



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL

TESIS

**EVALUACIÓN DE MERCURIO ELEMENTAL
GASEOSO “IN SITU” POR ESPECTROMETRÍA DE
ABSORCIÓN ATÓMICA, EN AIRE DE LA CUENCA
ALTA DEL RIO SONORA, 2021-2023**

Para obtener el grado de

Maestro en Gestión Ambiental

PRESENTA

Ines Ramos Bautista

Director (a)

Dra / Sylvia / Martínez Hernández

Codirector (a)

Dr/ Francisco Martín / Romero

Comité tutorial

Dra/ Silvia Montiel Palma



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Área Académica de Biología

Department of Biology

Mineral de la Reforma, Hgo., a 07 de agosto de 2025

Número de control: ICBI-AAB/643/2025

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

El Comité Tutorial del nombre del producto que indique el documento curricular del programa educativo de posgrado titulado “Evaluación de mercurio elemental gaseoso “in situ” por espectrometría de absorción atómica, en aire de la cuenca alta del Río Sonora, 2021-2023”, realizado por el sustentante **Inés Ramos Bautista** con número de cuenta **477648** perteneciente al programa de **MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

El Comité Tutorial


Dra. Sylvia Martínez Hernández
Vocal


Dra. Silvia Montiel Palma
Presidenta


Dr. Francisco Martín Romero
Secretario



DMGH/DEGL

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40063, 40064 y 40065
aab_icbi@uaeh.edu.mx, maritzal@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



2025



uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y la colaboración de diversas personas e instituciones, a quienes deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar, mi profundo agradecimiento a Dra. Sylvia Martínez Hernández, mi directora de tesis, por guiar este proceso con paciencia infinita, por sus valiosos conocimientos, sus acertadas críticas y por impulsarme a superar mis límites. Su mentoría ha sido fundamental no solo para este proyecto, sino para mi formación profesional.

A mi Codirector, el Dr. Francisco Martín Romero, por impulsarme a superarme, por guiar este proceso con convicción, por sus valiosos conocimientos, sus acertadas críticas y por impulsarme a mí mismo. Su mentoría ha sido fundamental no solo para este proyecto, sino para mi formación profesional.

Agradezco también a la doctora Sylvia Montiel Palma, integrantes de mi comité tutorial, por sus enriquecedores comentarios y sugerencias que enriquecieron sustancialmente este trabajo.

Mi gratitud se extiende a CONACYT por la beca concedida para la realización de estos estudios de maestría a Grupo México (Buenavista del cobre) por el financiamiento de los estudios en campo, así como a la Universidad autónoma del Estado de Hidalgo, Universidad Nacional Autónoma de México (Instituto de Geología) por proveer los recursos e instalaciones necesarias para mi investigación.

A mis profesores de la maestría...Dr. Pablo Octavio Aguilar por su apoyo, tiempo y sabiduría, Dra. Dulce María Galván Hernández por su apoyo. Y a mis amigos y compañeros de MGA.

A mis compañeros del Laboratorio de Geoquímica Ambiental, en especial a Luis Gerardo Martínez Jardines, Leticia Hernández y a todos que de alguna manera participaron, gracias por el apoyo técnico, las fructíferas discusiones y por hacer del día a día un espacio más agradable.

Mi más sincero agradecimiento a Luz del Carmen Hernández Holguin, Lydia Lilian Loya Bojorquez, Daniel García castro por todo el apoyo invaluable durante este proyecto.

Finalmente, y de la manera más sentida, quiero agradecer a mi familia. A mi madre Victorina Bautista, por ser mi ejemplo de esfuerzo.

Este logro es tan mío como suyo... A mi esposa y compañera Bigdalia Alanis a mis princesas Itzel Jaqueline y Aline Ameyalli, por ser mi motor, mi refugio y mi razón para seguir adelante. Gracias por todo el tiempo que me prestaron, por la paciencia que tuvieron y por el amor que me brindan cada día.

A todos, gracias

*"La vida no es la que uno vivió,
sino la que uno recuerda
y cómo la recuerda para contarla"...*

Gabriel García Márquez

ABREVIATURAS

ALC	<i>América Latina y el Caribe</i>
ASGM	<i>Artisanal and Small-Scale Gold Mining (Minería de Oro Artesanal y en Pequeña Escala)</i>
ATSDR	<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades)</i>
CCCB	<i>Centro Coordinador Convenio Basilea</i>
CIN	<i>Comité Intergubernamental de Negociación</i>
CRCE	<i>Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina Y el Caribe</i>
DS	<i>Desarrollo sostenible</i>
DTIE	<i>División de Tecnología, Industria y Economía</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GA	<i>Gestión ambiental</i>
Hg	<i>Mercurio</i>
INECC	<i>Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático</i>
INEGI	<i>Instituto Nacional de Estadística, geografía e informática</i>
IQR	<i>Rango Intercuartílico (diferencia entre el primer y tercer cuartil)</i>
IRIS	<i>Integrated Risk Information System</i>
LGEEPA	<i>Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente</i>
LOAEL	<i>Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level (Nivel mínimo de efecto adverso Observado)</i>
MEG	<i>Mercurio Elemental Gaseoso (Hg⁰ en estado gaseoso)</i>
MeHg	<i>Metilmercurio</i>
NMDS	<i>Non-Metric Multidimensional Scaling (Escalamiento Multidimensional No Métrico).</i>
NOAEL	<i>No Observed Adverse effect level (Nivel máximo de dosis al que no se observan efectos adversos)</i>
PE	<i>Precámbrico (era geológica)</i>
PND	<i>Plan Nacional de Desarrollo</i>
PNUMA	<i>Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente</i>
RETC	<i>Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes</i>

RFC	<i>Reference Concentration for Chronic Inhalation Exposure</i>
RN	<i>Recursos Naturales</i>
SGM	<i>Servicio Geológico Mexicano</i>
ODS	<i>Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>
OMD	<i>Optimización de Mezcla dinámica (sistemas en calefacciones a gas)</i>
OMS	<i>Organización Mundial de la Salud</i>
ORPALC	<i>Oficina Regional para América Latina y el Caribe</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
USGS	<i>United States geological Survey</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

Contenido

Índice de Figuras	10
Índice de Tablas	11
1. Introducción.....	12
2. Antecedentes.....	13
2.1. Mercurio.....	13
2.2. Persistencia y Movilidad del Mercurio (Ciclo Biogeoquímico del mercurio).....	14
2.2.1. Comprensión del ciclo terrestre del mercurio	17
2.2.2. Progresos en el ciclo marino del mercurio	18
2.3. Efectos Ambientales de la Exposición al Mercurio	18
2.3.1. Deposición y transporte en el ecosistema terrestre.....	18
2.3.2. Deposición y transporte en el ecosistema acuático	19
2.4. Efectos de Salud Humana Relacionados con la Exposición al Mercurio.....	19
2.4.1. Exposición aguda.....	20
2.4.2. Exposición crónica	21
2.5. Límites Permisibles de Mercurio Elemental Gaseoso	21
2.6. Legislación e Iniciativas para Controlar, Limitar, Reducir y Mitigar el Uso del Mercurio en México	23
2.7. Marco Legal de los Residuos Peligrosos en México	25
2.8. Cuenca Alta del Río Sonora.....	26
2.8.1. Clima de la cuenca alta del Río Sonora	28
2.8.2. Características fisiográficas de la cuenca alta del Río Sonora	28
2.8.3. Geología	28
2.8.4. Litología: Precámbrico PE.....	28
2.8.5. Minería en la cuenca	29
2.8.6. Contaminación ambiental en la zona	31
3. Justificación.....	32
4. Objetivo General	33
5. Objetivos Particulares	33
6. Materiales y Métodos	34
6.1. Materiales	34
6.2. Metodología.....	35
6.2.1 Rutas de muestreo.	36

6.2.2	Sitios Control (Zona del silencio y Laboratorio de Química Ultrapura).....	44
6.2.3.	Determinación de Línea Base de Mercurio Elemental Gaseoso (Hg ⁰) en Zonas de Influencia Minera: Enfoque en Uso de Suelo, Variabilidad Espacial y Estacional	49
6.3	Análisis Estadístico	49
6.3.1.	El análisis estadístico univariado.	49
6.3.2.	Prueba de Kruskal-Wallis.....	50
7.	Resultados.....	51
7.1.	Fase o Monitoreo 1. MEG Durante la Época Fría y Seca (invierno)	51
7.2.	Fase o Monitoreo 2. MEG Durante la Época Cálida y Seca: Estiaje (primavera)	54
7.3.	Fase o Monitoreo 3. MEG Durante la Época Calurosa y Húmeda: Lluvias (verano)	56
7.4.	Comparación de las Tres Temporalidades de los Monitoreos.	59
7.5.	Monitoreo Casas Habitación en Cananea Sonora.....	60
7.5.1.	Concentraciones de MEG por tipo de calefacción en las casas habitación.....	61
7.6.	Sitios Control de Monitoreo de MEG	62
7.7.	Análisis Comparativo entre las Concentraciones de MEG Obtenidas en este estudio Vs INECC. 63	
7.7.1.	Determinación de Líneas Base de Mercurio Elemental Gaseoso (Hg ⁰) en Zonas de Influencia Minera: Enfoque en Uso de Suelo, Variabilidad Espacial y Estacional	64
7.8.	Análisis Estadístico.....	69
7.8.1.	Evaluación de supuestos estadísticos (Pruebas de Kolmogorow-Smirnov).....	69
7.8.2.	Métodos no paramétricos (-Wallis).....	70
7.8.3.	Análisis de Valores Extremos por Monitoreo.	72
7.8.4.	Correlaciones Potenciadas por Entorno	73
	Análisis de escalado multidimensional no métrico (NMDS):.....	74
8.	Discusiones	78
8.1.	Posibles causas de la reducción (2021 vs 2022):.....	78
8.2.	Concentraciones de MEG en Zonas Mineras.....	78
8.3.	Variabilidad Estacional y Factores Meteorológicos.....	79
8.4.	Impacto de la Actividad Minera y Uso de Suelo	80
8.5.	Líneas Base.....	81
8.6.	Limitaciones y Futuras Investigaciones	81
8.7.	Casas habitación en Cananea Sonora.....	82
8.8.	Asociación de MEG con Depósitos Cupríferos Tipo Skarn	82
	Niveles de MEG en Cananea	82

8.9 Comparación Global Vs Atmospheric Mercury Network (AMNet)	83
9. Conclusiones	84
Recomendaciones	87
Referencias	87

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Ciclo biogeoquímico global del mercurio. Fuente (CCCB/CRCE, 2014)</i>	15
Figura 2 Dinámica del movimiento temporal del mercurio en diferentes reservorios ambientales. Fuente (Gustin, 2020).....	16
Figura 3 Zona de estudio cuenca alta del Río Sonora (Elaboración Propia).....	27
Figura 4 Mina Buenavista del cobre. Fuente:(https://outletminero.org/buenavista-del-cobre-es-la-septima-mina-de-cobre-del-mundo/).....	29
Figura 5 Regiones y distritos mineros del estado de Sonora. Fuente: SGM (2020)	30
Figura 6 Ruta 1. Zona norte de Cananea Sonora.....	37
Figura 7 Ruta 2. Zona centro y mayor densidad poblacional en el municipio de Cananea.	38
Figura 8 Ruta 3. Municipios de Bacoachi y Arizpe (zona rural)	39
Figura 9 Monitoreo de MEG dentro de instalaciones mineras de cobre.....	40
Figura 10 Prospectos mineros y minería histórica dentro de la zona de estudio.....	41
Figura 11 Transectos: Tinajas-Arizpe y Cananea-Arizpe.....	42
Figura 12 Sitios posibles fuentes de MEG por actividades antropogénicas	43
Figura 13 Monitoreo de MEG en casas habitación en el municipio de Cananea, Sonora.....	44
Figura 14 Sitios control para monitoreo de MEG.	45
Figura 15 MEG durante la época fría y seca (invierno)	52
Figura 16 MEG durante la época cálida y seca: estiaje (primavera)	54
Figura 17 MEG durante la época calurosa y húmeda: Lluvias	57
Figura 18 Comparación de MEG en los tres monitoreos	59
Figura 19 Monitoreo en casa habitación 2022 y 2023.....	61
Figura 20 Sitios control laboratorio de química ultrapura y Zona del silencio	62
Figura 21 MEG en zona urbana-minera.....	66
Figura 22 MEG en zona rural-minera	67
Figura 24 MEG en zona industrial-minera.....	68
Figura 25 NMDS: Dispersión de monitoreos de MEG en el espacio de viento-altitud	74
Figura 26 NMDS: Dispersión de monitoreos de MEG en el espacio temperatura y presión barométrica 76	

Índice de Tablas

Tabla 1 Concentraciones de referencia para exposición crónica por inhalación de MEG	22
Tabla 2 Valores de referencia de mercurio para la protección de la salud humana en función del tiempo de exposición laboral por inhalación de MEG	22
Tabla 3 Cantidades totales de las principales sustancias emitidas al aire por las empresas o establecimientos ubicados en los municipios de la cuenta alta del Río Sonora. (Tomada INECC (2021))	31
Tabla 4 Fase o monitoreo 1. MEG durante la época fría y seca (invierno).....	46
Tabla 5 Fase o monitoreo 2. MEG durante la época calurosa y seca: estiaje (primavera)	46
Tabla 6 Fase o monitoreo 3. MEG durante la época calurosa y húmeda: lluvias (verano)	48
Tabla 7 Estadística descriptiva del monitoreo 1 por ruta. MEG durante la época fría y seca (invierno) ..	53
Tabla 8 Estadística descriptiva del monitoreo 2. MEG durante la época cálida y seca: estiaje (primavera)	55
Tabla 9 Estadística descriptiva del monitoreo 3. MEG durante la época cálida y húmeda: Lluvias (verano)	58
Tabla 10 Comparación general entre rutas (datos propios)	63
Tabla 11 Contraste datos INECC vs. datos de este estudio	64
Tabla 12 Pruebas de normalidad para MEG (Kolmogorov-Smirnov)	69
Tabla 13 Pruebas de normalidad para MEG (Kolmogorov-Smirnov)	70
Tabla 14 Datos prueba de Dunn con Bonferroni	71
Tabla 15 Datos prueba de Dunn Bonferroni con datos ambientales	71
Tabla 16 Análisis de valores extremos	72
Tabla 17 Correlaciones por entorno	73
Tabla 18 MEG Cananea vs referencia global	83

1. Introducción

De acuerdo con la agencia Gubernamental para el registro de sustancias tóxicas y enfermedades de los estados unidos (ATSDR) por sus siglas en inglés y con la Organización Mundial de La Salud (OMS), el mercurio se encuentra dentro de los diez elementos químicos más tóxicos para los humanos y el medio ambiente (OPS, 2023), la ATSDR lo clasifica en el tercer lugar solo por debajo del arsénico y el plomo (Kumar, y otros, 2023).

El mercurio en años recientes ha generado un interés internacional, nacional y local para algunos sitios de México en materia de su regulación, eliminación o sustitución, por su alta toxicidad mencionada anteriormente. En especial el mercurio que se libera a la atmósfera ya que los niveles en el medio ambiente han aumentado considerablemente desde el inicio de la era industrial (PNUMA, 2002).

El mercurio se libera al ambiente por causa Naturales (como erupciones volcánicas, incendios forestales, actividad geotérmica, intemperismo de rocas expuestas, erosión por lluvias y en los océanos de acuerdo con datos del Centro Coordinador Convenio Basilea (2014) y del Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina Y el Caribe (2018), y por actividades antropogénicas (minería aurífera artesanal a pequeña escala, la combustión de carbón por la industria energética, la producción de metal no ferroso en especial las fundiciones y la producción de cemento) (AMAP/UN Environment, 2019).

Una vez liberado o emitido a la atmósfera como Mercurio Elemental Gaseoso (MEG) se convierte en contaminante fuertemente nocivo, por su persistencia; movilidad (en la atmósfera puede transportarse por largas distancias); por su capacidad para formar compuestos orgánicos, que son bioacumulables (se acumula en seres vivos) entrando en la cadena trófica, y la

biomagnificación (su concentración aumenta a medida que se asciende en la cadena trófica) y dados sus efectos nocivos en la salud humana (CCCB/CRCE, 2014). La presencia más importante de contaminación por mercurio es la emisión al aire, se estima que anualmente se emiten entre 2500 ± 500 toneladas a la atmósfera provenientes de actividad antropogénica (AMAP/UN Environment, 2019). El mercurio elemental gaseoso en la atmósfera puede convertirse en mercurio iónico, que crea una ruta importante para su depósito en suelo y agua (PNUMA, 2002)

El presente trabajo tiene un gran interés por evaluar la concentración de mercurio elemental gaseoso en una de las ciudades mineras cupríferas más importantes de México ya que diversos estudios mencionan a la extracción de metales no ferrosos como una fuente de emisión de mercurio elemental gaseoso; esto con la finalidad de ver si esta actividad puede ser una fuente de emisión de MEG al ambiente y si éste pudiera generar un riesgo al ambiente o a la salud Humana.

A su vez pretende evaluar localmente (ciudad de Cananea y alrededores) todas las posibles fuentes, tanto antropogénicas como naturales, de emisión de mercurio elemental gaseoso al ambiente.

2. Antecedentes

2.1. Mercurio

Es un elemento químico, su símbolo es Hg, con número atómico 80 y peso atómico 200.59, es un líquido blanco plateado a temperatura ambiente, su punto de fusión es a $-38.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y punto de ebullición a 357°C (a presión atmosférica). Es un metal noble, soluble únicamente en soluciones oxidantes. El mercurio forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales (oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio) (Lenntech, 2024)

El mercurio metálico se usa en interruptores eléctricos como material líquido de contacto, como fluido de trabajo en bombas de difusión en técnicas de vacío, en la fabricación de rectificadores de mercurio, termómetros, barómetros, tacómetros, termostatos y en la manufactura de lámparas de mercurio. En medicina se usa en amalgamas de plata para empastes de dientes (CCCB/CRCE, 2014).

En la naturaleza el mercurio se encuentra comúnmente como sulfuro de mercurio HgS, donde el rojo de cinabrio α -HgS es la forma más abundante y el metacinabrio negro β -HgS, la menos abundante. El mercurio metálico se extrae de este mineral mediante una destilación que se lleva a cabo calentando el cinabrio en hornos a una temperatura mayor a 538 °C esto evapora al mercurio del mineral para después enfriar estos vapores condensando al mercurio metálico en su forma líquida. (Budnik y Casteleyn, 2019)

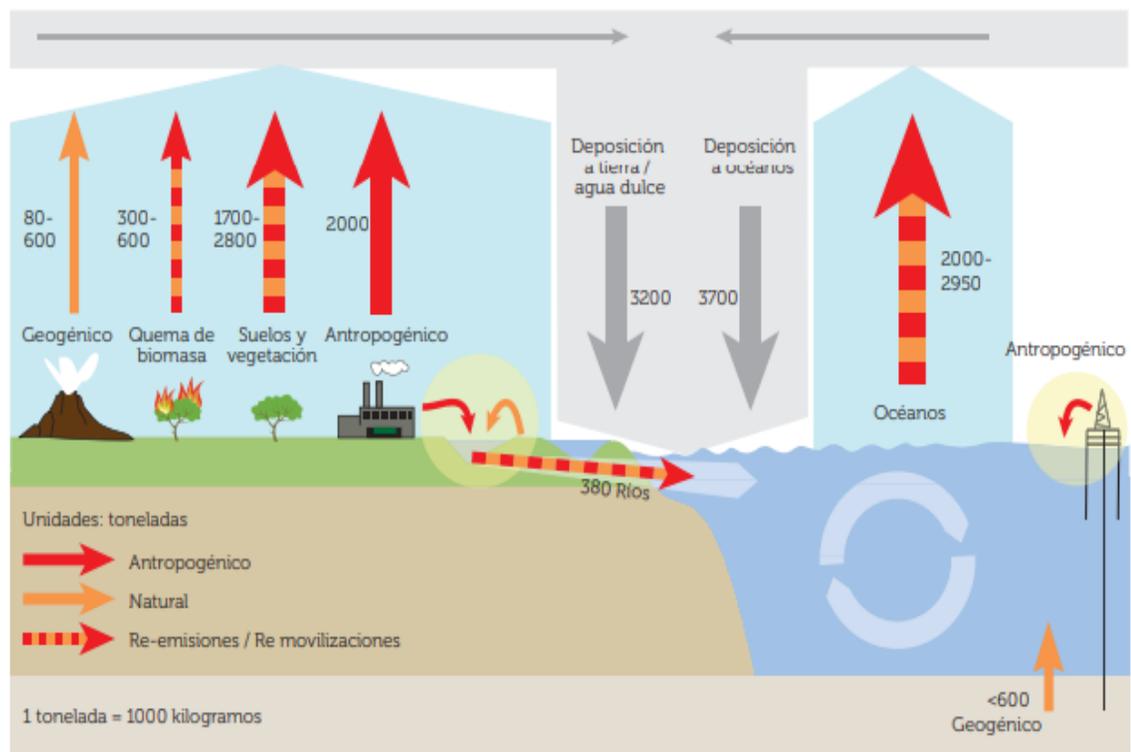
2.2. Persistencia y Movilidad del Mercurio (Ciclo Biogeoquímico del mercurio)

El ciclo biogeoquímico del mercurio inicia con la emisión ya sea por fuentes naturales como por el resultado de la ruptura de minerales de rocas, erupciones volcánicas, quema de biomasa en incendios forestales naturales y provocados y, la erosión de suelos a través de la exposición al viento y al agua. La liberación de mercurio desde fuentes naturales ha permanecido en el mismo nivel a través de los años a excepciones de eventos volcánicos importantes. Una vez emitido a la atmósfera este puede depositarse y posteriormente reemitirse a la atmósfera como lo menciona Gustin (2020) o ser absorbido activamente por la flora, que secuestra cerca de una tercera parte del mercurio elemental gaseoso emitido cada año. Al ciclo biogeoquímico del mercurio intervienen una variedad de fuentes y procesos complejos de transporte, absorción, sorción, re-suspensión y movilización global del mercurio (ver figura 1).

Se estima que un 30% de las emisiones actuales a la atmósfera son de origen antropogénico (unas 2000 toneladas), mientras que un 10% proceden de fuentes naturales y el resto (60%) proviene de “re-emisiones” de mercurio depositado y acumulado históricamente en los suelos y los océanos (CCCB/CRCE, 2014, p. 6).

Figura 1

Ciclo biogeoquímico global del mercurio. Fuente (CCCB/CRCE, 2014)

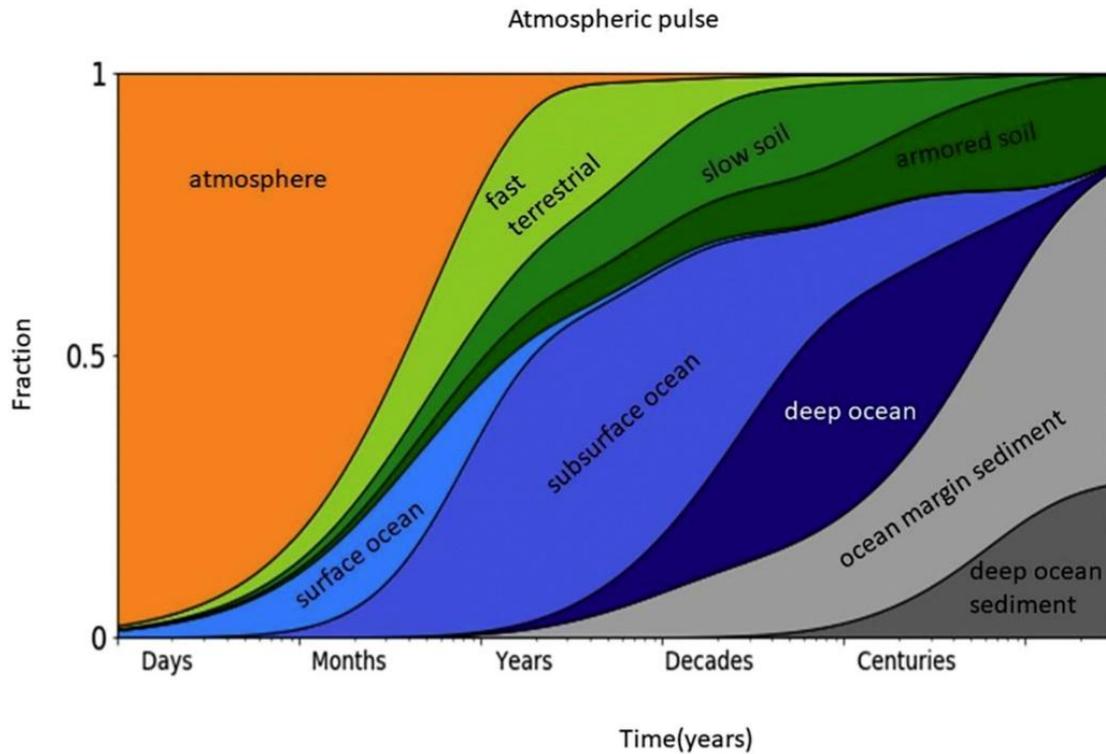


Gustin et al. (2020) señalan que dada la volatilidad del mercurio elemental (que inicia su volatilización a temperatura ambiente, aproximadamente a los 20 °C) y la escasa existencia de sumideros de larga duración, una vez que un átomo de mercurio se libera a la atmósfera puede permanecer en circulación durante >1000 años. El sumidero más efectivo es el entierro en los sedimentos y el suelo del océano profundo (Figura 2).

Figura 2

Dinámica del movimiento temporal del mercurio en diferentes reservorios ambientales. Fuente

(Gustin, 2020)



El análisis de isótopos estables de Hg sirve como herramienta para comprender la dinámica de distribución de fuentes de Hg que contaminan cualquier componente de un ecosistema y los procesos que afectan al destino y el transporte de Hg en el medio ambiente (Gustin, 2020).

La utilidad e importancia de los isótopos estables del Hg está dada por que el fraccionamiento dependiente de la masa (MDF por sus siglas en inglés) y el fraccionamiento independiente de la masa (MIF por sus siglas en Inglés) pueden cambiar su abundancia natural de las proporciones de isótopos, que pueden ser utilizadas para comprender procesos biogeoquímicos, como reacciones redox bióticas y abióticas, cambios en la química del mercurio y cambios de fase

(como volatilización, condensación). El MDF ocurre durante muchos procesos biogeoquímicos, como reacciones redox biótica y abióticas, cambios en la química del mercurio, mientras que el MIF ocurre en transformaciones fotoquímicas mediadas por el efecto isotópico magnético (Gustin, 2020)

El Hg durante su ciclo puede cambiar de estado y especie, donde su forma más simple es el mercurio elemental; pero puede presentarse en cualquiera de las siguientes especies y estados:

- Como vapor metálico (Mercurio Elemental Gaseoso) Hg^0 (gas)
- Mercurio Líquido/ elemental.
- Unido a minerales que tiene mercurio (sólido, ejemplo Cinabrio)
- Iones en solución o unidos a compuestos iónicos (sales inorgánicas y orgánicas)
- Complejos iónicos solubles
- Compuestos orgánicos no iónicos gaseosos o disueltos
- Unidos a partículas o materia orgánica o inorgánica mediante adsorción iónica electrofílica o lipofílica.

A todas estas diferentes formas de mercurio existentes se les llama “especies”. La especiación desempeña un papel importante en la toxicidad, acumulación, biomagnificación, biomodificación, exposición y excreción al mercurio de organismos vivos (PNUMA, 2002).

2.2.1. Comprensión del ciclo terrestre del mercurio

Gustin (2020) recopiló avances en la comprensión del ciclo del Hg en los últimos años, destacando cómo en el ciclo terrestre el calentamiento o cambio climático está movilizandando las reservas de Hg en suelos árticos y boreales expuestos por el deshielo del permafrost y el aumento de incendios forestales .

2.2.2. Progresos en el ciclo marino del mercurio

El ciclo del mercurio es específico, dependiendo si ocurre en el mar, el hielo o el Ártico y se cree que el cambio climático lo está afectando considerablemente; pero en los últimos años gracias a los avances y desarrollo de nuevas tecnologías se reveló que la distribución de especies de mercurio es similar a la distribución de nutrientes en el mar (menor en superficie mayor en lo profundo). Para el caso de mercurio total, puede corresponder a la absorción y eliminación biológica del agua superficial mediante el hundimiento de partículas que aportan Hg a las aguas más profundas. Para el Hg elemental y el metil y dimetil mercurio, las concentraciones bajas en el agua superficial se deben a procesos de pérdida *in situ*, ya sea por reacciones oxidación-reducción.

2.3. Efectos Ambientales de la Exposición al Mercurio

El mercurio entra en el ambiente por fuentes naturales y antropogénicas. Con la aparición de los humanos y posterior revolución industrial, las concentraciones de mercurio en el medioambiente están creciendo; esto es debido principalmente a las actividades minera de mercurio, oro; quema de combustibles fósiles, producción de metales no ferrosos y la industria del cemento creando una novedosa fuente de Hg para el ciclo biogeoquímico (Gustin, 2020).

2.3.1. Deposición y transporte en el ecosistema terrestre

El transporte del Hg involucra movimiento en la litosfera, atmósfera e hidrosfera, ya sea local, regional o global. El mercurio alcanza fácilmente la troposfera donde puede viajar grandes

distancias antes de su deposición; la inercia del mercurio elemental Gaseoso le permite recorrer grandes distancias y depositarse como deposiciones secas, que son absorbidas por las hojas de las plantas a través del intercambio gaseoso de los estomas. Por tal motivo, una parte del mercurio acumulado en suelos es por el aporte que proviene de hojas caducifolias al caer y descomponerse. Otro aporte es la deposición de Hg^{2+} que se deposita directamente sobre la copa de los árboles y llega hasta los suelos donde puede ser absorbido por los suelos y convertirse en MeHg (metil mercurio) o puede reducirse a Hg^0 en agua. El mercurio acumulado puede regresar a la atmósfera por la acción de la volatilización (Kumar, y otros, 2023).

2.3.2. Deposición y transporte en el ecosistema acuático

Las partículas que contienen mercurio (partículas suspendidas o sedimentos arrastrados por la lluvia) se sedimentan en cuerpos de agua, donde el Hg es transportado por materia orgánica y materia mineral y se deposita en los sedimentos lacustres afectada por variables físicas, químicas y biológicas; algunos ejemplos de estas variables son el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH, los agentes complejantes y la concentración de nutrientes. Existen reacciones oxido-reducción entre Hg^0 y Hg^{2+} lo que facilita su distribución en complejos orgánico e inorgánicos. La metilación es favorecida por el contenido de materia orgánica y ocurre en los sedimentos como en la columna de agua; lo que facilita la acumulación en las formas de vida acuática, siendo esta la de mayor preocupación por la bioacumulación y biomagnificación del MeHg (Kumar, y otros, 2023).

2.4. Efectos de Salud Humana Relacionados con la Exposición al Mercurio

La toxicidad del mercurio está muy documentada actualmente hay un convenio internacional firmado por México “Convenio de Minamata sobre el Mercurio, 2017”, donde el objetivo principal de este es proteger la salud humana y el ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos de mercurio (DOF, 2017).

El mercurio es neurotóxico y teratogénico. Su toxicidad se extiende a todas sus formas químicas. El Hg puede ingresar de diversas formas al cuerpo humano: la inhalación, la ingesta y el contacto con la piel (Kumar, y otros, 2023); donde la principal y a la que estamos expuestos todos es la inhalación.

La forma más abundante del mercurio orgánico es el metilmercurio (MeHg), es absorbido fácilmente por organismos inferiores, tiende a ascender en la cadena alimentaria y a bioacumularse en los peces y bioamplificarse a razón que asciende en la cadena trófica. El sistema digestivo absorbe aproximadamente el 95% de MeHg ingerido, donde puede ingresar a glóbulos rojos y al cerebro uniéndose covalentemente a los grupos proteicos glutatión y cisteína. La excreción vía urinaria de MeHg es insignificante, este se elimina vía biliar a razón o a una tasa del 1% de la carga corporal por día. La vida media biológica es de 39 a 70 días y esta depende de la carga corporal (Rice, 2014).

La exposición al mercurio en altos niveles puede dañar al sistema nervioso, daño al ADN y cromosomas, reacciones alérgicas, efectos negativos en la reproducción, daño en el esperma, corazón, riñones, pulmones y sistema inmunológico de personas de todas las edades.

2.4.1. Exposición aguda

Es cuando una persona está expuesta a una gran cantidad de mercurio en un corto tiempo. Las fuentes pueden ser todos aquellos equipos o aparatos que contengan mercurio como: termómetros, lámparas fluorescentes, derrames de mercurio, inhalación de vapores de mercurio o ingestión (EPA, 2014).

Entre los compuestos de mercurio más peligrosos se encuentra el dimetil mercurio, que es lo suficientemente tóxico para provocar la muerte con unos pocos microlitros sobre la piel, el

envenenamiento por mercurio puede provocar la muerte, retraso mental, disartria, déficits neurológicos defectos del desarrollo etc.

2.4.2. Exposición crónica

Es cuando una persona se expone a pequeñas cantidades de mercurio por un periodo prolongado de tiempo. Las fuentes pueden ser pescado contaminado con mercurio (la concentración máxima permitida en mariscos es de 1 ppm según la agencia de administración de drogas y alimentos de EE. UU.) (Rice, 2014), exposición ocupacional al mercurio, amalgamas dentales, uso de productos con mercurio y productos con mercurio añadido.

Los síntomas más conocidos son: temblores, debilidad muscular, confusión, pérdida de memoria, dificultad para hablar, daño en el sistema nervioso y problemas en el desarrollo de niños (OMS, 2017).

2.5. Límites Permisibles de Mercurio Elemental Gaseoso

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los niveles más bajos con efecto adverso observado (LOAEL por sus siglas en inglés) para vapor de mercurio se sitúan entre 15000 y 30000 ng/m³. Y estableció un valor de referencia para la exposición a largo plazo por inhalación de vapores de MEG es de 1000 ng/m³ (media anual) (World Health Organization, 2000)

A su vez para evaluar los posibles Riesgos debido a la exposición por inhalación, la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) de EE. UU., establece una Concentración de Referencia para exposición crónica por Inhalación (RFC, por sus siglas en inglés) de mercurio elemental de 300 ng/m³, basado en un nivel mínimo de efecto adverso Observado (LOAELs) (ajustado para la exposición intermitente) de 900 ng/m³ y un factor de incertidumbre de 30 (para tener en cuenta la subpoblaciones Humanas sensibles y las deficiencias

de las bases de datos). Se tomaron como base los estudios de Fawer et al. (1983), Piikivi y Tolonen (1989), Piikivi y Hanninen (1989), Pedernal 1989, Ngim et al., (1992) y Liang et al. (1993), para determinar el LOAEL (U.S. Environmental Protection Agency, 1995) ver Tabla 1.

Tabla 1

Concentraciones de referencia para exposición crónica por inhalación de MEG

Entidad	Valor de Referencia	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ng/m^3
OMS (World Health Organization, 2000)	1	1000
Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2022)	1	1000
US_EPA (U.S. Environmental Protection Agency, 1995)	0.3	300

También se han establecido límites para exposición laboral. Ver Tabla 2.

Tabla 2

Valores de referencia de mercurio para la protección de la salud humana en función del tiempo de exposición laboral por inhalación de MEG

Agencia	Descripción	Valor de referencia
		Ocupacional
OSHA (1)	PEL(a), Exposición hasta de 8 horas diarias/40 horas a la semana para la industria en general, artillería naval y construcción Mercurio, excepto compuestos organometálicos	100 000 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
	PEL, Exposición máxima (Límite de exposición permitido) Mercurio, excepto compuestos organometálicos	40 000 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
NIOSH (2)	REL (b), Exposición hasta de 10 horas diarias/40 horas a la semana	50 000 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
	REL, Exposición máxima (Límite de Exposición recomendado) Mercurio, excepto compuestos organometálicos de mercurio	100 000 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
	IDLH (c) (Inmediatamente peligroso para la vida o la salud) Mercurio, excepto compuestos organometálicos de mercurio	10 000 000 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
<i>Criterios de emergencia</i>		
<i>Niveles de referencia de exposición aguda de vapor de mercurio en el aire</i>		
EPA (3)	AEGL 1 (d) (niveles guía de exposición aguda) AEGL 2	No recomendado

Agencia	Descripción	Valor de referencia Ocupacional
	10-minute	3 100 000 ng m ⁻³
	30-minute	2 100 000 ng m ⁻³
	60-minute	1 700 000 ng m ⁻³
	4-hour	670 000 ng m ⁻³
	8-hour	330 000 ng m ⁻³
	AEGL 3	
	10-minute	16 000 000 ng m ⁻³
	30-minute	11 000 000 ng m ⁻³
	60-minute	8 900 000 ng m ⁻³
	4-hour	2 200 000 ng m ⁻³
	8-hour	2 200 000 ng m ⁻³

Nota: 1) OSHA = Occupational Safety and Health Administration (**Administración de Salud y Seguridad Ocupacional**)

(2) NIOSH = National Institute for Occupational Safety and Health (**Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional**)

(3) EPA = Environmental Protection Agency (**Agencia de Protección Ambiental**)

(a) PEL = permissible exposure limit (**Límite de exposición permitido**)

(b) REL = recommended exposure limit (**Límite de Exposición recomendado**)

(c) IDLH = immediately dangerous to life or health (**Inmediatamente peligroso para la vida o la salud**)

(d) AEGL = acute exposure guideline levels (**niveles guía de exposición aguda**)

2.6. Legislación e Iniciativas para Controlar, Limitar, Reducir y Mitigar el Uso del Mercurio en México

Actualmente se tienen registros de presencia de mercurio en 8 estados de la república mexicana, los cuales son Chihuahua, Durango, México, Guanajuato, Guerrero, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas (INECC, 2016).

En 2005 se crea la Asociación Mundial sobre el Mercurio del PNUMA, que incluye ocho áreas prioritarias:

- Reducir el mercurio en la extracción de oro artesanal y en pequeña escala.
- Control del mercurio emitido en la combustión del carbón.

- Reducción de mercurio en el sector cloro-álcali
- Reducción de Mercurio en productos
- Investigación del transporte atmosférico del mercurio y su destino en los compartimentos ambientales.
- Gestión de desechos de mercurio.
- Suministro y almacenamiento de mercurio.
- Reducción del mercurio en la industria del cemento.

Con la entrada en vigor del convenio de Minamata el 31/10/2017, se tuvo que realizar un análisis del marco regulatorio del mercurio en la legislación nacional vigente e identificar los actores implicados; para ello se mencionan aquí los principales actores implicados:

- Sector gubernamental
- Sector productivo
- Sector Académico
- Organismos de la sociedad civil nacionales e internacionales

El objetivo del convenio es proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos de mercurio. Y se compone de 35 artículos (DOF, 2017)

Una vez definidos los actores se analizó el marco regulatorio encontrándose un marco legal compuesto por leyes federales, reglamentos, normas oficiales mexicanas y acuerdos que dan sustento a las autoridades encargadas de implementar las obligaciones adquiridas.

En cuanto a las leyes se tuvo que revisar la ley minera para establecer que el mercurio no será más un elemento de extracción minera.

Y se tendrían que revisar para procurar la congruencia con los compromisos adquiridos por México: El listado de actividades riesgosas, el reglamento del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, así como 13 Normas oficiales mexicanas referentes a temas de regulación de mercurio en productos, procesos, almacenamiento, desechos y sitios contaminados (INECC, 2016).

2.7. Marco Legal de los Residuos Peligrosos en México

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: La Constitución establece el derecho a un medio ambiente sano y la obligación del Estado de protegerlo.

Leyes federales:

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR): Esta ley es la base del marco legal para la gestión de los residuos en México, incluyendo los peligrosos.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA): Esta ley establece las bases para la protección del ambiente y la prevención de la contaminación. Define los residuos peligrosos y establece los requisitos para su manejo.

Reglamentos:

Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos: Este reglamento desarrolla los preceptos de la LGPGIR y establece las obligaciones específicas para los generadores, transportistas, manejadores y autoridades en materia de residuos.

Normas Oficiales Mexicanas (NOMs):

NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos: Esta norma define los criterios para identificar y clasificar los residuos peligrosos, así como los listados de residuos peligrosos por código, descripción y características.

NOM-083-SEMARNAT-1994, Que establece los requisitos para el manejo de los residuos peligrosos: Esta norma establece los requisitos para el manejo de los residuos peligrosos, desde su generación hasta su disposición final.

Programas:

Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos: Este programa establece las estrategias y acciones para la prevención y gestión integral de los residuos en México, incluyendo los peligrosos.

Planes de Manejo de Residuos Peligrosos: Los generadores de residuos peligrosos deben elaborar planes de manejo que describan las medidas que se tomarán para su manejo adecuado. (INECC, 2013)

Actualmente no hay NOM que regule la emisión de mercurio elemental Gaseoso a la atmósfera en México.

2.8. Cuenca Alta del Río Sonora

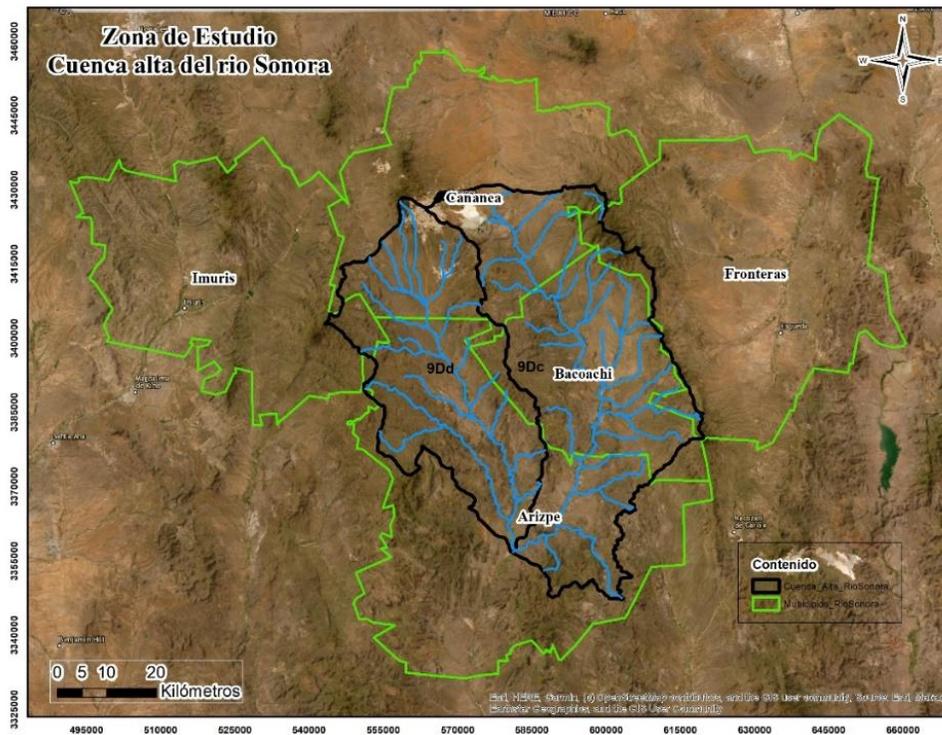
La cuenca del río Sonora se divide en 11 subcuencas las cuales alimentan al río Sonora. La mayoría de las corrientes son intermitentes excepto la parte media del río.

La zona de estudio es la parte conocida como Río Sonora-Arizpe. Esta se localiza al extremo noreste y nace con los escurrimientos de la sierra de Cananea, Los Ajos y Manzanal, con un intervalo altitudinal de 2109 a 839 msnm (INEGI, 2017).

La división política de la cuenca alta del Río Sonora pertenece a la región hidrológica 9 que lleva el nombre de Sonora Sur. La subcuenca (RH9D) que incluye, parcialmente, los municipios de Arizpe, Bacoachi, Cananea, Fronteras e Ímuris (Figura 3). Abarca un área de 4488.62 km² que incluyen el arroyo Tinajas, río Bacanuchi y río Bacoachi hasta la unión de ambos que es donde inicia el río Sonora en el municipio de Arizpe (UNAM, 2016).

Figura 3

Zona de estudio cuenca alta del Río Sonora (Elaboración Propia)



Nota: Contorno alto cuenca alta del Río Sonora, contorno verde municipios de la cuenca alta.

2.8.1. Clima de la cuenca alta del Río Sonora

La zona es muy extensa, pero se concentra en la parte alta en la ciudad de Cananea la cual tiene un clima semiseco templado (91.18%) y seco templado (7.89%) con rango de temperatura de 12-18°C y precipitaciones entre 300 y 800 mm año.

2.8.2. Características fisiográficas de la cuenca alta del Río Sonora

La fisiografía de la zona de estudio se define como sierras y Llanuras del Norte. Es la de menor extensión del conjunto fisiográfico del río Sonora; se caracteriza por tener relieve tendido que se ve cortado por estructuras orográficas mayores.

2.8.3. Geología

La edad de las rocas abarca desde el precámbrico hasta el reciente y está compuesta por litología de origen ígneo, metamórfico y sedimentario. La morfología que se presenta en el área es obra del vulcanismo de inicios del Cenozoico que finalizó con un suceso de tectónica el cual generó procesos erosivos y de depósito continental, conocidas en el noreste de México como la provincia de Basin and Range (INEGI, 2017).

2.8.4. Litología: Precámbrico PE

Los afloramientos se localizan al noreste de la sierra los Ajos y al este de la ciudad de Cananea, estas rocas solo representan el 0.02% del total del área, son las rocas más antiguas del país y forman el basamento estratigráfico del área de estudio. Los afloramientos precámbricos están compuestos por rocas metamórficas primariamente esquistos que se complementa con gneis y material corneano (INEGI, 2017).

2.8.5. Minería en la cuenca

La historia geológica del estado de Sonora ha permitido la formación de yacimientos minerales metálicos y no metálicos, lo que lo convierte en un importante estado minero, que explota cobre, molibdeno, oro, grafito, wollastonita y barita. En la región sobresalen por su producción las minas de Cananea y La Caridad (INECC, 2021). Figura 4. Mina Buenavista del cobre.

Figura 4

Mina Buenavista del cobre. Fuente: (<https://outletminero.org/buenavista-del-cobre-es-la-septima-mina-de-cobre-del-mundo/>)

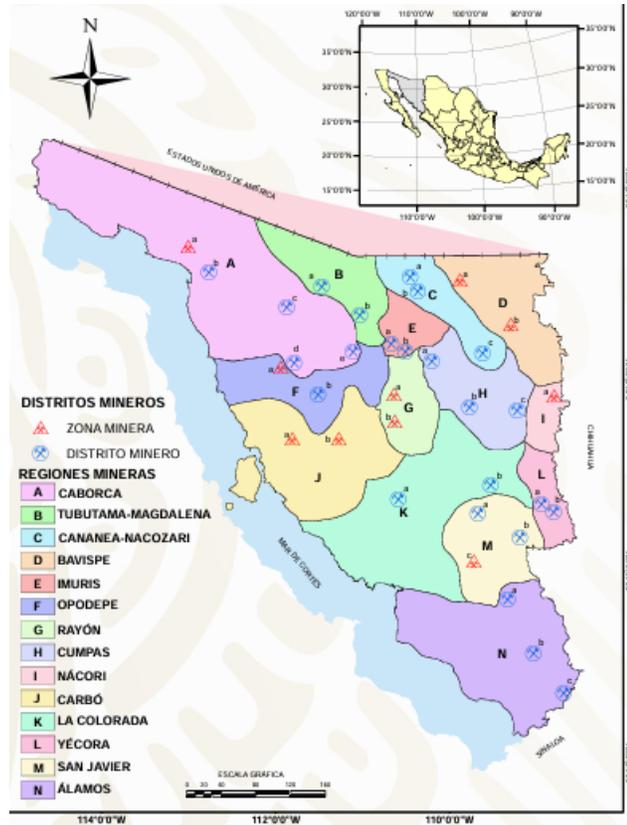


El estado de Sonora tiene características geológicas, metalogénicas y estructurales que permitieron la localización de una diversidad de yacimientos minerales que permiten dividir el

estado en regiones Mineras. A su vez la mineralización se presenta con mayor frecuencia en lugares predeterminados y permitió definir distritos mineros, Zonas mineras y áreas Mineralizadas; siendo un distrito Minero el sitio donde hubo actividad minera en el pasado, que en la actualidad pudiera o no presentarse. Mientras que la zona mineralizada se define como aquella área donde existen evidencias geológicas de alteración-mineralización. En la figura 5 se muestran las principales regiones y distritos mineros del estado de Sonora donde se encuentra nuestra zona de estudio, la región Cananea-Nacozari en el distrito minero de Cananea, con una mineralización de Cu, Mo, Zn, Pb y Sb, con depósitos Minerales de pórfido cuprífero y Skarn (Servicio Geológico Mexicano, 2020).

Figura 5

Regiones y distritos mineros del estado de Sonora. Fuente: SGM (2020)



La cuenca alta del Río Sonora posee las principales minas de cobre activas del estado, entre las que destacan: Buenavista del Cobre (filial del Grupo México), Puertecitos (mina en exploración, empresa Paget Resources Corporation), María (empresa Minera María, S.A. de C.V.), Milpillitas (mina subterránea, empresa Minera La Pareña, S.A. de C.V.), la mina de oro y plata Bacoachi (empresa Minera La Escuadra, S.A. de C.V. (INECC, 2021)

2.8.6. Contaminación ambiental en la zona

De acuerdo con el INECC del 2014 al 2019, sólo en cinco de los nueve municipios de la cuenca se localizan industrias que reportan al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) y éstos corresponden a Cananea, Cucurpe, Naco, Nogales y Santa Cruz, los cuales suman en total 253 de estas empresas (2021). Y se identificaron 14 sustancias, las más representativas se muestran en la Tabla 3, entre las cuales se incluyen algunas de composición indefinida como la neblina ácida o las partículas suspendidas totales (PST), y el mercurio elemental gaseoso en el caso de las emisiones al aire.

Tabla 3

Cantidades totales de las principales sustancias emitidas al aire por las empresas o establecimientos ubicados en los municipios de la cuenta alta del Río Sonora. (Tomada INECC, 2021)

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	49,395,053.60
Bióxido de Carbono	75,012,874.34
Partículas suspendidas totales	187,602,772.60

Sustancia	Cantidad total emitida al aire kg/año
Arsénico	0.767
Cadmio	1.333
Cobre	13.933
Cromo	13.881
Mercurio	1.454
Plomo	62.417
Zinc	14.121
Cianuro	0.371

3. Justificación

No existen estudios previos al 2014 de contaminación de mercurio elemental gaseoso en aire de la cuenca del Río Sonora, fecha en que se derramaron 40 mil metros cúbicos de lixiviado de sulfato de cobre acidulado en el arroyo Las Tinajas, lo que afectó la parte alta de la cuenca del río. Por lo que, en el 2021 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) realizó un monitoreo de calidad del aire (mercurio elemental gaseoso) en Cananea, Bacoachi y Arizpe, donde reportó concentraciones de mercurio elemental gaseoso en aire de 303.7 ng/m³. Las concentraciones reportadas se encuentran por debajo del valor máximo de exposición aguda recomendado por la OMS. Sin embargo, es importante destacar que estos niveles son superiores a los registrados en grandes ciudades como Monterrey y Ciudad de México, donde las concentraciones oscilan entre 40 y 100 ng/m³. Por ello, resulta imprescindible determinar con precisión la concentración del contaminante en la zona, ya que niveles superiores a 1000 ng/m³ representan un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente, en particular para las especies que habitan en la zona.

Actualmente solo existen normas para emisiones por combustión, por lo que es necesario establecer valores de referencia que sirvan para desarrollar propuestas de ley, sobre todo aplicables en áreas con vocación minera, ciudades y cualquier otro ambiente susceptible de contaminación por mercurio en aire ambiente. Este trabajo servirá como referente para tal fin.

Los principales beneficiarios son: en el corto plazo los pobladores de zonas adyacentes a las posibles fuentes de emisión, en el mediano plazo las autoridades que podrán considerar los resultados para la toma de decisiones sobre la prevención, monitoreo y mitigación; así como los empresarios que se encargan de extraer minerales o producir cemento, para mejorar sus condiciones y procesos. En el largo plazo el ambiente en general.

El trabajo es factible porque se cuenta con el apoyo del Laboratorio nacional de Geoquímica y Mineralogía de la UNAM, que cuenta con el analizador de mercurio RA-915M de la marca LUMEX, forma parte del proyecto Monitoreo de Mercurio en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora.

4. Objetivo General

Evaluar la concentración de vapores de mercurio en el aire de la cuenca alta del Río Sonora, empleando un espectrofotómetro de absorción atómica multifuncional portátil, para identificar los sitios con los niveles más elevados que pudieran producir daños al ambiente y la salud.

5. Objetivos Particulares

Determinar las concentraciones de MEG en sitios previamente identificados por el “Plan para la atención integral de Cananea Mesa de Salud Ambiente, reporte componente de Suelo y Aire”, mediante monitoreos en el periodo 2021-2023; para establecer la variación temporal de los registros.

Identificar posibles fuentes de emisión de mercurio elemental gaseoso en el aire de la cuenca alta del río Sonora, con base en los reportes bibliográficos donde se asocian actividades mineras, producción cementera y otras; para establecer las zonas de mayor riesgo dentro de la cuenca.

Cuantificar los niveles basales de MEG mediante monitoreo comparativo en un sitio prístino (control natural sin perturbación antropogénica) y un laboratorio ultrapuro (control técnico con atmósfera filtrada), con el fin de verificar la calibración del equipo y establecer umbrales de detección.

Determinar los valores de línea base de mercurio elemental gaseoso (Hg^0) en la atmósfera para las zonas Urbana-Minera, Rural-Minera e Industrial-Minera de Cananea, Sonora, con el fin de establecer referencias preliminares ante la ausencia de datos previos. Este análisis busca caracterizar las concentraciones naturales o de fondo de Hg^0 en cada zona, considerando su actividad económica dominante (minería) y sus particularidades socioambientales, para contribuir al monitoreo ambiental y la gestión de posibles impactos asociados a emisiones antropogénicas.

6. Materiales y Métodos

6.1. Materiales

Analizador RA-915M espectrofotómetro de absorción atómica (a 254nm) multifuncional con corrección de fondo Zeeman. Es un instrumento analítico de alta sensibilidad para la medición de mercurio, especialmente para la detección en tiempo real de mercurio elemental gaseoso en el aire, la detección de mercurio en el agua, los gases naturales y de chimenea, el aceite y el condensado, los sólidos y los sedimentos, los alimentos, etc. No requiere la preconcentración de

la amalgama de oro ni los posteriores pasos de regeneración. Esto permite llevar a cabo la monitorización y detección de MEG en tiempo real (LUMEX, 2024).

6.2. Metodología

Se realizaron tres monitoreos para evaluar las concentraciones de MEG en la cuenca alta del Río Sonora con el equipo portátil antes descrito. Para realizar los monitoreos se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- a) Al inicio de la jornada de monitoreo se enciende el equipo por un periodo de 20 min para el calentamiento del instrumento, antes de iniciar las mediciones
- b) Antes de realizar las mediciones, se realiza una comprobación de la calibración del instrumento mediante una celda auxiliar interna que contiene una cantidad conocida de Hg^0 .
- c) Al llevar a cada sitio de monitoreo el analizador de mercurio RA-915M se conectaba a un ordenador para realizar el análisis del ambiente. El equipo realiza la toma de datos cada segundo y hace un promedio cada 10 segundos.
- d) Se realizan 50 mediciones para cada sitio (durante 500 segundos).
- e) Entre cada lectura se verifica que el equipo no tenga el efecto de memoria.
- f) Para el monitoreo de MEG en casa habitación se realiza el mismo procedimiento. Solo que se realizan dos monitoreos, uno dentro de la casa y otro fuera (que sirve de referencia).

6.2.1 Rutas de muestreo.

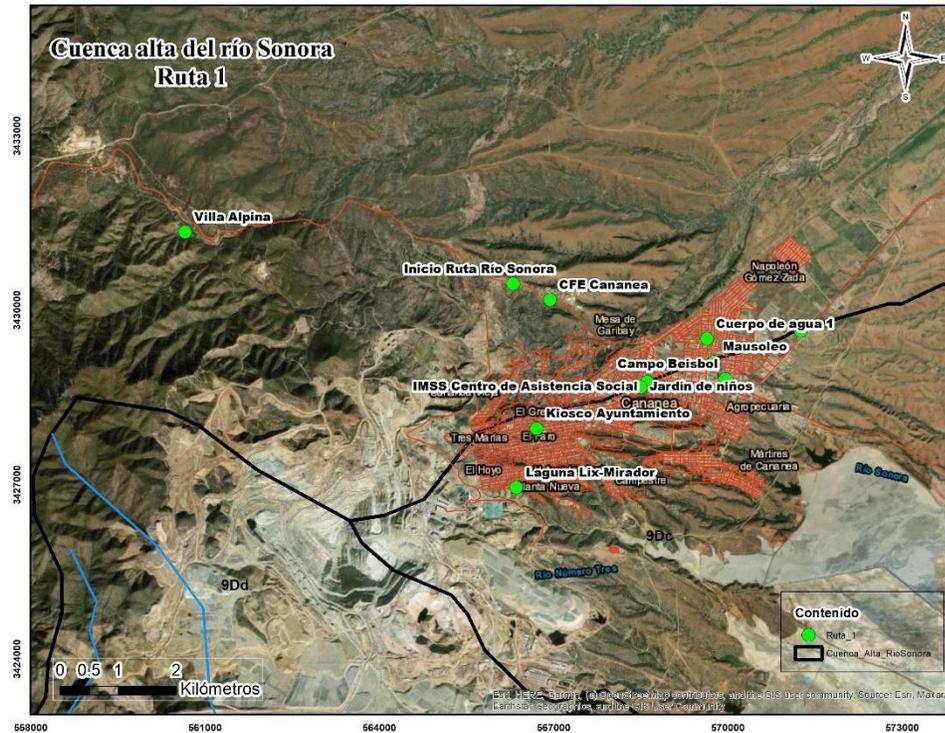
El monitoreo se realizó en los municipios de Cananea, Bacoachi y Arizpe, por diferentes sitios que se disponían en diferentes Rutas. Muchas de las rutas fueron diseñadas por el estudio realizado por el Instituto Nacional de ecología y Cambio climático (INECC).

El monitoreo se llevó a cabo, mediante un diseño espacial estratificado que incluyó múltiples sitios de muestreo en las diferentes Rutas. La selección de algunas rutas se basó en la metodología propuesta por el INECC, como se mencionó anteriormente, en su estudio “Plan para la atención integral de Cananea. Mesa de salud Ambiental: Reporte Componente de suelo y aire del 2021, replicando sus puntos estratégicos para garantizar la comparabilidad de los datos. Adicionalmente, se incorporaron nuevas rutas con el objetivo de ampliar la representatividad espacial estratégica y enriquecer el análisis integral de la distribución de mercurio en la región. A continuación, se detalla la configuración y criterios de cada ruta de monitoreo. Las rutas se muestran a continuación:

Ruta 1 (Cananea norte). Incluye la zona norte y centro del municipio de Cananea con una longitud aproximada de 10 km. Según el estudio del INECC 2021, la ruta 1 recibe los vientos predominantes durante la mayor parte del año, considerando como fuente de MEG a la mina Buenavista del cobre. Ver figura 6.

Figura 6

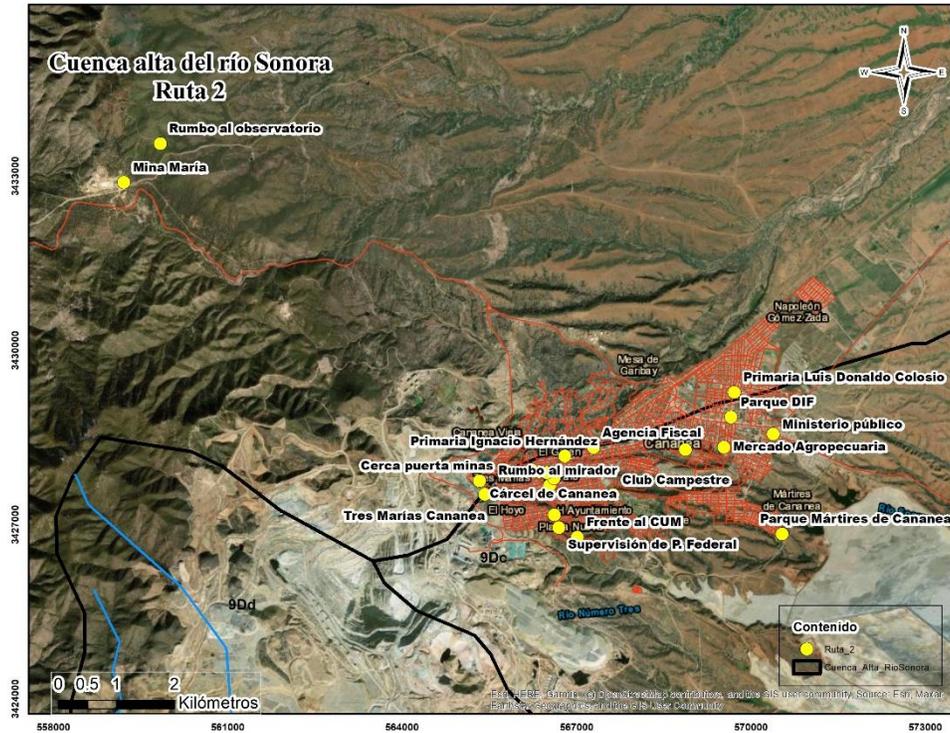
Ruta 1. Zona norte de Cananea Sonora



Ruta 2 (Cananea centro-sur). La ruta 2 enfatiza en la zona centro del municipio de Cananea y abarca los principales lugares donde se centra la población, recorre un aproximado de 18 km lineales y un área aproximada de 9 km². En los puntos de muestreo se incluye la mina de cobre al noroeste del municipio de Cananea. Ver figura 7.

Figura 7

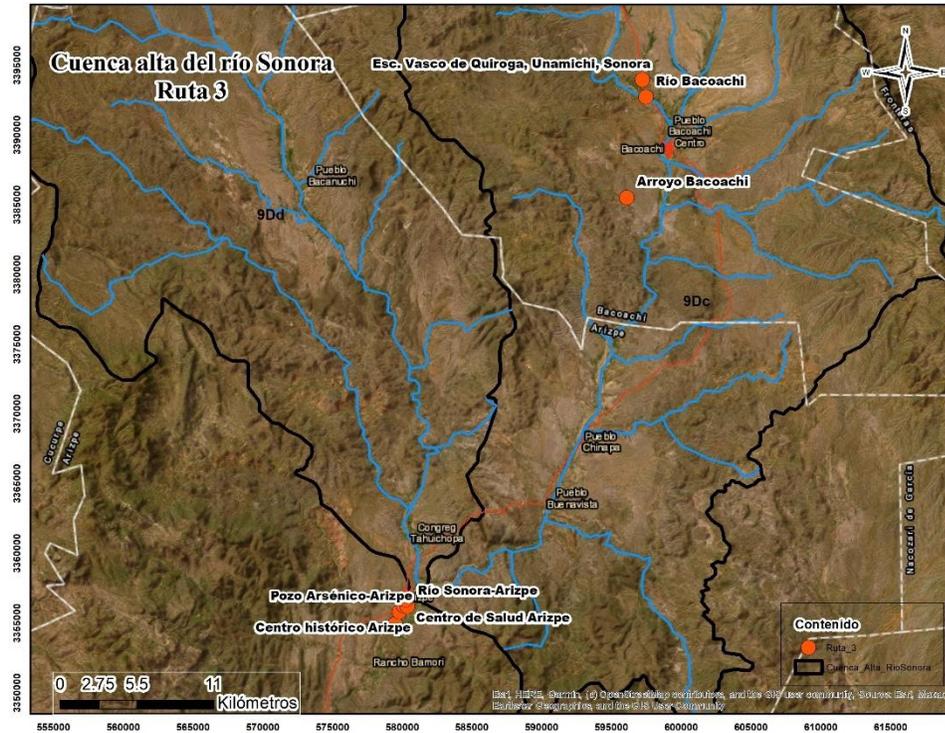
Ruta 2. Zona centro y mayor densidad poblacional en el municipio de Cananea.



Ruta 3 (Bacoachi y Arizpe). La ruta 3 abarca los municipios de Bacoachi y Arizpe (zona Rural). Recorre aproximadamente 5.4 km del Río Bacoachi, donde el monitoreo abarca algunos sitios del Río Bacoachi y el poblado del mismo nombre. Además de 5.6 km en el municipio de Arizpe donde inicia el Río Sonora. Ver figura 8.

Figura 8

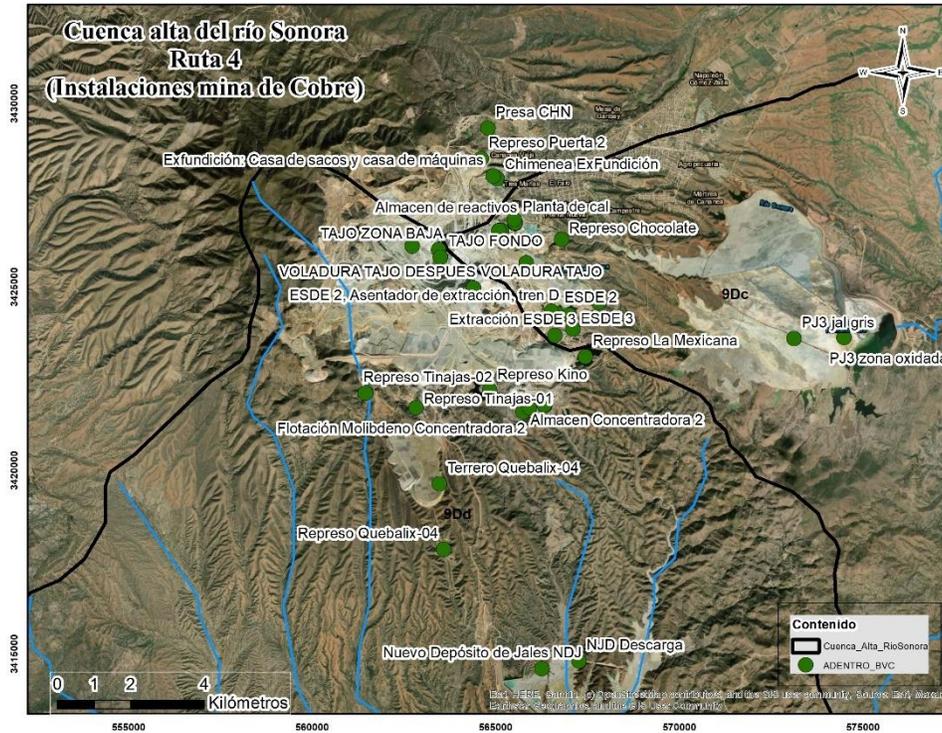
Ruta 3. Municipios de Bacoachi y Arizpe (zona rural)



Ruta 4 (Instalaciones Mineras de Cobre). La ruta 4 se localiza en el interior de una mina de cobre donde se realizaron monitoreos de MEG en los procesos de minado, beneficio y deposición de residuos con la finalidad de identificar posibles fuentes de emisión de MEG a la atmósfera. Ver figura 9

Figura 9

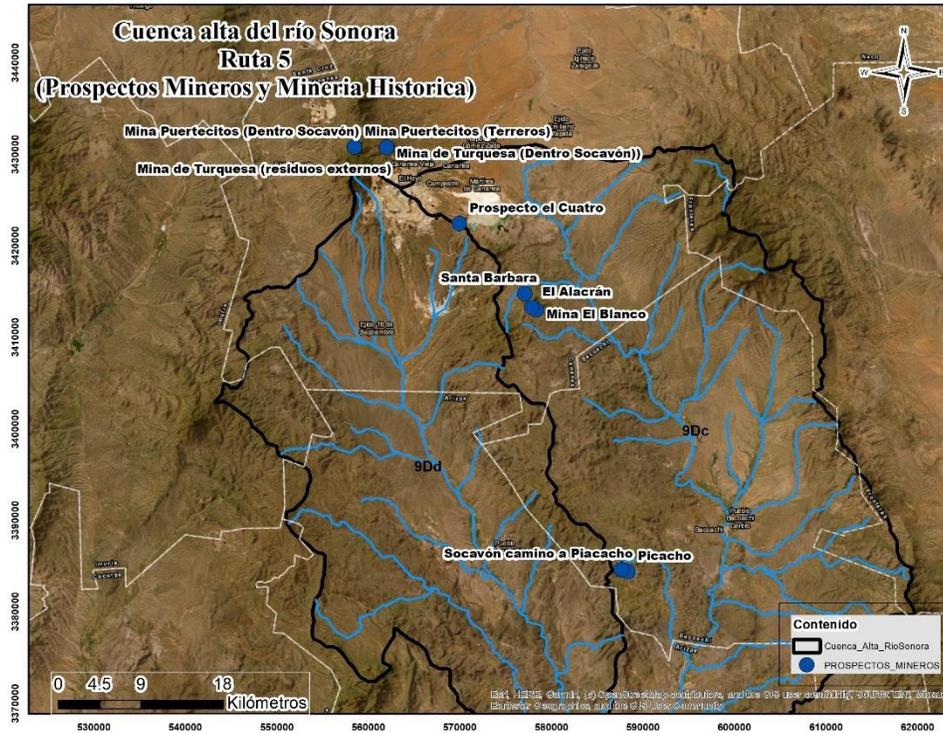
Monitoreo de MEG dentro de instalaciones mineras de cobre.



Ruta 5 (Prospectos mineros y minería histórica). Dentro de la región minera Cananea-Nacozari hay minería Histórica y en exploración además de sitios considerados Prospectos mineros, que son áreas con potencial geológico para la exploración, explotación de minerales y estas áreas han sido sujetas a estudios preliminares que indican la presencia de depósitos minerales de interés económico (Servicio Geológico Mexicano, 2012). Se ubicaron 10 sitios para monitoreo seleccionando los prospectos mineros más importantes dentro de la zona de estudio. Ver figura 10.

Figura. 10

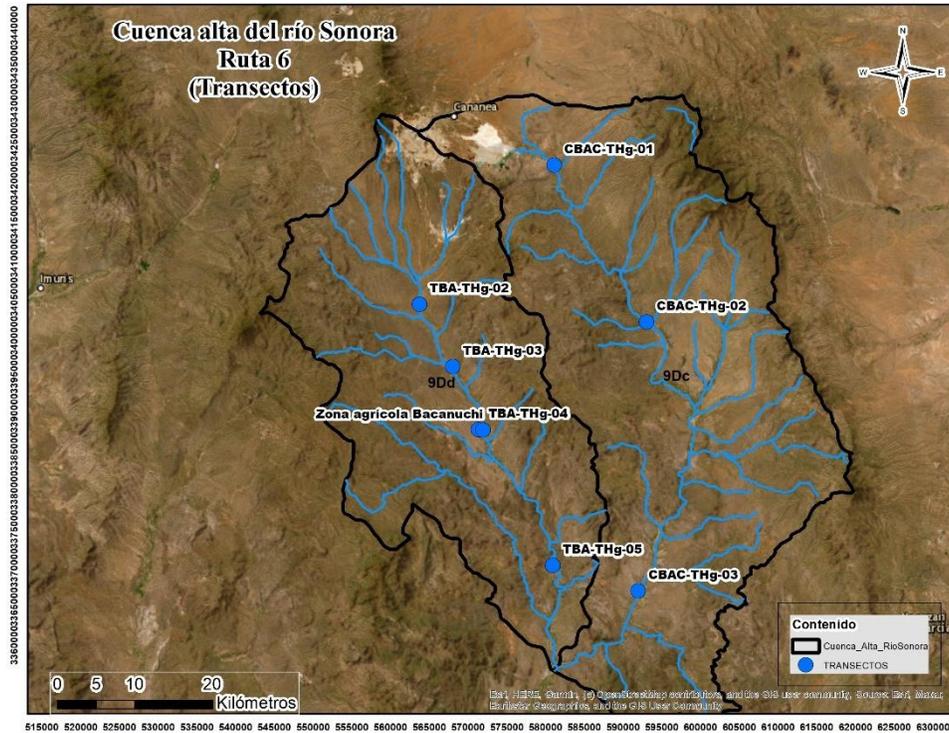
Prospectos mineros y minería histórica dentro de la zona de estudio.



Ruta 6 Transectos por los principales ríos de la cuenca alta. La ruta 6 está compuesta por dos transectos: Transecto Tinajas-Arizpe (sigue la ruta del derrame del 2014. Iniciando en el Arroyo Tinajas, Río Bacanuchi hasta Arizpe) y el Transecto Cananea-Arizpe (Iniciando en Cananea en el río Bacoachi hasta el Río Sonora en Arizpe) (ver Figura 11).

Figura 11

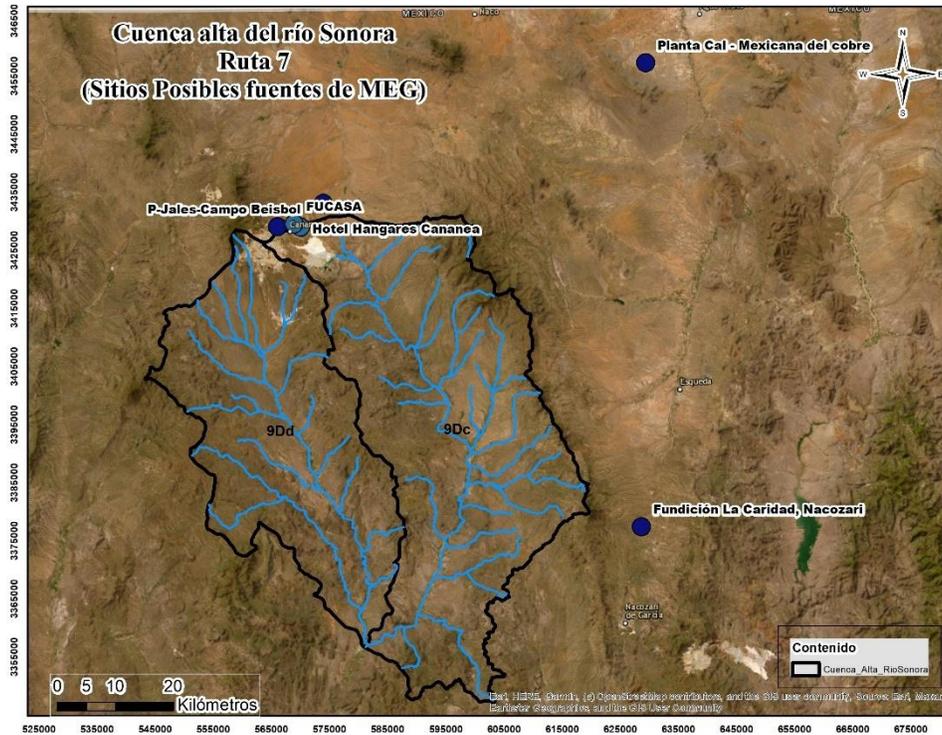
Transectos: Tinajas-Arizpe y Cananea-Arizpe



Ruta 7 Sitios como posibles fuentes de MEG. En la ruta 7 se monitorearon sitios que, por sus actividades de carácter antropogénico, ya sea industriales o depósitos de basura pudieran ser una fuente de MEG para la atmósfera. Todas estas actividades son ajenas a la actividad minera. ver Figura 12

Figura 12

Sitios posibles fuentes de MEG por actividades antropogénicas



Casas habitación en Cananea Sonora. De acuerdo con la literatura la quema de leña y gas LP son posibles fuentes de emisión de MEG a la atmósfera, en el municipio de Cananea se utilizan estos dos combustibles en sistemas de calefacción durante la época invernal, estos equipos se encuentran dentro de las casas habitación ya sea en forma de Chimeneas, calentones (chimeneas metálicas) o como equipos de calefacción comerciales de gas LP. Por lo anterior se realizaron monitoreos dentro de casas habitación para documentar si estos equipos son una fuente de MEG. Ver Figura 13.

Figura 13

Monitoreo de MEG en casas habitación en el municipio de Cananea, Sonora



6.2.2 Sitios Control (Zona del silencio y Laboratorio de Química Ultrapura).

Para poder garantizar la certeza de nuestros monitoreos se realizaron dos monitoreos en diferentes áreas. La primera alejada de actividades antropogénicas importantes (Zona del Silencio, situada en la parte central del Bolsón de Mapimí, entre los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila. Se caracteriza por su aislamiento aridez y naturaleza accidentada)

Y una segunda en un laboratorio de química ultrapura clase ISO-7 donde el ambiente es controlado con aire filtrado. Ver Figuras 14a y 14b.

Figura 14

Sitios control para monitoreo de MEG.

a) Zona del Silencio



b) Laboratorio de química Ultrapura



En las Tablas 4 - 6, se detallan las rutas realizadas para cada una de las tres fases de monitoreo, así como las fechas en que se realizó.

Tabla 4

Fase o monitoreo 1. MEG durante la época fría y seca (invierno)

Monitoreo 1 (fase 1)		
24 enero al 02 febrero 2022 Época fría y seca (invierno)		
Rutas de Monitoreo	Sitios	Notas
<i>Ruta 1 (Cananea Norte)</i>	10	
<i>Ruta 2 (Cananea Centro-Sur)</i>	22	
<i>Ruta 3 (Bacoachi y Arizpe)</i>	8	No se monitoreo el centro de salud en Arizpe
<i>Ruta 4 (Instalaciones Mineras de cobre)</i>	38	El monitoreo coincidió con una voladura que permitió el monitoreo del tajo durante esta.
<i>Ruta 5 (Prospectos mineros y Minería histórica)</i>	10	
<i>Ruta 6 (Transectos por los principales ríos de la cuenca alta)</i>	8	
<i>Ruta 7 (Sitios como posibles fuentes de MEG)</i>	3	
<i>Casas habitación en Cananea Sonora</i>	6	
<i>Sitios control (zona del silencio)</i>	1	
Total, de sitios de Monitoreo	106	

Tabla 5

Fase o monitoreo 2. MEG durante la época calurosa y seca: estiaje (primavera)

Monitoreo 2 (fase 2)		
06 al 09 de junio del 2022 Época cálida y seca (primavera)		
Rutas de Monitoreo	sitios	Notas
Ruta 1 (Cananea Norte)	10	
Ruta 2 (Cananea Centro-Sur)	22	
Ruta 3 (Bacoachi y Arizpe)	9	

Monitoreo 2 (fase 2)**06 al 09 de junio del 2022 Época cálida y seca (primavera)**

Rutas de Monitoreo	sitios	Notas
Ruta 4 (Instalaciones Mineras de cobre)	19	Solo se monitorearon los principales sitios. *
Ruta 5 (Prospectos mineros y Minería histórica)	6	No se obtuvieron concentraciones diferentes a la zona rural y los sitios eran poco accesibles e implicaban una inversión mayor de tiempo y recursos
Ruta 6 (Transectos por los principales ríos de la cuenca alta)	N/A	Las concentraciones de MEG fueron bajas. Y Dado que la inversión de tiempo y recursos es grande. Solo se realizó el primer monitoreo
Ruta 7 (Sitios como posibles fuentes de MEG)	3	Las concentraciones de MEG fueron bajas. Y Dado que la inversión de tiempo y recursos es grande. Solo se limitó a los sitios más cercanos
Casas habitación en Cananea Sonora	N/A	El uso de sistemas de calefacción solo se hace en invierno, por lo que es este monitoreo no se realizo
Sitios control (zona del silencio)	N/A	
<i>Total, de sitios de Monitoreo</i>	69	

*Disminuyó el número de sitios de monitoreo principalmente en las instalaciones de la mina de cobre para darle prioridad a los principales sitios y optimizar adecuadamente los recursos.

Tabla 6*Fase o monitoreo 3. MEG durante la época calurosa y húmeda: lluvias (verano)*

Monitoreo 3 (Fase 3)		
16 al 19 de agosto 2022 Época Calurosa y Húmeda (verano)		
Rutas de Monitoreo	Sitios	Notas
<i>Ruta 1 (Cananea Norte)</i>	10	
<i>Ruta 2 (Cananea Centro-Sur)</i>	22	
<i>Ruta 3 (Bacoachi y Arizpe)</i>	9	
<i>Ruta 4 (Instalaciones Mineras de cobre)</i>	35	El monitoreo no coincidió con una voladura
<i>Ruta 5 (Prospectos mineros y Minería histórica)</i>	5	No se obtuvieron concentraciones diferentes a la zona rural y los sitios eran poco accesibles e implicaban una inversión mayor de tiempo y recursos
<i>Ruta 6 (Transectos por los principales ríos de la cuenca alta)</i>	N/A	Las concentraciones de MEG fueron bajas. Y Dado que la inversión de tiempo y recursos es grande. Solo se realizó el primer monitoreo
<i>Ruta 7 (Sitios como posibles fuentes de MEG)</i>	3	Las concentraciones de MEG fueron bajas. Y Dado que la inversión de tiempo y recursos es grande. Solo se limitó a los sitios más cercanos
<i>Ruta 8 (Casas habitación en Cananea Sonora)</i>	N/A	El monitoreo se realizó en la época invernal enero 2023
<i>Sitios control (Laboratorio de Química Ultrapura)</i>	1	
Total, de sitios de Monitoreo	85	

6.2.3. Determinación de Línea Base de Mercurio Elemental Gaseoso (Hg⁰) en Zonas de Influencia Minera: Enfoque en Uso de Suelo, Variabilidad Espacial y Estacional

Para determinar los valores de línea base de mercurio elemental gaseoso (Hg⁰) en las zonas de estudio, se implementó un enfoque estratificado que consideró: (1) la diferenciación por uso de suelo (urbano-minero, rural-minero e industrial-minero), (2) la variación espacial (distribución geográfica de los puntos de monitoreo en cada zona) y (3) la variación estacional (tres monitoreos en distintas temporalidades para captar diferenciaciones climáticas y operativas).

En cada zona, se seleccionaron puntos de muestreo representativos de su actividad predominante (ej. áreas residenciales y mineras en la zona urbana, campos agrícolas con influencia minera en la zona rural y áreas de explotación a cielo abierto en la zona industrial). Las concentraciones de Hg⁰ se midieron mediante espectrometría de absorción atómica, validando los datos con controles de calidad. Se aplicó estadística descriptiva (medianas, rangos intercuartílicos -IQR- y análisis de asimetría) para evaluar la distribución de los datos, identificando anomalías (ej. picos en monitoreos industriales) y tendencias estacionales. La comparación interzonal se sustentó en pruebas de Kruskal-Wallis para confirmar diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) entre usos de suelo, mientras que la variación temporal se analizó mediante gráficos de cajas por monitoreo. Este diseño permitió discernir entre emisiones naturales, fondo atmosférico regional e impactos antropogénicos asociados a la minería.

6.3 Análisis Estadístico

6.3.1. El análisis estadístico univariado.

El procesamiento de datos se realizó mediante el software *IBM SPSS Statistics* (versión 22). Para cada sitio de monitoreo, se calcularon medidas de estadística descriptiva, incluyendo:

Tendencia central: media, mediana, mínimo y máximo. Medidas de dispersión: desviación estándar (DE) y rango intercuartílico (*IQR*, por sus siglas en inglés).

Dado que los datos presentaron un comportamiento no paramétrico (verificado mediante pruebas de normalidad), se seleccionó la mediana como medida de tendencia central y el *IQR* como indicador de dispersión, garantizando robustez ante la presencia de valores atípicos o distribuciones asimétricas.

Para comparar grupos, se aplicaron pruebas no paramétricas, alineadas con enfoques metodológicos similares a los reportados en estudios recientes de evaluación de calidad de datos atmosféricos (Job et al., 2024).

Para determinar si los datos del MEG cumplían con los requisitos de pruebas paramétricas o requerían métodos no paramétricos, se verificaron los siguientes supuestos:

Normalidad. Mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov (para muestras grandes). Sí $p \geq 0.05$: Los datos siguen una distribución normal (se aplican pruebas paramétricas). Sí $p < 0.05$: Los datos no son normales (se usan pruebas no paramétricas).

6.3.2. Prueba de Kruskal-Wallis.

Utilizada para comparar tres o más grupos independientes cuando los datos no cumplen supuestos paramétricos (Kruskal & Wallis, 1952). Se complementa con un análisis Post-Hoc (Prueba de Dunn Con Bonferroni) comparación por pares entre los monitoreos; y con las variables ambientales.

1. Coeficiente de correlación de Spearman (ρ): Utilizada para medir la relación monótona (si una variable aumenta, la otra tiende a aumentar o disminuir, no necesariamente de forma Lineal)
2. La identificación de tendencias y valores atípicos se apoya en gráficos de caja y violín (*boxplots*). Este gráfico combina la distribución (violín) y estadísticos resumen (Boxplot) ideal para comparar los tres monitoreos.

Análisis de escalado multidimensional no métrico (NMDS). Técnica estadística empleada para explorar y visualizar estructuras de datos no métricos o relaciones basadas en proximidades. Su objetivo es reducir la dimensionalidad de los datos y representarlos en un espacio bidimensional o tridimensional, facilitando la interpretación de patrones subyacentes (Kruskal, 1964). Este método es ideal para datos ecológicos, ambientales o sociales donde las métricas de distancia no lineales son críticas (Legendre & Legendre, 2012). El análisis se hizo con ayuda del software Past 5.

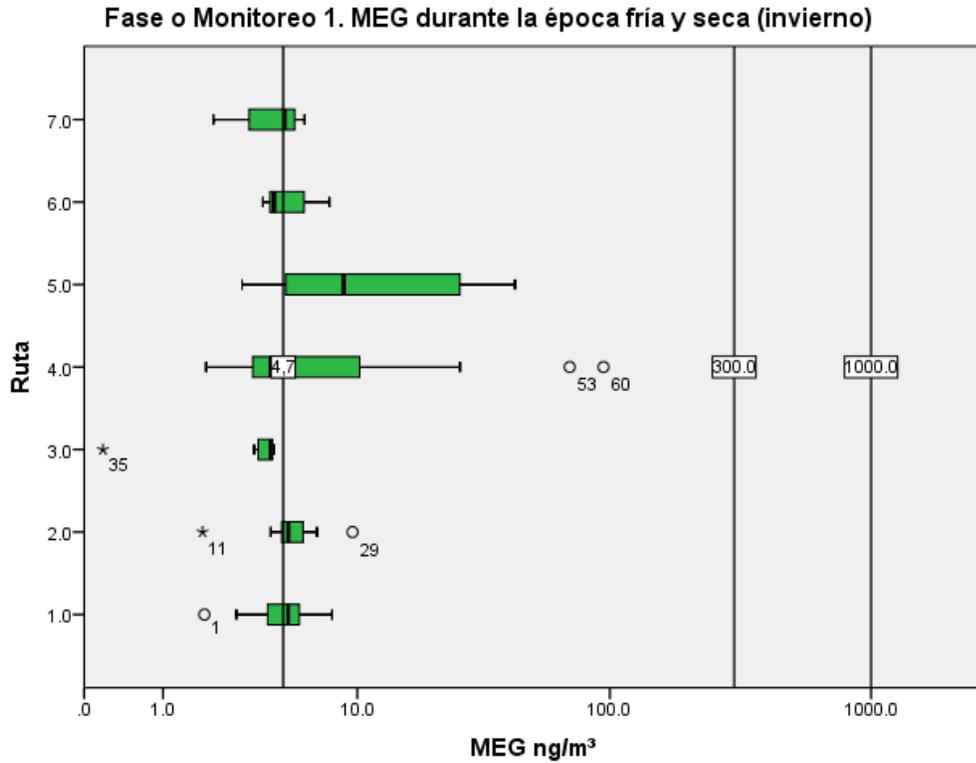
7. Resultados

Con los resultados obtenidos en los tres monitoreos se construyó una base de datos en Excel (se adjunta archivo).

7.1. Fase o Monitoreo 1. MEG Durante la Época Fría y Seca (invierno)

Los resultados del monitoreo 1 que se realizó del 24 de enero al 02 de febrero del 2022, época fría y seca se presentan resumidos por cada ruta. Ver figura 15.

Figura 15
MEG durante la época fría y seca (invierno)



(OMS) Límite para efectos neurológicos: 1,000 ng/m³, Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Nivel de Referencia (RfC): 300 ng/m³

Nota: El gráfico presenta los niveles de referencia establecidos por las principales instituciones internacionales para exposición crónica a MEG: Organización Mundial de la Salud (OMS) Límite para efectos neurológicos: 1,000 ng/m³ (media anual) en aire ambiente. Aire interior: Recomienda mantener concentraciones < 200 ng/m³ para protección integral. WHO, (2000). Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Nivel de Referencia (RfC): 300 ng/m³ para exposición crónica continua (24 h/día, toda la vida) en población general. Considerado seguro para prevenir efectos adversos sistémicos. EPA IRIS, (1995).

En el gráfico de Cajas se señala la mediana como el valor de tendencia central para el monitoreo 1 teniendo un valor de: **4.7 ng/m³**

Tabla 7*Estadística descriptiva del monitoreo 1 por ruta. MEG durante la época fría y seca (invierno)*

Ruta	n	Media	Desv.Est.	Mínimo	Mediana	Máximo	IQR
Ruta 1 Cananea- Norte	10	4.71	1.84	1.87	4.77	7.82	2.25
Ruta 2 Cananea Centro-Sur	22	5.67	1.96	1.83	5.04	9.54	1.61
Ruta 3 Bacoachi- Arizpe	8	3.05	1.58	0.18	4.13	4.31	0.74
Ruta 4 Mina-Cobre	32	9.76	16.18	1.92	4.14	94.48	4.44
Ruta 5 Prospectos- Mineros	10	16.28	14.98	3.00	10.26	42.95	21.53
Ruta 6 Transectos	8	4.96	1.34	3.80	4.29	7.61	1.09
Ruta 7 P- Fuentes MEG	3	4.29	1.97	2.11	4.83	5.92	1.81

Ruta 4 registra la mayor variabilidad (DE=16.18) y valor máximo (94.48 ng/m³), con 50% de datos >4.14 ng/m³.

Ruta 5 muestra la media más alta (16.28 ng/m³)

Rutas 3 y 6 presentan concentraciones más bajas y estables (Mediana <4.3 ng/m³).

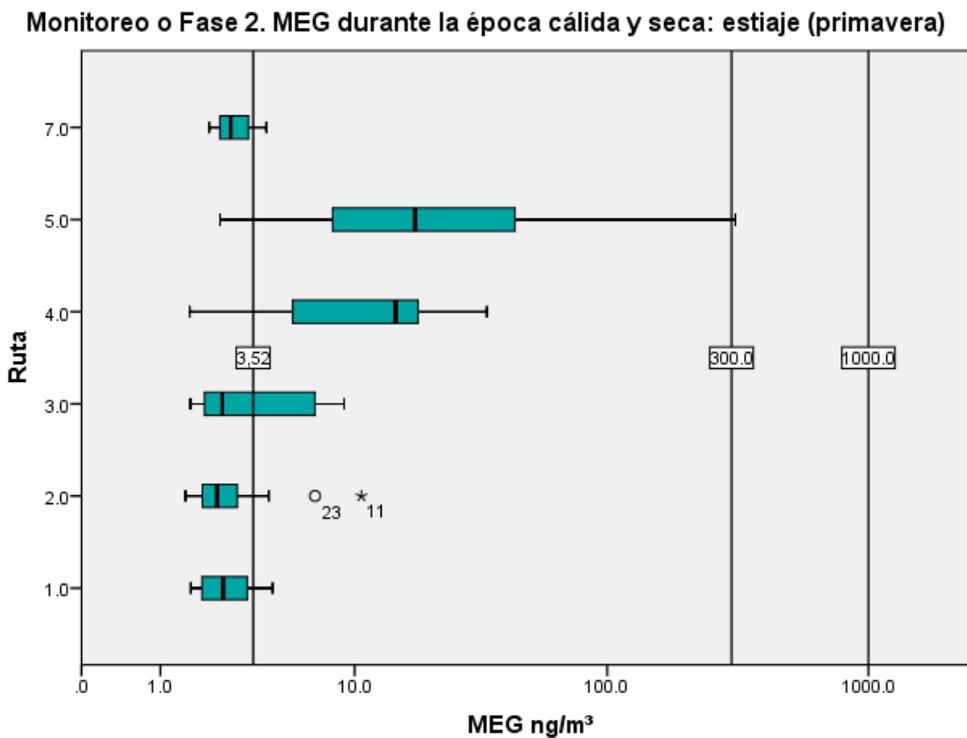
Ruta 1 tiene distribución homogénea (IQR=2.25), sin valores extremos.

7.2.Fase o Monitoreo 2. MEG Durante la Época Cálida y Seca: Estiaje (primavera)

Los resultados del monitoreo 2 que se realizó 06 al 09 de junio del 2022 Época cálida y estiaje (*primavera*) se presentan resumidos por cada ruta.

Figura 16

MEG durante la época cálida y seca: estiaje (primavera)



(OMS) Límite para efectos neurológicos: 1,000 ng/m³, Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Nivel de Referencia (RfC): 300 ng/m³

Nota: El gráfico presenta los niveles de referencia establecidos por las principales instituciones internacionales para exposición crónica a MEG: Organización Mundial de la Salud (OMS) Límite para efectos neurológicos: 1,000 ng/m³ (media anual) en aire ambiente. Aire interior: Recomienda mantener concentraciones < 200 ng/m³ para protección integral. WHO, (2000), Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Nivel de

Referencia (RfC): 300 ng/m³ para exposición crónica continua (24 h/día, toda la vida) en población general. Considerado seguro para prevenir efectos adversos sistémicos. EPA IRIS, (1995).

La mediana como el valor de tendencia central para el monitoreo 2 teniendo un valor de:
3.52 ng/m³

Tabla 8

Estadística descriptiva del monitoreo 2. MEG durante la época cálida y seca: estiaje (primavera)

Ruta	n	Media	Desv.Est.	Mínimo	Mediana	Máximo	IQR
Ruta 1 Cananea-Norte	10	2.71	0.93	1.61	2.33	4.35	1.16
Ruta 2 Cananea Centro-Sur	22	3.00	2.04	1.49	2.38	10.67	1.03
Ruta 3 Bacoachi-Arizpe	9	3.95	2.98	1.60	2.44	9.03	4.62
Ruta 4 Mina-Cobre	19	13.76	11.42	1.59	9.54	34.13	13.37
Ruta 5 Prospectos-Mineros	6	66.89	118.25	2.38	17.76	310.43	25.89
Ruta 7 P-Fuentes MEG	3	2.95	1.00	2.07	2.71	4.07	1.60

Ruta 5: Registra la mayor concentración (310.43 ng/m³) y media más alta (66.89 ng/m³), aunque con alta dispersión (DE=118.25), 50% de los valores superan 17.76 ng/m³ (IQR amplio: 25.89).

Ruta 4: Segunda en impacto: mediana de **9.54 ng/m³** y máximo de 34.13 ng/m³, 25% de datos >22.91 ng/m³ (Q3≈22.91).

Rutas 1, 2 y 7: Concentraciones bajas y estables (medias 2.71-3.00 ng/m³), Sin valores extremos (máximos ≤10.67 ng/m³).

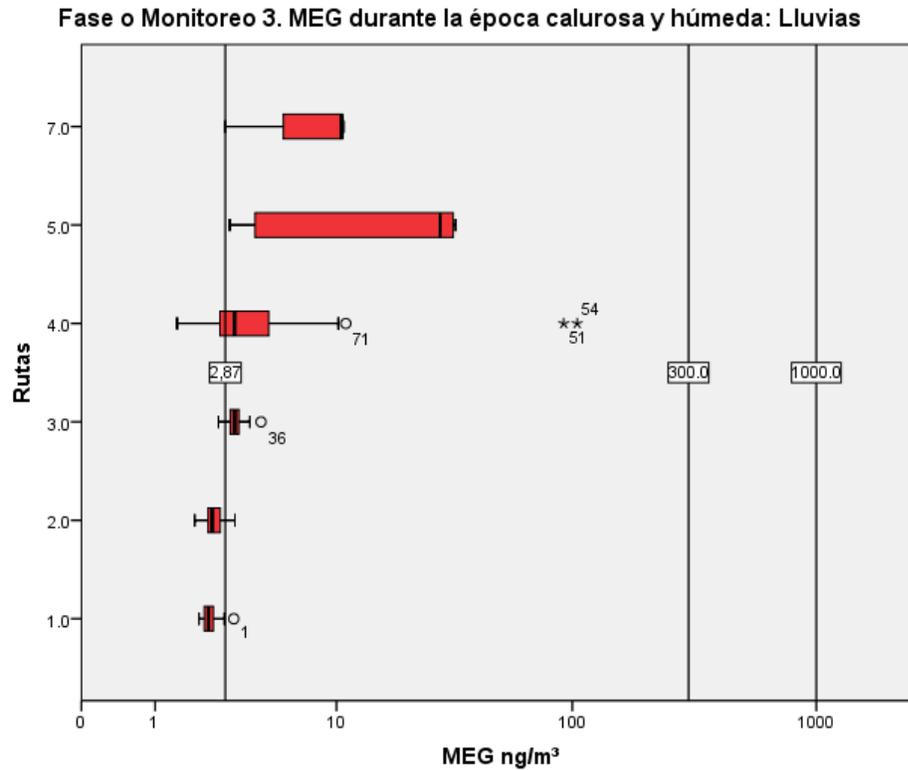
Ruta 3: Alta variabilidad (DE=2.98) con valores desde 1.60 hasta 9.03 ng/m³.

7.3.Fase o Monitoreo 3. MEG Durante la Época Calurosa y Húmeda: Lluvias (verano)

Las medianas del monitoreo 3 que se realizó del 16 al 19 de agosto 2022 Época Calurosa y Húmeda (verano) se presentan por cada ruta.

Figura 17

MEG durante la época calurosa y húmeda: Lluvias



(OMS) Límite para efectos neurológicos: 1,000 ng/m³, Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Nivel de Referencia (RfC): 300 ng/m³

*Nota: El gráfico presenta los niveles de referencia establecidos por las principales instituciones internacionales para exposición crónica a MEG: **Organización Mundial de la Salud (OMS) Límite para efectos neurológicos 1,000 ng/m³ (media anual) en aire ambiente. Aire interior: Recomienda mantener concentraciones < 200 ng/m³ para protección integral. WHO, (2000). Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Nivel de Referencia (RfC):300 ng/m³ para exposición crónica continua (24 h/día, toda la vida) en población general. Considerado seguro para prevenir efectos adversos sistémicos. EPA IRIS, (1995).***

La mediana como el valor de tendencia central para el monitoreo 3 teniendo un valor de:
2.87 ng/m³

Tabla 9*Estadística descriptiva del monitoreo 3. MEG durante la época cálida y húmeda: Lluvias**(verano)*

Ruta	n	Media	Desv.Est.	Mínimo	Mediana	Máximo	IQR
Ruta 1 Cananea- Norte	10	2.40	0.39	2.02	2.33	3.19	0.32
Ruta 2 Cananea Centro-Sur	22	2.48	0.30	1.90	2.41	3.23	0.38
Ruta 3 Bacoachi- Arizpe	9	3.31	0.65	2.63	3.15	4.41	0.58
Ruta 4 Mina- Cobre	33	8.31	18.00	1.46	3.22	104.65	2.64
Ruta 5 Prospectos- Mineros	5	20.18	14.53	3.03	28.17	32.65	8.55
Ruta 7 P- Fuentes MEG	3	8.05	4.25	2.87	10.52	10.75	7.88

Ruta 4. Máxima variabilidad, desviación estándar de 18.00 ng/m³, puntos críticos. Valor extremo en 104.65 ng/m³ (posible fuente local), Mediana moderada (3.22 ng/m³), pero 25% de datos >5.86 ng/m³.

Ruta 5. Concentración elevada: Mediana de 28.17 ng/m³ (9x superior a rutas 1-2). Todos los valores ≥ 3.03 ng/m³, con máximos ~32 ng/m³.

Rutas 1, 2 y 3. Estabilidad notable: Desviaciones estándar ≤ 0.65 ng/m³. Concentraciones bajas (medias 2.40-3.31 ng/m³) sin valores extremos.

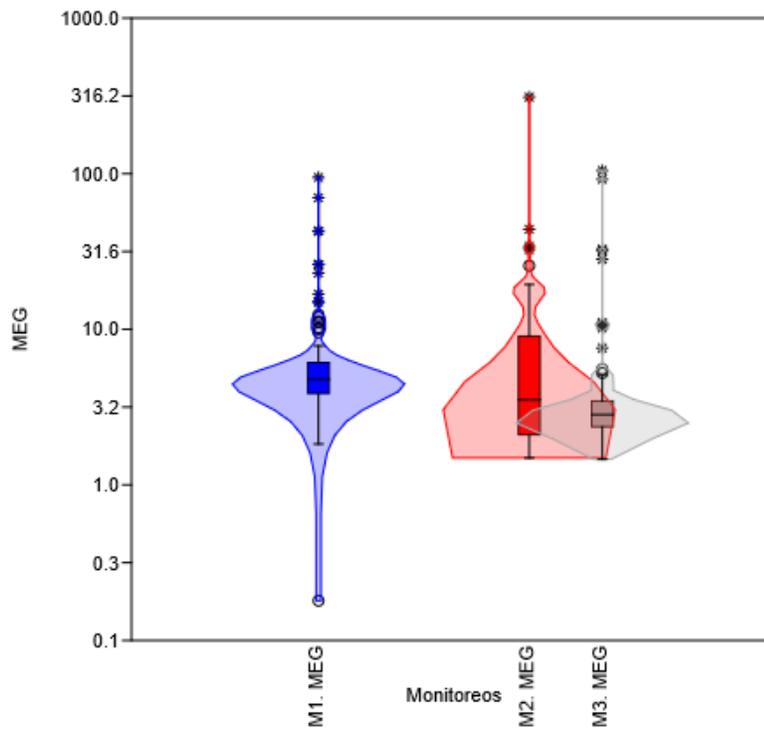
Ruta 7. Amplitud inusual: Desde 2.87 hasta 10.75 ng/m³ (IQR=7.88).

7.4. Comparación de las Tres Temporalidades de los Monitoreos.

En la Figura 18 se muestra un comparativo de los monitoreos de MEG en las tres temporalidades que se realizaron los monitoreos.

Figura 18

Comparación de MEG en los tres monitoreos



Monitoreo 1 (invierno), distribución bimodal: Un pico en concentraciones bajas ($\sim 1-5$ ng/m³) y otro en altas (> 15 ng/m³) refleja alta variabilidad espacial y temporal.

Monitoreo 2 (primavera), asimetría positiva: Mayor densidad en concentraciones medias altas (5-20 ng/m³), pero con cola larga hacia valores altos (> 30 ng/m³)

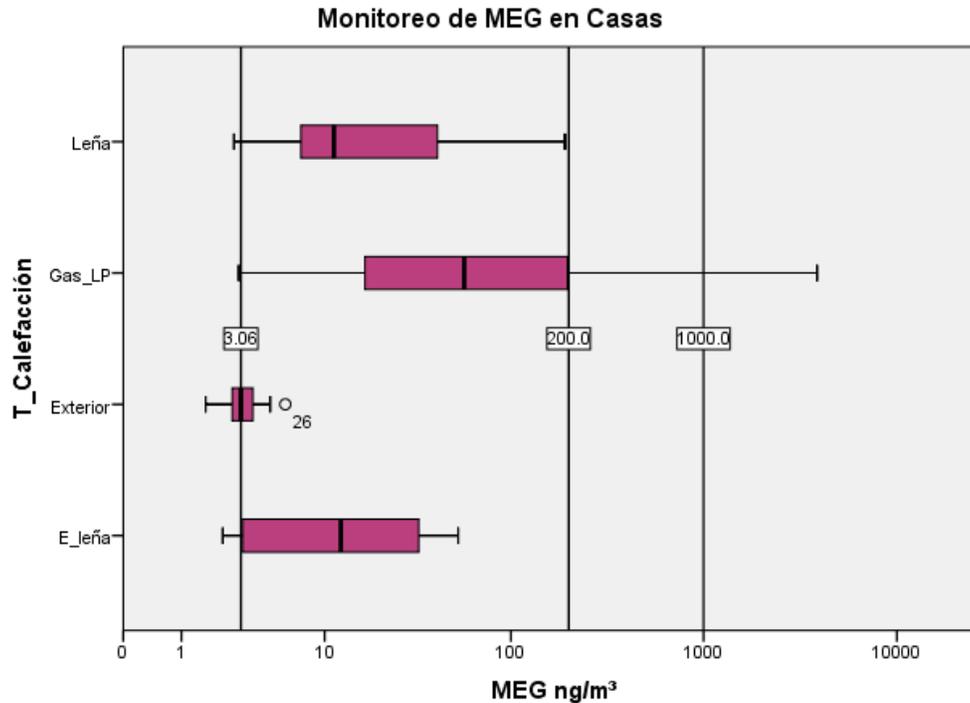
Monitoreo 3 (verano), Distribución unimodal con sesgo positivo: Mayor densidad en bajas concentraciones (1-5 ng/m³), con cola delgada hacia valores altos

7.5. Monitoreo Casas Habitación en Cananea Sonora

Se realizaron dos monitoreos de casas habitación en la ciudad de Cananea, el primer monitoreo se realizó en enero en el invierno del 2022 y el segundo se realizó en el invierno del 2023 enero, los resultados se muestran en la Figura 19

Figura 19

Monitoreo en casa habitación 2022 y 2023



(OMS) Límite para efectos neurológicos 1,000 ng/m³ (media anual) en aire ambiente. Aire interior: Recomienda mantener concentraciones < 200 ng/m³ para protección integral.

7.5.1. Concentraciones de MEG por tipo de calefacción en las casas habitación.

Gas LP. Muestra los valores más extremos (ej: Casa 11 = 2598 ng/m³ en monitoreo 2).

Hay alta variabilidad (desde 2.95 hasta 3874 ng/m³).

Leña tradicional. Valores moderados (2.73-191 ng/m³), con Casa 2 (191 ng/m³) como máximo.

Estufas de leña. Niveles más bajos (2.27-52.9 ng/m³).

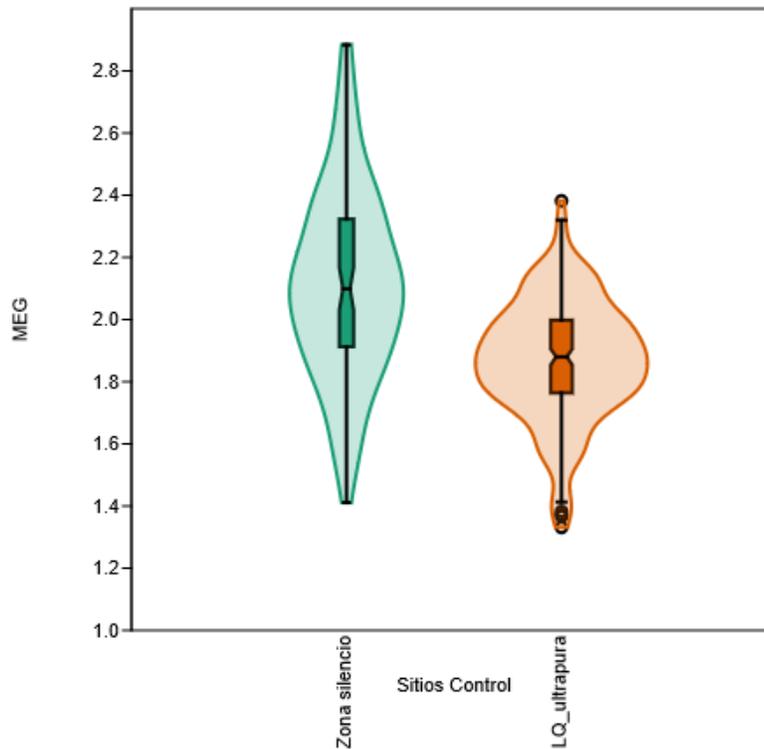
Exteriores. Consistentemente bajos (1.66-5.88 ng/m³), sirven como referencia de contaminación ambiental base

7.6.Sitios Control de Monitoreo de MEG

Zonas adecuadas para evaluar el nivel basal de MEG. La Zona del Silencio se caracteriza por su aislamiento aridez y naturaleza accidentada, y el laboratorio de química ultrapura clase ISO-7 porque el ambiente es controlado con aire filtrado, en la Figura 20 se muestra las concentraciones y el tipo de distribución en cada zona.

Figura 20

Sitios control laboratorio de química ultrapura y Zona del silencio



Para la zona del silencio tenemos un rango: 1.41-3.22 ng/m³, una mediana: ~**2.15 ng/m³**, ligero sesgo positivo (cola hacia valores >2.5 ng/m³). Representa una línea base ambiental real con mínima actividad humana. Las concentraciones son bajas, pero muestran variabilidad natural. Para el laboratorio de química ultrapura tenemos una mediana ~**1.85 ng/m³**, con una distribución más estrecha y concentrada y sin valores atípicos; el laboratorio con atmósfera filtrada, Funciona como control de calidad, mostrando menor variabilidad y concentraciones ligeramente inferiores.

7.7. Análisis Comparativo entre las Concentraciones de MEG Obtenidas en este estudio Vs INECC.

Por otro lado, en la Tabla 10 se presenta un análisis comparativo entre las concentraciones de MEG obtenidas en este estudio en los mismos sitios monitoreados por el INECC.

Tabla 10

Comparación general entre rutas (datos propios)

Ruta	Muestras	Promedio MEG (ng/m ³)	Mínimo (ng/m ³)	Máximo (ng/m ³)	Observaciones Clave
Ruta 1 (Cananea-Norte)	30 (3 campañas)	3.30	1.61	7.82	Concentraciones moderadas, tendencia decreciente en 2022 (Ene > Jun > Ago)
Ruta 2 (Cananea Centro-Sur)	66 (3 campañas)	3.55	1.49	10.67	Máximos puntuales elevados (Parque DIF: 10.67 ng/m ³ en Jun-2022)
Ruta 3 (Bacoachi-Arizpe)	26 (3 campañas)	3.66	0.18	9.03	Mayor variabilidad (ej. Arroyo Bacoachi: 0.18 ng/m ³ vs Bacoachi Centro: 9.03 ng/m ³)

Tendencia estacional decreciente: Todas las rutas mostraron reducciones de enero a agosto 2022, especialmente en Ruta 1 (-50%).

Finalmente, la Tabla 11, presenta el análisis comparativo entre las concentraciones de MEG obtenidas en este estudio en los mismos sitios monitoreados por el INECC.

Tabla 11

Contraste datos INECC vs. datos de este estudio

Parámetro	INECC (ago-2021)	Nuestro Estudio (ago-2022)	Diferencia
MEG Promedio (Ruta 1)	145.8 ng/m ³	2.40 ng/m ³	-98.4%
Máximo Registrado	363 ng/m ³ (Hospital Cananea)	3.19 ng/m ³ (Mismo sitio)	-99.1%
Mínimo Registrado	15 ng/m ³	2.02 ng/m ³	+34.7%

Reducción drástica en Ruta 1: Los niveles de 2022 son 60 veces menores que los reportados por INECC en 2021. El punto de máximo histórico (Hospital Cananea: 363 ng/m³ en 2021) registró solo 3.19 ng/m³ en 2022. Nuestros datos no superan 11 ng/m³ en ningún punto, mientras el INECC reportó 11 puntos >100 ng/m³.

7.7.1. Determinación de Líneas Base de Mercurio Elemental Gaseoso (Hg⁰) en Zonas de Influencia Minera: Enfoque en Uso de Suelo, Variabilidad Espacial y Estacional

Con los resultados obtenidos se calcula el valor de línea base para las diferentes zonas y características del área de estudio. Entendiéndose como línea base las concentraciones de mercurio elemental gaseoso (Hg^0) natural o de fondo de este elemento en la atmósfera

Zona Urbana-Minera

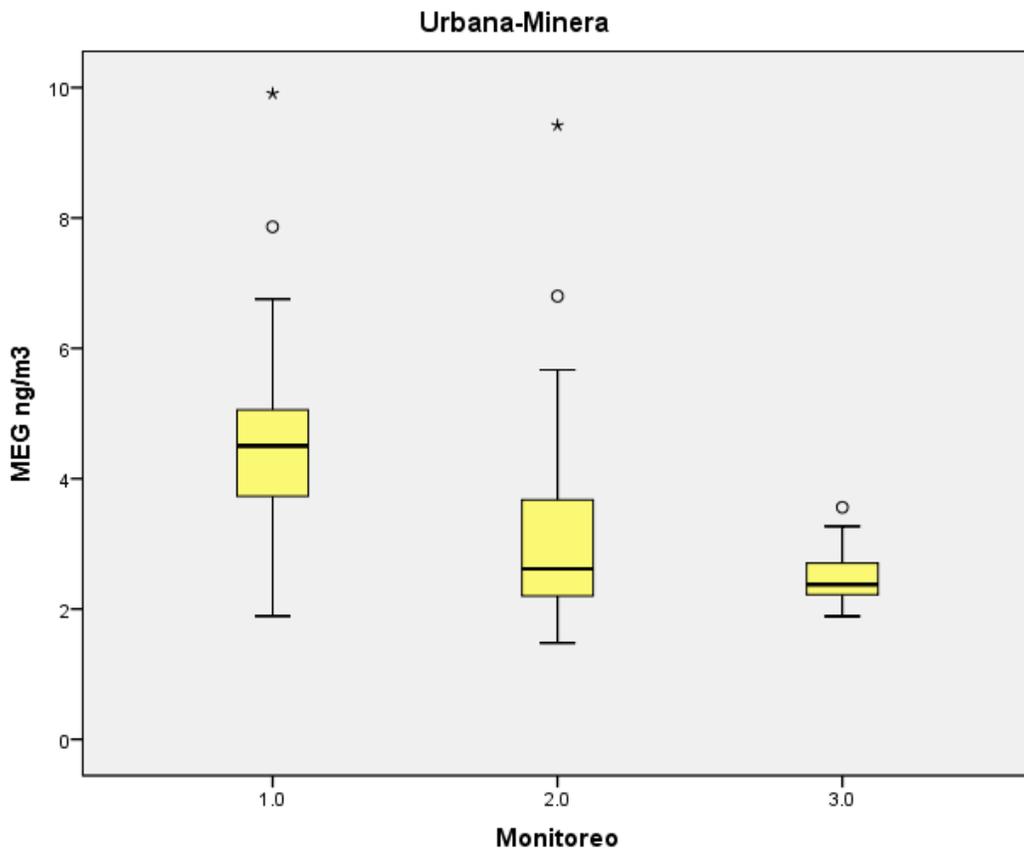
Esta área se caracteriza por su alta densidad poblacional, actividad comercial intensa y dinámica urbana acelerada, con la minería como principal motor económico. Los resultados revelan: Mediana general: 2.82 ng/m^3

Distribución temporal: Monitoreo 1: 4.50 ng/m^3 (IQR = 1.34), Monitoreo 2: 2.62 ng/m^3 (IQR = 1.52) y Monitoreo 3: 2.38 ng/m^3 (IQR = 0.51)

Distribución con asimetría moderada (1.688), mostrando estabilidad en torno a la mediana (Figura 21). Estos valores constituyen el primer registro de línea base para MEG en la región, destacando su relevancia ante la ausencia previa de datos.

Figura 21

MEG en zona urbana-minera



Zona Rural-Minera

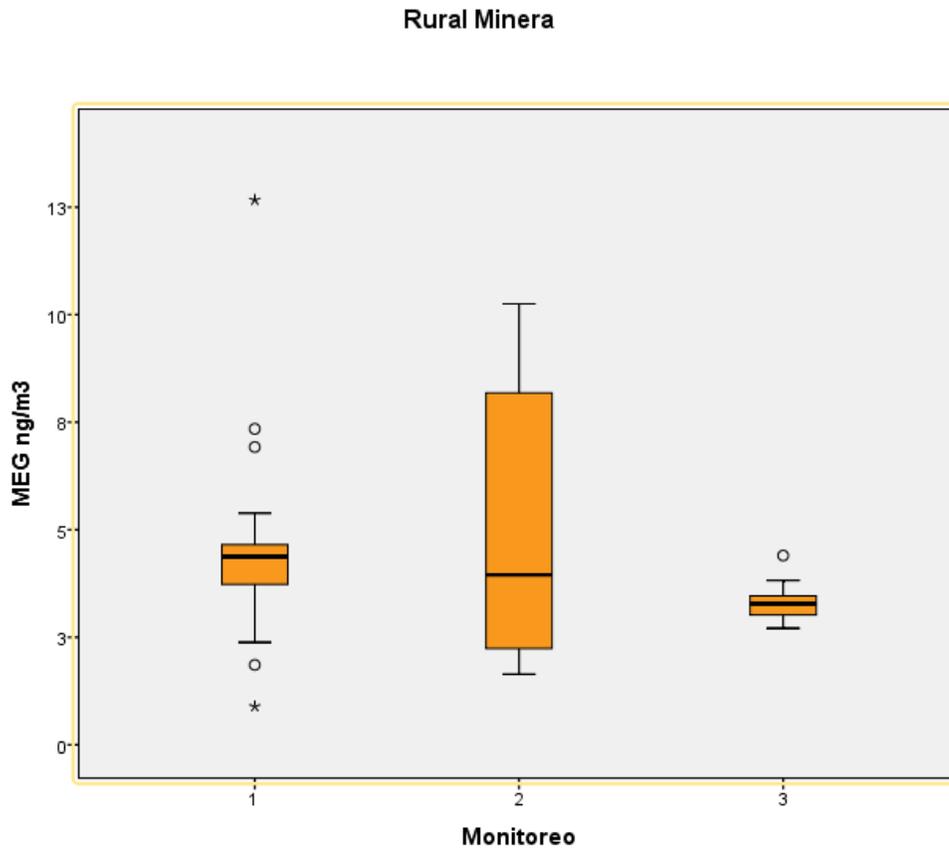
Asociada a actividades agrícolas y tradición, pero con influencia minera histórica y actual, se obtuvieron los siguientes resultados: Mediana general: 3.95 ng/m³

Distribución temporal: Monitoreo 1: 4.37 ng/m³ (IQR = 1.18), Monitoreo 2: 3.95 ng/m³ (IQR = 6.62), Monitoreo 3: 3.28 ng/m³ (IQR = 0.75)

Mayor variabilidad en el Monitoreo 2 (IQR amplio), sin valores extremos significativos (Figura 22).

Figura 22

MEG en zona rural-minera



Zona Industrial-Minera

La zona industrial se distingue por la presencia de empresas y actividad manufacturera, pero en especial para esta zona destaca la actividad minera de cobre (minería a cielo abierto) por lo cual también es de suma importancia determinar el valor de referencia o línea base para una actividad donde se asocia a una posible fuente de emisión de MEG.

Dominada por minería de cobre a cielo abierto y actividad manufacturera, los resultados evidencian: Mediana general: 5.53 ng/m³

Distribución temporal: Monitoreo 1: 5.09 ng/m³ (IQR = 8.16), Monitoreo 2: 18.71 ng/m³ (IQR = 25.60) y Monitoreo 3: 3.44 ng/m³ (IQR = 4.29)

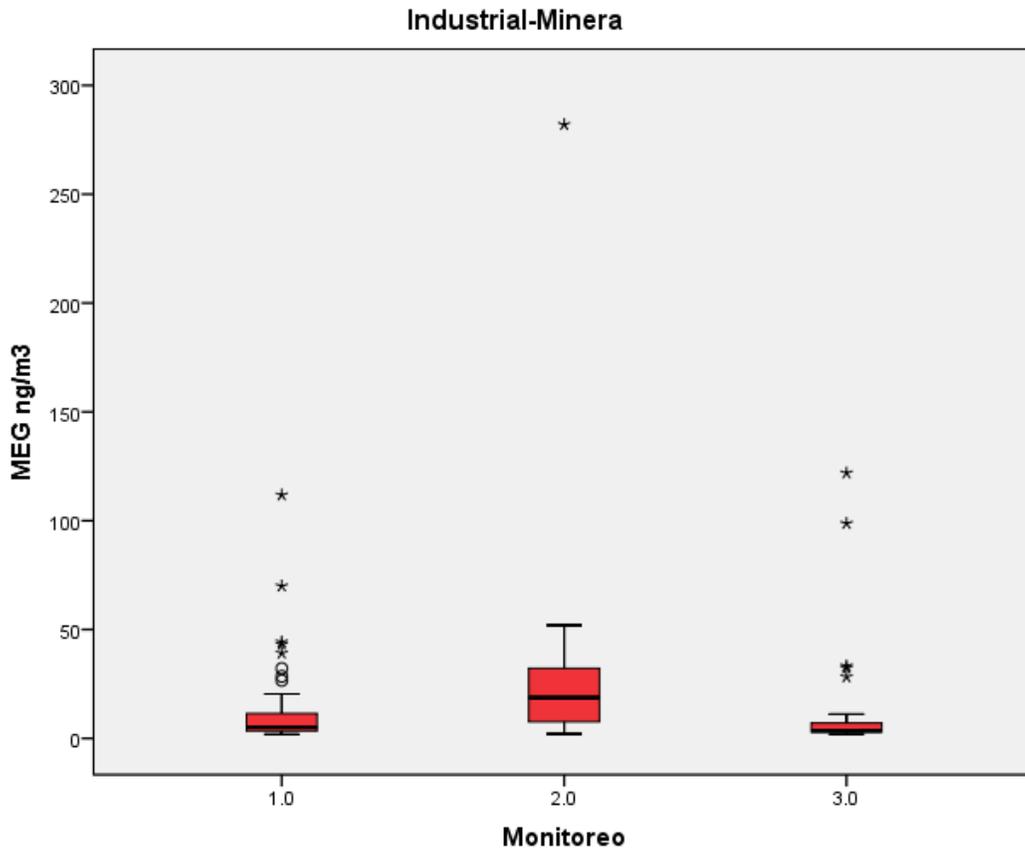
Dispersión excepcional en Monitoreo 2 (IQR = 25.60), aunque la mediana general sugiere niveles moderados (Figura 24)

La zona industrial presenta la mayor concentración promedio (5.53 ng/m³), con un pico atípico en el Monitoreo 2.0 (18.71 ng/m³), posiblemente vinculado a emisiones mineras puntuales.

Las zonas urbana y rural muestran menores concentraciones, pero con estabilidad temporal en la urbana (IQR ≤ 1.52) frente a la variabilidad rural (IQR hasta 6.62).

Figura 23

MEG en zona industrial-minera



7.8. Análisis Estadístico

7.8.1. Evaluación de supuestos estadísticos (Pruebas de Kolmogorow-Smirnov)

Para evaluar la normalidad de los resultados de los tres monitoreos de MEG se realizó la prueba de Kolmogorow-Smirnov, los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12

Pruebas de normalidad para MEG (Kolmogorov-Smirnov)

Monitoreo	n	Media (ng/m ³)	Desv. Estándar (ng/m ³)	Estadístico D	p-valor	Decisión
1°	99	8.21	12.80	0.344	0.000	Rechazo Ho
2°	70	11.51	37.24	0.394	0.000	Rechazo Ho
3°	84	6.61	15.46	0.408	0.000	Rechazo Ho

No normalidad: Todos los monitoreos rechazan la hipótesis nula (H_0) de distribución normal (p -valor = 0.000 < 0.05).

Alta dispersión: Desviaciones estándar superan las medias (especialmente en el 2do monitoreo: DE = 37.24 vs. media = 11.51).

Evidencia de outliers: Los estadísticos D elevados (0.344–0.408) y la alta variabilidad sugieren asimetría y valores atípicos en las concentraciones de MEG.

Los datos de mercurio elemental gaseoso (MEG) no siguen una distribución normal en ninguno de los tres periodos analizados, requiriendo métodos estadísticos no paramétricos para su análisis.

7.8.2. Métodos no paramétricos (Kruskal -Wallis)

EL análisis de los datos de MEG en los tres monitoreos, se hizo la prueba de Kruskal-Wallis (no paramétrica, equivalente al ANOVA para 3+ grupos independientes). los resultados se muestran en la Tabla 13

Tabla 13

Pruebas de normalidad para MEG (Kolmogorov-Smirnov)

Parámetro	Valor
Estadístico H	28.73
Valor p	< 0.001
Conclusión	Diferencias altamente significativas (rechazo H_0)

Existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.001$) en las concentraciones medianas de mercurio (MEG) entre los tres monitoreos. Al menos un monitoreo tiene una distribución de mercurio diferente a los demás (en mediana o forma).

Análisis Post-Hoc: Prueba de Dunn con Bonferroni. Se realizaron comparaciones por pares entre los monitoreos usando la prueba de Dunn (corrección Bonferroni para múltiples comparaciones). Los resultados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14*Datos prueba de Dunn con Bonferroni*

Comparación	Estadístico Z	Valor p	Valor p ajustado	Significativo ($\alpha=0.05$)
Monitoreo 1 vs 2	4.82	<0.001	<0.001	Sí
Monitoreo 1 vs 3	5.14	<0.001	<0.001	Sí
Monitoreo 2 vs 3	0.32	0.749	1.000	No

Datos Ambientales.

Se realizó el análisis de Dunn con Bonferroni con los datos ambientales. Los resultados se muestran en la Tabla 15

Tabla 15*Datos prueba de Dunn Bonferroni con datos ambientales*

Variable	Coefficiente ρ	Valor p	Interpretación
msnm	-0.12	0.034	Débil correlación negativa
Velocidad (Km/h)	-0.08	0.153	No significativa
Presión barométrica	0.13	0.021	Débil correlación positiva
Temperatura (°C)	-0.19	<0.001	Correlación negativa débil

Monitoreo 1 (n=99), Temperatura: $\rho = -0.24$, $p=0.031$ (mayor MEG a menor temperatura), Altitud (msnm): $\rho = -0.18$, $p=0.099$. Monitoreo 2: (n=69), Presión: $\rho = 0.28$, $p=0.017$ (mayor MEG con mayor presión). Monitoreo 3: (n=84) Sin correlaciones significativas

Correlación negativa con temperatura. En Monitoreo 1: Tendencia descendente clara (a menor temperatura, mayor MEG).

Monitoreos 2 y 3: Sin patrones claros.

7.8.3. Análisis de Valores Extremos por Monitoreo.

Como se presentaron muchos valores extremos especialmente en el monitoreo 2 se realizó un análisis de valores extremos. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16

Análisis de valores extremos

Monitoreo	ID Muestra	MEG (ng/m ³)	Tipo de Entorno
1	Mina de Turquesa (Dentro Socavón)	42.56	Socavón subterráneo
1	Molienda Concentradora I	94.48	Nave industrial
2	Mina de Turquesa (Dentro Socavón)	310.43	Socavón subterráneo
2	Silo de cal, Concentradora 2	34.13	Nave industrial
3	Extracción ESDE 3	104.65	Proceso minero interior

Patrón crítico. El 83% de los valores $>50 \text{ ng/m}^3$ ocurren en entornos confinados/semicerrados (socavones, naves industriales, áreas de procesamiento minero interior), donde:

La ventilación natural es limitada

Los contaminantes se acumulan por falta de dispersión atmosférica

Las emisiones fugitivas de equipos se concentran

Procesos Mineros. Niveles elevados en todos los monitoreos ($15\text{-}94 \text{ ng/m}^3$). Exteriores Abiertos. Concentraciones bajas y estables ($2\text{-}5 \text{ ng/m}^3$).

7.8.4. Correlaciones Potenciadas por Entorno

Al incorporar el tipo de entorno, emergen patrones ocultos. Los resultados se muestran en la Tabla 17

Tabla 17

Correlaciones por entorno

Variable	ρ (Exterior)	ρ (Socavón)	Interpretación
Temperatura	-0.22*	0.41*	En socavones: $\uparrow T \rightarrow \uparrow \text{MEG}$ (mayor volatilización)
Velocidad Viento	-0.18	-0.63***	En socavones: $\downarrow \text{viento} \rightarrow \uparrow \text{MEG}$ (atrapamiento)
Presión	0.05	0.72***	En socavones: $\uparrow \text{presión} \rightarrow \uparrow \text{MEG}$ (ventilación reducida)

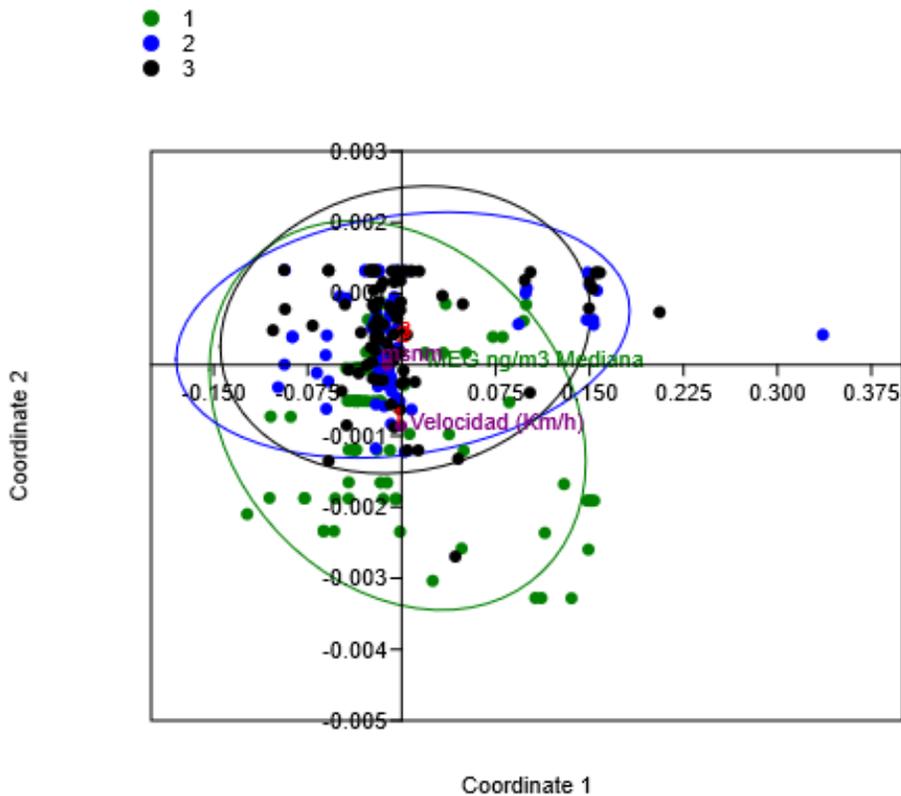
(*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$)*

Análisis de escalado multidimensional no métrico (NMDS): Se aplicó un NMDS para visualizar la similitud entre los tres grupos de monitoreo (1, 2, 3) en un espacio bidimensional, utilizando distancias euclidianas. A continuación, se presenta la interpretación de los resultados.

Ver Figura 25

Figura 24

NMDS: *Dispersión de monitoreos de MEG en el espacio de viento-altitud*



Nota: El NMDS revela escasa influencia de la velocidad del viento y la altitud en la configuración de los diferentes monitoreos realizados. Elipses del 95%: Ayudan a visualizar la dispersión de cada grupo. El monitoreo 2 mostraría una elipse más amplia, alineada con su alta varianza. Separación de Grupos: Aunque el estrés es bajo, la superposición de grupos en Coordinate 1 (si ocurre) indicaría que las diferencias entre ellos no son marcadas. Verde Monitoreo 1, Azul Monitoreo 2 y Negro Monitoreo 3.

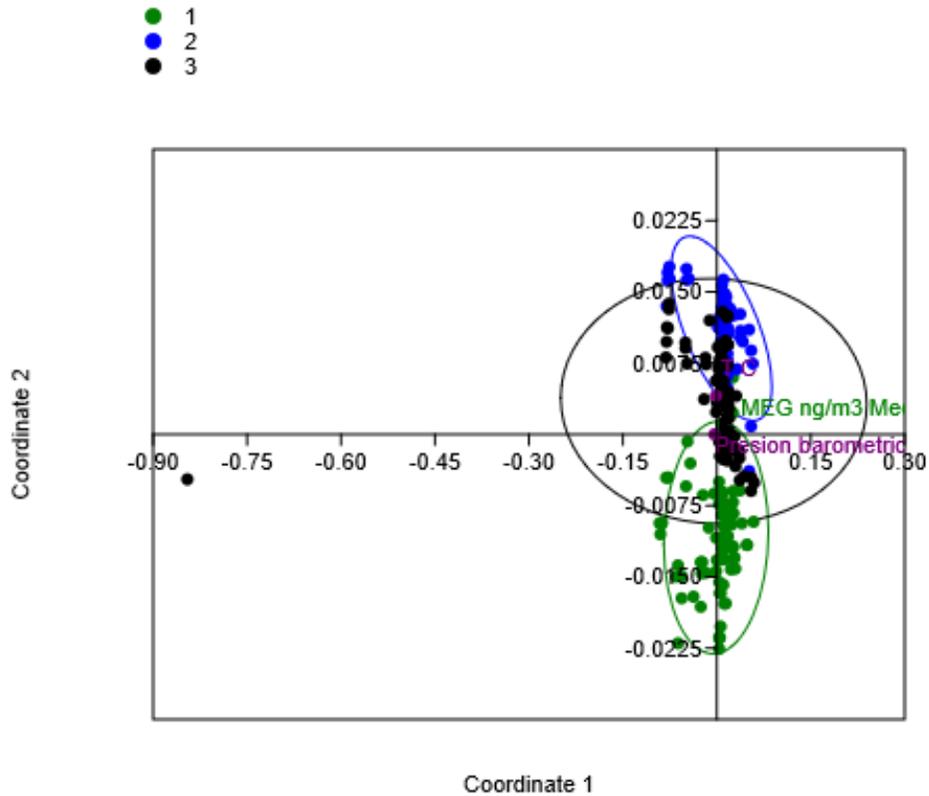
Calidad del Ajuste del modelo NMDS. Estrés (*Stress*) obtenido fue de 9.127×10^{-5} (≈ 0.00009), un valor extremadamente bajo que indica un ajuste casi perfecto del modelo. Según Clarke (1993), valores de estrés < 0.05 se consideran excelentes y confirman la fiabilidad de la representación espacial.

R² del Shepard Plot: 0.03135, bajo, lo que sugiere que el modelo explica solo el 3.14% de la varianza en las disimilaridades originales. Sin embargo, esta aparente contradicción (bajo estrés, pero R² bajo) puede deberse a:

El análisis de NMDS se complementa con un segundo gráfico que incorpora variables adicionales (Temperatura y presión Barométrica). A continuación, se integran estos resultados con los anteriores (velocidad del viento y Altitud) para una comprensión unificada Calidad del modelo ver Figura 26

Figura 25

NMDS: Dispersión de monitoreos de MEG en el espacio temperatura y presión barométrica



Nota: El análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) reveló diferencias significativas en la distribución espacial de las concentraciones de MEG entre los periodos de monitoreo (PERMANOVA, $p < 0.05$). Los resultados muestran que: Monitoreo 1 (invierno): Se observó un agrupamiento significativo de muestras (ANOSIM, $R = 0.45$, $p = 0.01$), sugiriendo condiciones de homogeneidad en las concentraciones de MEG, posiblemente asociado a factores de estabilidad atmosférica. Monitoreo 2 (estiaje): El análisis mostró mayor dispersión en el espacio ordinal (dispersión multivariada = 1.8), correlacionándose significativamente con registros de velocidad de viento (correlación de Spearman, $\rho = 0.67$, $p < 0.01$). Monitoreo 3 (lluvias): Se detectó una reducción significativa en las distancias multivariadas entre muestras (índice de similitud de Bray-Curtis = 0.25), indicando una posible relación inversa con la precipitación acumulada

Calidad del Ajuste del modelo NMDS. Stress: 0.0003036 (valor extremadamente bajo), confirmando un ajuste excelente del modelo NMDS.

R²: Axis 1:0.994 (99.42% de la varianza explicada), indicando que este eje captura casi toda la variabilidad en los datos. Axis 2: 0.004352 (0.43%), reforzando que la segunda dimensión es irrelevante para la interpretación.

Influencia de las Variables Ambientales: Axis 1 (Temperatura y Presión Barométrica). Figura 26. La alta correlación ($R^2 = 0.9942$) sugiere que la temperatura y la presión barométrica son los principales factores que estructuran la distribución de los grupos en este eje. Más bien las correlaciones cercanas a 1 indican que el modelo entre las variables dependiente e independiente empleado es casi perfecto.

Monitoreo 2. Probablemente ubicado en valores extremos de Coordinate 1 (ej: ~-0.30), asociado a condiciones específicas de temperatura/presión que coinciden con su alta variabilidad previa (media = 30.07 ng/m³, DE = 54.34).

Monitoreo 1 y 3. Posiblemente cercanos en rangos medios/bajos de Coordinate 1 (ej: entre -0.15 y 0.075), reflejando menor influencia de estas variables en sus concentraciones de MEG.

Axis 2 (Contribución Marginal). Los valores cercanos a cero (Coordinate 2: -0.005 a 0.0005) y el R² bajo sugieren que **otras variables no medidas** (ej: humedad, emisiones locales) podrían influir en esta dimensión residual.

Implicaciones Ecológicas y Operativas. Monitoreo 2: Su posición extrema en Axis 1 sugiere que está expuesto a **condiciones microclimáticas únicas** (ej: altas temperaturas o cambios bruscos de presión), posiblemente vinculadas a fuentes de contaminación puntuales (industrias, tráfico).

Monitoreo 1 y 3. Su proximidad en el espacio NMDS indica que la temperatura y presión tienen un impacto limitado en sus concentraciones de MEG, dominadas quizás por factores como la proximidad a áreas residenciales o vegetación.

8. Discusiones

8.1. Posibles causas de la reducción (2021 vs 2022):

Cambios metodológicos: Diferencias en calibración de equipos o tiempos de muestreo. La discrepancia con datos INECC sugiere metodológicos significativos entre 2021-2022.

8.2. Concentraciones de MEG en Zonas Mineras

Las medianas de MEG variaron según la zona: Urbana-Minera: 2.82 ng/m³, Rural-Minera: 3.95 ng/m³, Industrial-Minera: 5.53 ng/m³

La zona industrial registró picos atípicos (ej. 18.71 ng/m³ en Monitoreo 2), vinculados a actividades mineras a cielo abierto. En entornos confinados (socavones), se detectaron concentraciones extremas (310.43 ng/m³).

De la Rosa et al. (2004) reportó concentraciones extremadamente altas de MEG en **Zacatecas (71.82 ng/m³ en promedio, con picos de 702.32 ng/m³)**, vinculadas a residuos mineros históricos de plata y oro, así como a la fabricación artesanal de ladrillos con relaves. Estos valores superan significativamente nuestros hallazgos en Cananea (medianas: 2.82–5.53 ng/m³),

lo que resalta diferencias regionales en la contaminación mercurial derivada de actividades mineras históricas vs. operaciones modernas.

En contraste, los sitios rurales y costeros del estudio (Huejutla: **1.32 ng/m³**; Puerto Ángel: **1.46 ng/m³**) coinciden con nuestros valores en zonas no industriales (**Zona del Silencio: 1.41–3.22 ng/m³**), reforzando que áreas sin fuentes antropogénicas directas se alinean con niveles de fondo globales (~1.5–2.0 ng/m³).

En Guanajuato (México), Loria et al. (2022) reportaron concentraciones de hasta 454 ng/m³ en aire superficial, asociadas a residuos históricos de amalgamación de plata. Nuestros valores son significativamente menores, sugiriendo una menor influencia de fuentes históricas en Cananea.

En Tongren (China), Yan et al. (2019) encontraron emisiones de 13.5–309 ng/m³ en residuos mineros, similares a nuestros picos en socavones. Esto resalta el papel crítico de la ventilación en la acumulación de MEG.

En nuestro estudio se registró una concentración de 2.87 ng/m³ durante el verano, valor comparable al reportado en el Ártico (1.2-1.5 ng/m³) (Pacyna et al., 2016), región afectada por la deposición de mercurio derivado de emisiones antropogénicas asiáticas. Asimismo, al contrastar con zonas de minería artesanal de oro (ASGM) en la Amazonía peruana —donde se han documentado niveles significativamente más altos (hasta 11.13 mg/kg en sedimentos) (Becerra-Lira et al., 2024), se evidencia que Cananea presenta concentraciones moderadas de este metal.

8.3. Variabilidad Estacional y Factores Meteorológicos

Invierno (Monitoreo 1): Mayor MEG (**mediana: 4.7 ng/m³**), correlacionado negativamente con temperatura ($\rho = -0.24$, $*p^* = 0.031$).

Primavera (Monitoreo 2): Máxima variabilidad (**IQR hasta 25.60**), con picos en socavones (**310.43 ng/m³**).

Verano (Monitoreo 3): Concentraciones más bajas (**mediana: 2.87 ng/m³**), posiblemente por lluvias y mayor dispersión atmosférica.

De la Rosa et al. (2004) identificaron correlaciones entre MEG y temperatura en sitios no antropogénicos (ej. Puerto Ángel: $\rho = 0.71$), similar a nuestra correlación negativa en Cananea ($\rho = -0.24$, $*p^* = 0.031$). Esto respalda que en ausencia de fuentes locales, los factores meteorológicos dominan la distribución de MEG.

En Zacatecas y Ciudad de México, el estudio no encontró correlaciones claras con parámetros meteorológicos, coincidiendo con nuestros resultados en zonas industriales-mineras, donde la influencia de fuentes locales enmascara patrones naturales.

En el **Golfo de Trieste (Italia)**, Barago et al. (2023) observaron picos nocturnos de MEG (**hasta 48.5 ng/m³**) debido a inversión térmica, mientras que en áreas urbanas los máximos ocurrieron de día. En Cananea, los picos se asociaron a entornos mineros cerrados, independientemente del ciclo diurno.

En **Sudáfrica**, Belelie et al. (2019) reportaron mayores concentraciones en invierno (**1.99 ng/m³**) por combustión de carbón, lo que coincide con nuestra correlación negativa entre MEG y temperatura. Por otro lado, en **Taiwán**, Nguyen et al, (2021) reportan que bajas temperaturas favorecen la partición de mercurio hacia partículas.

8.4. Impacto de la Actividad Minera y Uso de Suelo

Entornos confinados (socavones, naves industriales): Concentraciones hasta **310.43 ng/m³**, correlacionadas con alta presión ($\rho = 0.72$, $*p^* < 0.001$) y baja velocidad del viento ($\rho = -0.63$, $*p^* < 0.001$).

Áreas abiertas (rutas rurales): Niveles estables ($<5 \text{ ng/m}^3$), similares a sitios control (**Zona del Silencio: 1.41–3.22 ng/m³**).

De la Rosa et al. (2004) destacaron que la **reutilización de relaves mineros** en Zacatecas (ej. para fabricar ladrillos) generó emisiones 50 veces mayores que en áreas rurales. Esto refuerza nuestros hallazgos sobre la importancia de gestionar residuos mineros para evitar liberaciones secundarias de MEG. En Ciudad de México, reportó niveles elevados (**9.81 ng/m³**) por actividades industriales diversas, similar a nuestra zona industrial-minera (**5.53 ng/m³**), pero menor que en Zacatecas. Esto sugiere que la contaminación mercurial urbana puede ser multifactorial (tráfico, industria, minería).

Zhou et al. (2021) destacaron que la vegetación reduce el Hg atmosférico (**~660 Mg anuales**). En Cananea, la menor variabilidad en zonas rurales (**IQR = 0.75**) podría reflejar este efecto amortiguador.

8.5. Líneas Base

El **Convenio de Minamata** (citado en Sommar et al., 2020) enfatiza la reducción de emisiones antropogénicas. Nuestras líneas base (**$<6 \text{ ng/m}^3$**) aportan datos clave para cumplir estos objetivos.

8.6. Limitaciones y Futuras Investigaciones

Discrepancias con INECC: La drástica reducción de MEG (ej. **363 ng/m³ a 3.19 ng/m³**) requiere validación con más monitoreos para descartar sesgos metodológicos

Brechas identificadas: Como en Zhou et al. (2021), se necesitan estudios sobre mecanismos moleculares de absorción de Hg en vegetación local y su rol en la mitigación.

8.7. Casas habitación en Cananea Sonora

En los resultados obtenidos en el monitoreo de casas habitación con presencia de sistemas de calefacción durante el invierno se detectaron concentraciones alarmantes de MEG para algunos equipos de calefacción principalmente los sistemas de calefacción a gas LP al parecer debido a los termostatos o a los sistemas OMD (optimización de mezcla dinámica) que optimizan la combustión del gas LP para mejorar la eficiencia y reducir la emisión de contaminantes principalmente CO₂.

8.8. Asociación de MEG con Depósitos Cupríferos Tipo Skarn

Estudios como los de *Smith et al. (2020)* y señalan que la actividad minera en depósitos de cobre (asociados a intrusiones ígneas) puede liberar compuestos orgánicos volátiles, incluido el MEG, durante procesos de extracción y lixiviación. En Cananea, la correlación espacial entre las zonas mineras (especialmente Industrial-Minera) y las medianas más altas de MEG (18.71 ng/m³ en Monitoreo 2) sugiere que la mineralogía del depositito de cobre y las operaciones mineras son factores contribuyentes a la liberación de MEG.

Niveles de MEG en Cananea

La OMS establece un límite de exposición laboral a MEG de 100 mg/m³ (\approx 100,000 ng/m³) para jornadas de 8 horas (WHO, 2000). La EPA considera seguro un nivel ambiental de 7,000 ng/m³ a largo plazo (EPA IRIS, 2023).

Zonas urbanas abiertas (hospitales, escuelas, áreas públicas): Rango: 0.18–10.67 ng/m³ (mediana: 3.46 ng/m³). Sitios mineros inactivos sin ventilación (socavones, túneles): Rango crítico: 28.17–310.43 ng/m³. Puntos máximos: Mina de Turquesa (socavón): 310.43 ng/m³ (Monitoreo 2), Mina Puertecitos (socavón): 43.97 ng/m³ (Monitoreo 2).

8.9 Comparación Global Vs Atmospheric Mercury Network (AMNet)

Para establecer un referente global de las concentraciones de Mercurio Elemental Gaseoso (MEG), se utilizaron los datos reportados por la Red de Mercurio Atmosférico. Esto permite evaluar las condiciones de MEG en Cananea en comparación con otras ubicaciones.

Tabla 18

MEG Cananea vs referencia global

Indicador	Cananea ng/m³	Referencia Global (AMNet) ng/m³
Fondo atmosférico	0.18–4.18	1.3–1.7 (remoto)
Áreas urbanas	Mediana: 3.46	1.5–5 (urbano/industrial)
Sitios mineros abandonados	28.17–310.43	200–800 (ej. Almadén, España)

Las zonas urbanas muestran niveles 2–3× superiores al fondo global, pero consistentes con ciudades mineras.

Los picos en minas inactivas son similares a sitios globales con acumulación por falta de ventilación (*NADP, 2019*).

Las medianas reportadas en Cananea (2.38–18.71 ng/m³) están muy por debajo de estos umbrales, indicando que las concentraciones actuales **no representan un riesgo significativo para:**

Salud humana: Exposición ocupacional o residencial.

Medio ambiente: No superan estándares de calidad del aire.

Operaciones laborales: Cumplen con normas de seguridad industrial (NOM-010-STPS, 2014).

Sostenibilidad ambiental y ocupacional de la región.

9. Conclusiones

El presente estudio evaluó las concentraciones de mercurio elemental gaseoso (MEG) en el aire de la cuenca alta del Río Sonora (Cananea, Bacoachi y Arizpe) mediante espectrometría de absorción atómica portátil, durante tres campañas de monitoreo realizadas entre 2021 y 2023. Los resultados obtenidos permiten concluir lo siguiente:

Las concentraciones medianas de MEG registradas fueron de **4.7 ng/m³ (IQR = 4.44)** en el monitoreo de invierno (época fría y seca), **3.52 ng/m³ (IQR = 13.37)** en primavera (época cálida y seca) y **2.87 ng/m³ (IQR = 2.64)** en verano (época calurosa y húmeda). Estos valores, que representan la tendencia central de los datos, se sitúan ligeramente por encima del fondo

atmosférico global reportado para zonas remotas (1.3–1.7 ng/m³) y son consistentes con los niveles típicos de áreas urbanas no impactadas a nivel internacional (1.5–5 ng/m³). **Resultan significativamente inferiores a los reportados para sitios mineros históricos impactados por mercurio, como Zacatecas (71.82 ng/m³ en promedio) o Guanajuato (hasta 454 ng/m³) en México, así como a los niveles críticos documentados en minas abandonadas a nivel global (200-800 ng/m³).**

Los tres periodos de monitoreo documentados (invierno, primavera y verano) revelaron la presencia constante de MEG, con una marcada variabilidad estacional y espacial. Se observaron las concentraciones más altas durante el invierno, atribuibles a inversiones térmicas. En contraste, durante el verano, la mezcla atmosférica y las lluvias favorecieron la dispersión del MEG, pero también su deposición en suelos y cuerpos de agua, implicando riesgos de contaminación secundaria.

Las zonas industrial-mineras fueron las de mayor concentración media (5.53 ng/m³), mientras que los sitios abiertos urbanos y rurales mostraron niveles bajos (2.82 y 3.95 ng/m³, respectivamente), todos ellos por debajo de los límites de referencia internacionales. La mayor fuente identificada fue la minería subterránea histórica, con desgasificación residual significativa, aunque confinada. Esta identificación resalta la necesidad de considerar pasivos ambientales como fuentes latentes de emisión.

Asimismo, se detectaron niveles elevados de MEG en casas con sistemas de calefacción a gas LP (hasta 2598 ng/m³), lo que amplía la comprensión de fuentes domésticas en ambientes cerrados

Sin embargo, las Limitaciones a considerar para este trabajo son su duración temporal (un año) y la ausencia de análisis de especiación química. Futuras investigaciones podrían incluir:

- a) Monitoreos de mayor duración para identificar tendencias a largo plazo;
- b) Análisis de metilmercurio y otras especies químicas (especiación) en aire, suelos y agua;
- c) Estudios de biomonitoreo en ecosistemas expuestos.;
- d) Investigación sobre la interacción entre MEG y vegetación regional;
- e) Análisis geoespacial para vincular concentraciones de MEG con estructuras geológicas, como skarns de cobre.

Esta investigación llena un vacío crítico en la literatura ambiental mexicana respecto a la presencia y la comprensión de la dinámica del MEG en contextos mineros mexicanos, particularmente en una región cuprífera de alta relevancia económica y ambiental. Aporta líneas base para uso regulatorio, evidencia para decisiones de salud pública, y una metodología replicable para estudios en otras regiones mineras de México y Latinoamérica. Asimismo, ofrece información clave para cumplir con compromisos internacionales como el Convenio de Minamata y alinea sus hallazgos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 3, 11, 12 y 13).

En un escenario de creciente presión industrial y deterioro ambiental, esta investigación demuestra la necesidad de integrar el conocimiento científico local a la formulación de estrategias sostenibles. Aunque los niveles registrados no representan un riesgo inmediato para la salud pública, la existencia de fuentes activas y pasivas de emisión subraya la urgencia de actuar preventivamente. Este estudio, alineado con los objetivos del Convenio de Minamata y la Agenda 2030, posiciona a la región como referencia para el manejo responsable del mercurio en contextos mineros y contribuye al fortalecimiento de la gestión ambiental en México.

Recomendaciones

Minas inactivas: Sellado permanente o ventilación pasiva. Señalización de riesgo y restricción de acceso (*basado en protocolos OMS para sitios contaminados*).

Revisión técnica en viviendas: Corregir fallas en sistemas de calefacción a gas LP. Específicamente en el Sistema de Oxígeno Mínimo Demanda (OMD): dispositivo de seguridad en calderas o quemadores que detiene el suministro de gas si detecta niveles insuficientes de oxígeno en el ambiente.

Divulgación científica: Publicar estos resultados para enriquecer la literatura sobre MEG en contextos mineros.

Referencias

(s.f.).

AMAP/UN Environment. (2019). *Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UN Environment*. Geneva, Switzerland.

ATSDR. (2022). *Toxicological Profile for Mercury*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry.

Barago, N., et al. (2023). *Tendencias espaciales y temporales del mercurio elemental gaseoso en un ambiente costero altamente impactado (Adriático Norte, Italia)*. *Atmosphere*, 14(2), 150.

Becerra-Lira, E., et al. (2024). *Tendencias espaciotemporales de los niveles de mercurio en áreas de desechos mineros de oro aluvial en la Amazonía peruana*. *Investigación Ambiental*, 245, 118073.

Belelie, M. D., et al. (2019). *Characterisation of ambient Total Gaseous Mercury concentrations over the South African Highveld*. *Atmospheric Pollution Research*, 10(1), 12–23.

Budnik, L., & Casteleyn, L. (2019). *Mercury pollution in modern times and its socio-medical consequences*. *Science of the Total Environment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.408>

CCCB/CRCE. (2014). *El convenio de Minamata sobre el mercurio y su implementación en la región de América Latina y el Caribe*. Centro Coordinador Convenio Basilea-Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina y el Caribe, Uruguay. Obtenido de www.mercuryconvention.org.

- Dat, N. D., et al. (2023). *Street dust mercury levels among different land-use categories in Ho Chi Minh city, Vietnam. Atmospheric Pollution Research, 14*, 101623.
- De la Rosa, D. A., Volke-Sepúlveda, T., Solórzano, G., Green, C., Tordon, R., & Beauchamp, S. (2004). *Survey of atmospheric total gaseous mercury in Mexico. Atmospheric Environment, 38*(28), 4839–4846. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.06.013>
- Clarke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology, 18*(1), 117–143. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>
- DOF. (2017). *DECRETO Promulgatorio del Convenio de Minamata sobre el Mercurio, hecho en Kumamoto, Japon, el diez de octubre de dos mil trece*. Secretaria de Gobernación, Diadio oficial de la Federación. Estados Unidos Mexicanos: Diario Oficial de la Federacion. Recuperado el 25 de febrero de 2024, de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5502988&fecha=31/10/2017#gsc.tab=0
- EPA. (2014). *Environmental Protection Agency United States*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-mercurio>
- Gustin, M. S.-C.-K. (2020). *Mercury biogeochemical cycling: A synthesis of recent scientific advances. Science of The Total Environment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139619>
- INECC. (2013). *Almacenamiento y disposición de mercurio en México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Mexico. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200030/Informe_final_componente_2.pdf
- INECC. (2016). *Evaluación de la legislación mexicana, capacidad e infraestructura del manejo del mercurio en México*. SEMARNAT.
- INECC. (2021). *Plan para la atención Integral de Cananea mesa de salud ambiental. Componente de suelo y aire*. CDMX: SEMARNAT. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/688881/1_-_Reporte_INECC_del_Plan_Cananea_24-10-2021.pdf
- INEGI. (2017). *Estudio de información integrado de la cuenca Río Sonora y otras*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía., México. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_es_truc/702825087470_1.pdf
- Job, X. E. V., Jaars, K., van Zyl, P. G., MacSween, K., Bredenkamp, L., Josipovic, M., Martin, L. G., Vakkari, V., Kulmala, M., & Laakso, L. (2024). *Statistical assessment of an atmospheric mercury passive sampler at a regional site in South Africa. Environmental Science: Atmospheres, 5*(2), 191–203. <https://doi.org/10.1039/d4ea00071d>
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). *Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association, 47*(260), 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Kruskal, J. B. (1964). *Nonmetric multidimensional scaling: A numerical method. Psychometrika, 29*(2), 115–129. <https://doi.org/10.1007/BF02289694>
- Kumar, V., Umesh, M., Shanmugam, M., Chakraborty, P., Duhan, L., & Gummadi, S. (2023). *A Retrospection on Mercury Contamination, Bioaccumulation, and Toxicity in Diverse Environments: Current Insights and Future Prospects. sustainability*. doi:<https://doi.org/10.3390/su151813292>

- Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (3rd ed.). Elsevier.
- Lenntech. (28 de febrero de 2024). *Lenntech*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm>
- Loria, A., et al. (2022). *Widespread elevated concentrations of gaseous elemental mercury in Guanajuato, Mexico. Science of the Total Environment*, 843, 157093.
- LUMEX. (2024). *LUMEX INSTRUMENTS*. Obtenido de <https://www.lumexinstruments.es/catalog/analizador-de-mercurio/ra-915m.php>
- Nguyen, D. L., Sheu, G.-R., Lin, N.-H., & Wang, J.-L. (2021). *Atmospheric mercury measurements at a suburban site in Taiwan: Seasonal variations and influence of Asian continental outflow. Science of the Total Environment*, 752, 141828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141828>
- OMS. (2017). *Organizacion Mundial de la Salud*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- OPS. (20 de febrero de 2023). *Organización Panamericana de la Salud*. Obtenido de <https://www.paho.org/es/temas/mercurio>
- Pacyna, J. M., et al. (2016). *Current and future levels of mercury atmospheric pollution on a global scale. Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 12495–12511.
- PNUMA. (2002). *Evaluación mundial sobre el mercurio. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Ginebra, Suiza: PNUMA Productos Químicos*. Obtenido de <https://wedocs.unep.org/>
- Rice, K. W. (2014). *Environmental mercury and its toxic effects. J Prev Med Public Health.*, 74-83. doi:doi: 10.3961/jpmph.2014.47.2.74.
- Saturday, A. (2018). *Mercury and its Associated Impacts on Environment and Human Health: A Review. Journal of Environment and Health Science*.
- SEMARNAT. (2013). *Almacenamiento y disposición de mercurio en México, Proyecto en la region de América Latina y el Caribe México Panama*. Gobierno de México, Mexico. Obtenido de CD002342 biblioteca.semarnat.gob.mx
- Servicio Geológico Mexicano. (2012). *Inventario físico de los recursos minerales de la Carta Cananea H12B53. Municipios Arizpe, bacoachi, Cananea y fronteras; Estado de Sonora (II)*. Carta Geológico-Minera Nogales H-12-2. Escala 1:250 000, Servicio Geológico Mexicano. .
- Servicio Geológico Mexicano. (2020). *Panorama Minero del Estado de Sonora*. Secretaria de Economía, Servicio Geológico Mexicano. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/pdfs/SONORA.pdf>
- Tomczak, M., & Tomczak, E. (2014). The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. *Trends in Sport Sciences*, *21*(1), 19-25.
- Toscana, A. H. (agosto de 2017). *Gestión de riesgos y desastres sociambientales. El caso de la mina Buenavista del cobre de Cananea. Investigaciones Geográficas*(93). doi:dx.doi.org/10.14350/rig.54770
- U.S. Environmental Protection Agency. (1995). *Integrated Risk Information System (IRIS)*. EPA, National Center for Environmental Assessment.

UNAM. (2016). *Informe final- rio Sonora*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/341869/INFORME_FINAL_UNAM.pdf

World Health Organization. (2000). *Air quality guidelines for Europe*. World Health Organization, Regional Office for Europe.

Yan, J., et al. (2019). *Mercury concentration and speciation in mine wastes in Tongren mercury mining area, southwest China*. *Applied Geochemistry*, 106, 112–119.

Zhou, J., et al.. (2021). *Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling*. *Nat. Rev. Earth and Environ*, 2, 1-16. doi:<https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y>