PM_{2.5}) se emplearon equipos Minivol de la marca AIRMETRICS, los cuales aspiran aire y por un sistema de impactadores las partículas son direccionadas, y a partir de ello se da la separación del material particulado, para ser recolectadas sobre un filtro de 47 mm de diámetro.

Para el desarrollo del presente estudio se emplearon filtros de teflón 37 y 47 milímetros de diámetro, los cuales fueron acondicionados y pesados antes y después del muestreo. El pesaje de los filtros se realizó en los laboratorios del INECC.

Con los resultados obtenidos a partir del monitoreo de partículas PM_{2.5}, se utilizó el modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectorias Integradas de Partículas Única (HYSPLIT, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos para modelar las trayectorias inversas o retrotrayectorias del transporte de masas de aire, con una temporalidad de tres horas, para realizar una evaluación de las parcelas de viento durante la semana de 17 de agosto del 2021 en los sitios correspondientes al Hospital General y la Unidad Medico Familiar no 55 del IMSS.

Las contribuciones de las fuentes se determinaron a partir de las espacialidad, temporalidad y altura de las masas de aire, que son observadas durante cada una de las trayectorias generadas por el modelo. En este sentido, si las trayectorias pasan por fuentes que han sido indicadas como emisoras de contaminantes a la atmósfera, se puede establecer de manera cualitativa y en una primera aproximación los probables aportes de estas fuentes a los sitios receptores prefinidos.

c) Resultados

Derivado de los análisis de las muestras colectadas durante la realización de los recorridos, en la Tabla 20 y la Figura 27 se presentan las concentraciones determinadas, así como, las proporciones de metales —determinados por medio de Fluorescencia de Rayos X— presentes en dichas muestras.

A partir de las concentraciones determinadas con el sensor portátil de calidad del aire y su georreferenciación se elaboraron los mapas de distribución espacial para identificar las zonas de la ciudad donde la población podría estar más expuesta a altas concentraciones de PM_{2.5} (Figura 28).

Tabla 20. Concentración de partículas PM_{2.5} obtenidas del muestreo a lo largo de las rutas de transporte público y en las principales vialidades de la ciudad de Cananea.

FECHA	PM _{2.5} (µg/m³)
2021.08.17	69.0
2021.08.17	116.9
2021.08.17	61.0
2021.08.17	40.3
2021.08.18	153.1
2021.08.18	94.5
2021.08.18	74.0
2021.08.18	145.3
2021.08.19	157.7
2021.08.19	51.5
2021.08.19	56.9
2021.08.19	61.9

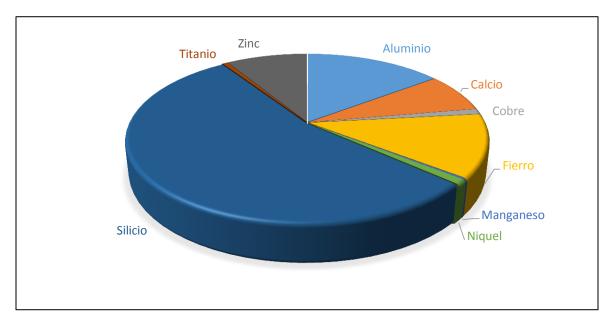


Figura 27. Metales detectados en las muestras de PM₂₅ colectadas a lo largo de las rutas de transporte público y en las principales vialidades de la ciudad de Cananea.

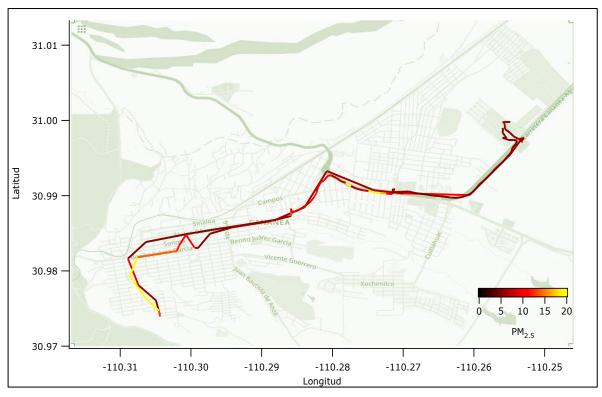


Figura 28. Mapa con la distribución espacial de las concentraciones de PM_{2.5,} determinadas durante la realización de recorridos a nivel de banqueta.

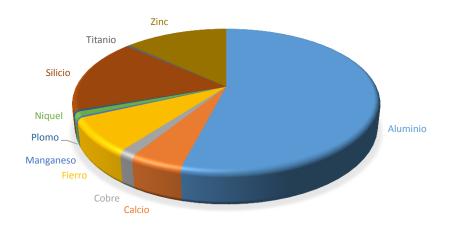
Respecto a las muestras ambientales de $PM_{2.5}$, y después de realizar el análisis gravimétrico, se determinaron las concentraciones que se resumen en la Tabla 31.

Tabla 21. Concentraciones de PM_{2.5} en aire ambiente en dos sitios de la ciudad de Cananea.

FECHA	SITIO DE MEDICIÓN	PM _{2.5} (µg/m³)
2021.08.17	Hospital General de Cananea	14.2
2021.08.18	Hospital General de Cananea	14.6
2021.08.19	Hospital General de Cananea	15.7
2021.08.17	Unidad Medico Familiar 55 (IMSS)	9.1
2021.08.18	Unidad Medico Familiar 55 (IMSS)	9.9
2021.08.17	Unidad Medico Familiar 55 (IMSS)	6.7

Posterior al análisis gravimétrico se realizó la determinación de metales presente en las muestras, por medio de Fluorescencia de Rayos X, la cual es una técnica de análisis no destructiva. En la Figura 29 se presentan los resultados para las muestras colectadas en el Hospital General de Cananea y la Unidad Medico

Familiar 55 (IMSS). En ambos casos se observa que los metales más abundantes en ambas muestras son aluminio, silicio, zinc y fierro.



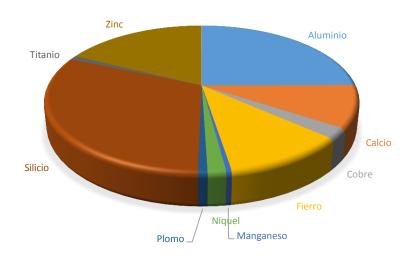


Figura 29. Proporciones de metales presentes en las muestras de PM_{2.5} colectadas en hospital General de Cananea (arriba) y la Unidad Medico Familiar 55 (abajo).

El análisis desarrollado con el modelo HYSPLIT-NOAA (Stein et al., 2015; Rolph et al., 2017), permitió determinar, en una primera aproximación, las retrotrayectorias de las masas de aire que llegan a los sitios predefinidos anteriormente (Hospital General de Cananea y la Unidad Medico Familiar 55), así como el origen y las posibles fuentes de emisión de los contaminantes que influyen sobre dichas masas. Los resultados de las simulaciones del modelo se muestran a continuación.

Sitio Hospital General de Cananea

Se realizaron dos evaluaciones de trayectorias inversas por día, una las 6 am y otra las 18 horas hora local, durante el periodo comprendido del 17 al 19 de agosto

del 2021, donde se realizó un monitoreo ambiental de partículas en los sitios antes definidos. En la Figura 30 se pueden observar las trayectorias que confluyen en el sitio Hospital General de Cananea, las cuales pasan por la zona de jales de la mina Buenavista del Cobre, así como sobre una parte de la presa de jales ubicada al sursureste del sitio. Es importante destacar que actualmente la presa se encuentra en proceso de secado, para su posterior remediación y reforestación, lo cual puede contribuir a incrementar sus aportaciones por procesos de resuspensión de partículas.

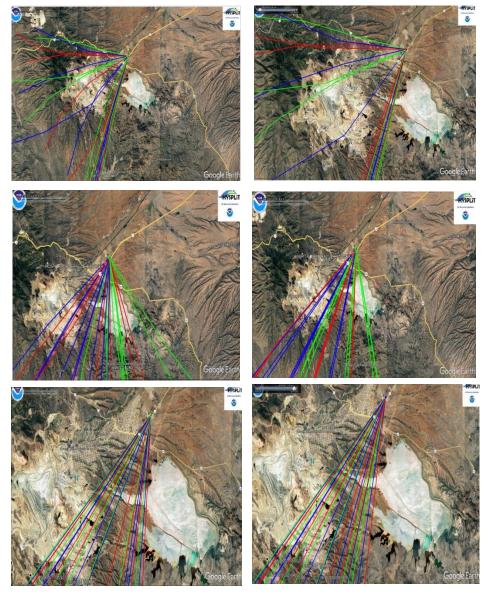


Figura 30. Modelación de las retrotrayectorias de las masas de aire que impactan el sitio del Hospital General de Cananea.

Sitio Unidad Medico Familiar No 55

Siguiendo el mismo procedimiento que en el sitio del Hospital General de Cananea, se

desarrollaron dos evaluaciones con trayectorias inversas en el sitio Unidad Medico Familiar No 55, por cada día se modelaron dos horas una a las 6 am y otra las 18 pm hora local, durante el periodo comprendido del 17 al 19 de agosto del 2021, el punto final de la modelación fue el sitio donde se realizó el monitoreo ambiental de partículas. En la Figura 31 se pueden observar las trayectorias inversas que llegan al sitio de la Unidad Medico Familiar No 55. Al ser un sitio relativamente cercano al Hospital General de Cananea y sin barreras importantes, como son edificios altos o relieves orográficos, se observaron comportamientos relativamente similares entre ellos. Los resultados de las modelaciones indican que las trayectorias pasan sobre la zona industrial y de depósito jales de la mina, así como sobre parte de la presa de jales ubicada al sursureste del sitio. Se estima que las aportaciones más importantes son de la zona industrial y, en menor proporción, de la presa de jales. Al igual que en el sitio de monitoreo anterior, es importante destacar que la Unidad Médico Familiar también se encuentra sujeta a la influencia del proceso de secado de la presa de jales de la mina.

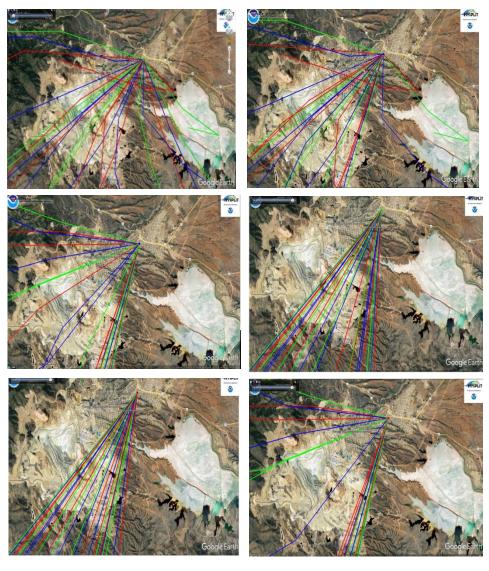


Figura 31. Modelación de las retrotrayectorias de las masas de aire que impactan el sitio de la Unidad Medico Familiar No 55.

d) Principales hallazgos

Aun cuando México no cuenta con una normatividad que establezca valores máximos permisibles para exposición personal; sin embargo, varios estudios han identificado los diversos impactos en la salud de la población, cuando ésta se expone a altas concentraciones, como las determinadas en el presente estudio, aun en periodos cortos de tiempo; por lo que, cualquier medida orientada a mejorar la calidad del aire en la ciudad de Cananea, permitirá reducir su impacto en la salud de la población.

Las concentraciones ambientales determinas en las muestras colectadas en las azoteas del hospital General de Cananea y la Unidad Medico Familiar 55 (IMSS) no rebasan el límite de 24 horas (45 $\mu g/m^3$, como promedio de 24 horas) establecido en la NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014), además de ser consistentes con los resultados reportados en el estudio de la calidad del aire ambiente con respecto a PM_{2.5} y metales (Cu, Cr, Mo, Zn), en la ciudad de Cananea, realizado por Cisneros-González (2019), en el cual se reporta un promedio anual para PM_{2.5} de 9.7 $\mu g/m^3$ y para el tercer trimestre de año una concentración máxima de 13 $\mu g/m^3$.

El modelo de trayectorias inversas HYSPLIT-NOAA mostró, como una primera aproximación, que las parcelas de aire que llegan a los dos sitios de monitoreo (Hospital General de Cananea y Unidad Medico Familiar No 55) pasan a través de la zona industrial y la presa de jales de la minera Buenavista del Cobre. Adicionalmente, esta modelación permitió estimar que la zona urbana de la ciudad de Cananea recibe aportaciones importantes de depósito atmosférico provenientes de la zona industrial de la minera y, con alta probabilidad, que dicho depósito ocurre mayoritariamente en calles, donde la resuspensión puede ser una fuente importante de material particulado a nivel de calle, techos de viviendas y escuelas donde habita y desarrollan sus actividades cotidianas la población de la ciudad.

Se recomienda ampliamente tener una estación de monitoreo meteorológico permanente para establecer las rosas de viento estacionales y evaluar el desempeño de modelos de fuente en superficie que permitan mejorar el análisis de la modelación, así como un apoyo adicional para determinar la aportación de las principales fuentes de emisión, principalmente por industria y suelos en la zona urbana de la ciudad de Cananea.

3. PLAN DE MEDICIÓN A MEDIANO Y LARGO PLAZO

Los resultados del monitoreo exploratorio de aire y suelo sirvieron de base para programar un futuro estudio a mediano y largo plazo, con el fin de poder caracterizar más ampliamente el impacto causado al ambiente durante décadas de actividades mineras en la región de interés, en donde la emisión de contaminantes ha carecido de control suficiente para minimizar los daños al ambiente, los cuales repercuten en la población humana. Para ello se propone incluir los siguientes tres componentes.

3.1. Monitoreo de mercurio en aire ambiente

De acuerdo con los resultados obtenidos en el monitoreo exploratorio, se recomienda a mediano plazo, un monitoreo continuo de las concentraciones de mercurio en aire en diferentes horarios y estaciones del año, a fin de posibles daños crónicos a poblaciones vulnerables como niñas, niños y mujeres embarazadas por la exposición a mercurio y otros contaminantes.

Para realizar un monitoreo continuo de mercurio en aire ambiente, existen equipos que generalmente operan bajo en principio de espectroscopia de fluorescencia atómica con capacidad de realizar especiaciones de mercurio atmosférico automatizadas, continuas y sin supervisión.

Finalmente, a largo plazo se sugieren acciones de remediación y descontaminación de la zona debido a que la mayoría de los jales mineros se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos y son acumulados en grandes terrenos conocidos como presas de jales que podrían ser un foco de emisión de mercurio y otros contaminantes.

3.2. Monitoreo de suelo y polvo urbano

Derivado de los resultados obtenidos en el muestreo exploratorio descrito en el presente informe, se requiere realizar una campaña de muestreo conformada por dos periodos, uno en época de lluvias y otro en temporada de secas, mediante un muestreo más extensivo de la zona para verificar las fluctuaciones de las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos a lo largo de las estaciones del año.

Para cada periodo se desarrollará un plan de muestreo de suelo conforme la NMX-AA-132-SCFI-2016 y se complementará con sus respectivas campañas de monitoreo de polvo urbano y de aire ambiente mediante colectores de alto volumen para partículas.

Con respecto al arsénico, cobre y selenio, que mostraron concentraciones muy elevadas en este muestreo preliminar, será importante comparar sus valores en relación con los niveles de fondo, ya que el suelo de esta zona de estudio se caracteriza por la presencia natural de cantidades importantes de diferentes elementos potencialmente tóxicos.

Asimismo, una campaña de muestreo más extensiva permitirá realizar un análisis para correlacionar las concentraciones de suelo, polvo urbano y aire; en particular en la época de secas cuando aumentan las posibilidades de resuspensión y dispersión de los metales y metaloides asociados al suelo y que se movilizan como partículas atmosféricas por acción de los vientos. Esta información ayudará a estimar los valores de riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

Asimismo, se colectarán perfiles de suelo que permitan identificar la distribución de horizontes en el Municipio de Cananea y determinar cómo cambian las concentraciones de los elementos de interés con la profundidad y los cambios en las propiedades de las capas de suelo.

3.3. Monitoreo de la exposición personal

De la revisión de estudios previos referentes a la calidad del aire realizados en la región de Cananea, así como, de la información generada en la campaña exploratoria realizada por el INECC, se identifica la necesidad de implementar el monitoreo de la calidad del aire y parámetros meteorológicos para la generación de información que permita estudiar los patrones diurnos y la estacionalidad de la formación y transporte de las emisiones provenientes de la industria minera en la región.

Respecto a la determinación de la exposición personal a contaminantes atmosféricos, se sugiere priorizar los esfuerzos en los sectores de la población que pudieran ser más vulnerables a los impactos en su salud. Por lo anterior, se sugiere realizar la determinación de las concentraciones de contaminantes atmosféricos al interior de aulas y aire ambiente en escuelas, de al menos una escuela primaria o una secundaria, empleando sensores de bajo costo y complementado con una breve campaña de colecta de muestras para caracterizar la presencia de metales en aire ambiente por emisión y resuspensión de suelos en la zona, que pudieran estar ingresando al cuerpo de los por habitantes por cualquier vía de exposición y con ello contribuir a evaluar el riesgo e impacto en la salud.

Con los resultados que se obtengan a través de los estudios de mediano y largo plazo, señalados en las secciones anteriores, será posible dimensionar con mucho mayor precisión la magnitud, temporalidad y extensión del impacto que los metales y otros posibles contaminantes estén generando en los habitantes de Cananea y, con ello, recomendar las medidas puntuales pertinentes para mitigar la exposición, en particular de las poblaciones más vulnerables, como niños, niñas, mujeres embarazadas y adultos mayores.

4. REFERENCIAS CONSULTADAS

- Agudelo-Calderón C., Quiroz-Arcentales L., García-Ubaque C., Robledo-Martínez R., García Ubaque J., Vaca-Bohórquez M. 2016. Evaluación de condiciones ambientales: aire, agua y suelos en áreas de actividad minera en Boyacá, Colombia. Revista de Salud Pública. 18: 50-60.
- Alberta Environment and Parks (AEP). 2019. Alberta Tier 1 Soil and Groundwater Remediation Guidelines. Land Policy Branch, Policy and Planning Division. https://open.alberta.ca/dataset/842becf6-dc0c-4cc7-8b29-e3f383133ddc/resource/a5cd84a6-5675-4e5b-94b8-0a36887c588b/download/albertatier1guidelines-jan10-2019.pdf. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2021.
- Anderson T.H., Silver L.T. 1977, U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora. Economic Geology. 72: 827–836.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 1997. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Arsenic (Inorganic). https://ccme.ca/en/res/arsenic-inorganic-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf. Fecha de consulta: 14 de septiembre de 2021.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 1999a. Canadian soil
 quality guidelines for the protection of environmental and human health: Copper.
 https://ccme.ca/en/res/copper-canadian-soil-quality-guidelines-for-theprotection-of-environmental-and-human-health-en.pdf. Fecha de consulta: 14 de
 septiembre de 2021.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 1999b. Canadian soil
 quality guidelines for the protection of environmental and human health: Lead.
 https://ccme.ca/en/res/lead-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-ofenvironmental-and-human-health-en.pdf. Fecha de consulta: 14 de septiembre de
 2021.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 1999c. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Cadmium. https://ccme.ca/en/res/cadmium-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf. Fecha de consulta: 14 de septiembre de 2021.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 2009. Canadian soil
 quality guidelines for the protection of environmental and human health: Selenium.
 https://ccme.ca/en/res/selenium-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protectionof-environmental-and-human-health-en.pdf. Fecha de consulta: 14 de septiembre
 de 2021.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 2018. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Zinc. https://ccme.ca/en/res/zinc-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf. Fecha de consulta: 14 de septiembre de 2021.
- Calmus T., Valencia-Moreno M., Del Río-Salas R., Ochoa-Landín L., Mendivil-Quijada H. 2018. A multi-elemental study to establish the natural background and geochemical anomalies in rocks from the Sonora river upper basin, NW Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 35: 158—167.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2018. Atlas Nacional de Riesgos. Industrias con sustancias químicas peligrosas. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html. Fecha de consulta: 27 de agosto de 2021.

- Cisneros González S. 2019. Estudio de la Calidad del Aire Ambiente con Respecto a PM_{2.5}, Metales (Cr, Cu, Mo y Zn) en la Ciudad de Cananea, Sonora, México. Tesis de licenciatura. División de Ingeniería. Universidad de Sonora.
- Damon P.E., Shafiqullah M., Roldán-Quintana J., Cochémé J.J. 1983. El Batolito Larámide (90-40 Ma) de Sonora. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México. Convención Nacional 15. Memoria. pp. 63–95.
- Dávila Luna., Díaz Caravantes R.E., Navarro Navarro L.A., Romeo Méndez E. 2018. Las presas de jales en el noroeste del estado de Sonora: una aproximación geográfica mediante percepción remota. Investigaciones Geográficas. 97.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2007. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Fecha de publicación: 02 de marzo de 2007.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2014. ORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Fecha de publicación: 20 de agosto de 2014.
- Escobar-Quiroz I.N., Villalobos-Peñalosa M., Pi-Puig T., Martín-Romero F., Aguilar-Carrillo de Albornoz J. 2019. Identification of jarosite and other major mineral Fe phases in acidic environments affected by mining-metallurgy using X-ray Absorption Spectroscopy: With special emphasis on the August 2014 Cananea acid spill. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 36: 229-249.
- Fideicomiso Río Sonora. 2014. Diagnóstico de la situación ambiental actual asociada al derrame de la disolución ácida ferro-cuprífera de Buena Vista del Cobre hacia la cuenca del rio Sonora. Informe elaborado por Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad de Sonora e Instituto Tecnológico de Sonora. <u>ANEXO 1.2.pdf</u> (fideicomisoriosonora.gob.mx). Fecha de consulta: 26 de julio de 2021.
- González Bórguez F.M. 2017. Diagnóstico de metales en suelos residenciales y agrícolas en Ures, Sonora: Implicaciones en la evaluación a la salud humana. Tesis de Maestría. División de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Sonora.
- González León C.M. 2013. La Geología de Sonora: Una historia de 1800 millones de años. Unión Geofísica Internacional. https://ugm.org.mx/wordpress/la-geologia-de-sonora-historia/. Fecha de consulta: 16 de agosto de 2021.
- Herrera Ramírez E.A. 2019. Evaluación de la Calidad el Aire Ambiente con Respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales Pesados (Cu, Pb y Mo) para un Periodo Anual en la Ciudad de Cananea, Sonora, México. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Sonora.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1989. Carta fisiográfica 1:1,000,000. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2021. Panorama sociodemográfico de Sonora. Censo de Población y Vivienda 2020. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2020. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2019. http://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/#Documentacion/. Fecha de consulta: 16 de agosto de 2021.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2021a. Panorama sociodemográfico de México 2020 Sonora. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2021b. Geomediana Landsat. https://www.inegi.org.mx/investigacion/geomediana/#Mapa. Fecha de consulta: 16 de agosto de 2021.

- Martínez Martínez T.S. 2019. Estudio de PM₁₀ y Metales en Aire Ambiente de la Región de Cananea, Sonora, México. Tesis de licenciatura. División de Ingeniería. Universidad de Sonora. Geomediana Landsat.
- Palomares Morales E. 2017. Estudio de la Calidad del Aire Respecto a Partículas Suspendidas Totales (PST) y Metales (Cu, Cr y Mo) en la Ciudad de Cananea, Sonora, México. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad de Sonora.
- Quintana Anguamea M.I. 2019. Calidad del Aire con Respecto a PM_{2.5}, Metales y Metaloides en la Ciudad de Cananea, Sonora, México. Tesis de maestría. División de Ingeniería. Universidad de Sonora.
- Raisz E. 1964. Landforms of Mexico (mapa en escala 1:3 000 000). Office of Naval Research. Geography Branch. Editorial. Cambridge, Mass.
- Rivera-Uria M.Y., Ziegler-Rivera F.R.A., Díaz-Ortega J., Prado-Pano B., Martín Romero F. 2018. Effect of an acid mine spill on soils in Sonora River Basin: Micromorphological indicators. Spanish Journal of Soil Science. 8: 258-274.
- Rivera Uria M.Y., Martín Romero F., Sedov S., Ramos D., Solleiro Rebolledo E., Díaz Ortega J. 2019. Effects of the interaction between an acid solution and pedogenic carbonates: the case of the Buenavista del Cobre Mine, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 36: 308-328.
- Romero-Lázaro E.M., Ramos-Pérez D., Matín Romero F., Sedov S. 2019. Indicadores Indirectos de Contaminación Residual en Suelos y Sedimentos de la Cuenca del Río Sonora, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 35: 371-386, 2019.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recusos Naturales (SEMARNAT). 2017. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire para el Estado de Sonora, 2017-2026. En colaboración con el Gobierno del Estado de Sonora y la Commisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310199/23_ProAire_Sonora.pdf.
 Fecha de consulta: 9 de agosto de 2021.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2012. Inventario Físico de los Recursos Minerales de la Carta Cananea H12-B53 Municipios Arizpe, Bacoachi, Cananea y Fronteras, Estado de Sonora. Secretaría de Economía. Pachuca, México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2020. Anuario estadístico de la minería mexicana, 2019. Secretaría de Economía. Pachuca, México.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan, F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. Bulletin of the American Meteorologial Society. 96: 2059-2077.
- Rolph G., Stein A., Stunder B. 2017. Real-time Environmental Applications and Display System: READY. Environmental Modelling and Software. 95: 210-228.
- Wodzicki, W.A. 1995. The evolution of Laramide Igneous rocks and phorphyri copper mineralization in the Cananea Distict, Sonora, Mexico. Tesis de doctorado. University of Arizona. Tucson, Arizona. 181 p.