

El mercurio como contaminante: fuentes, vías de exposición y efectos en la salud

BENEDETTO SCHIAVO¹, OFELIA MORTON-BERMEA², DIANA MEZA-FIGUEROA³, THANIA ELIZABETH ARREDONDO-PALACIOS⁴

RESUMEN

El 23 de febrero, con decisión unánime de los gobiernos de 140 países, se conmemora el Día del Compromiso Internacional del Control del Mercurio, en el que se rectificaron los esfuerzos conjuntos de enfrentar la problemática medioambiental a nivel local, regional y global. La contaminación ambiental por mercurio (Hg) es producto de las actividades humanas, principalmente por la extracción artesanal de oro a pequeña escala, así como de las emisiones por fuentes naturales. Las personas expuestas a los vapores de Hg y al metilmercurio (MeHg, forma orgánica del Hg) están sujetas a enfermedades neurológicas, así como a daños severos en riñones. Recientemente, después de varios desastres a nivel mundial a causa de envenenamiento por Hg, el problema ha sido reconocido y tomado en consideración. Este trabajo de divulgación tiene como objetivo mejorar la comprensión del impacto de la contaminación por Hg y ayudar a entender los daños en la salud por exposición.

Palabras clave: Mercurio, Contaminación ambiental, Depositación, Actividad minera, Convenio de Minamata

¹Dr. en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. benedetto@igeofisica.unam.mx, <https://orcid.org/0000-0002-0882-0404>.

²Dra. en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. omorton@igeofisica.unam.mx, <https://orcid.org/0000-0001-8786-3885>.

³Dra. en Ciencias de la Tierra, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, México. diana.meza@unison.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8934-0321>.

⁴Lic. en Ciencias de la Tierra, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. thania.arredondo@atmosfera.unam.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9931-7459>.

Autor de Correspondencia: Benedetto Schiavo, benedetto@igeofisica.unam.mx

Recibido: 13 / 03 / 2023

Aceptado: 05 / 04 / 2024

Publicado: 17 / 05 / 2024

Cómo citar este artículo:

Schiavo, B., Morton-Bermea, O., Meza-Figueroa, D., & Arredondo-Palacios, T. E. (2024). El mercurio como contaminante: fuentes, vías de exposición y efectos en la salud. *EPISTEMUS*, 18(36). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i36.306>

Mercury as a Pollutant: Sources, Routes of Exposure, and Health Effects

ABSTRACT

On February 23, with the unanimous decision of the governments of 140 countries, the Day of the International Commitment to Mercury Control is commemorated, in which joint efforts were rectified to face environmental problems at local, regional, and global levels. Environmental mercury pollution (Hg) is the product of human activities, mainly due to the artisanal small-scale gold mining, as well as to emissions from natural sources. People exposed to Hg vapors and methylmercury (MeHg, organic form of Hg) are subject of neurological diseases, as well as severe kidney damage. Recently, after several worldwide disasters due to Hg poisoning, the problem was formally recognized and taken into consideration. This scientific dissemination work aims to improve the understanding of the impact of Hg pollution and in the awareness of health damage caused by the exposure to Hg vapor and methylmercury.

Key words: Mercury, Environmental pollution, Deposition, Mining activity, Minamata Convention





Introducción

El mercurio (Hg) es un elemento químico con número atómico 80 y forma parte de los metales de transición (Figura 1). Fue el químico Antoine Laurent Lavoisier quien describió por primera vez al Hg como un elemento en sus experimentos sobre la composición del aire.

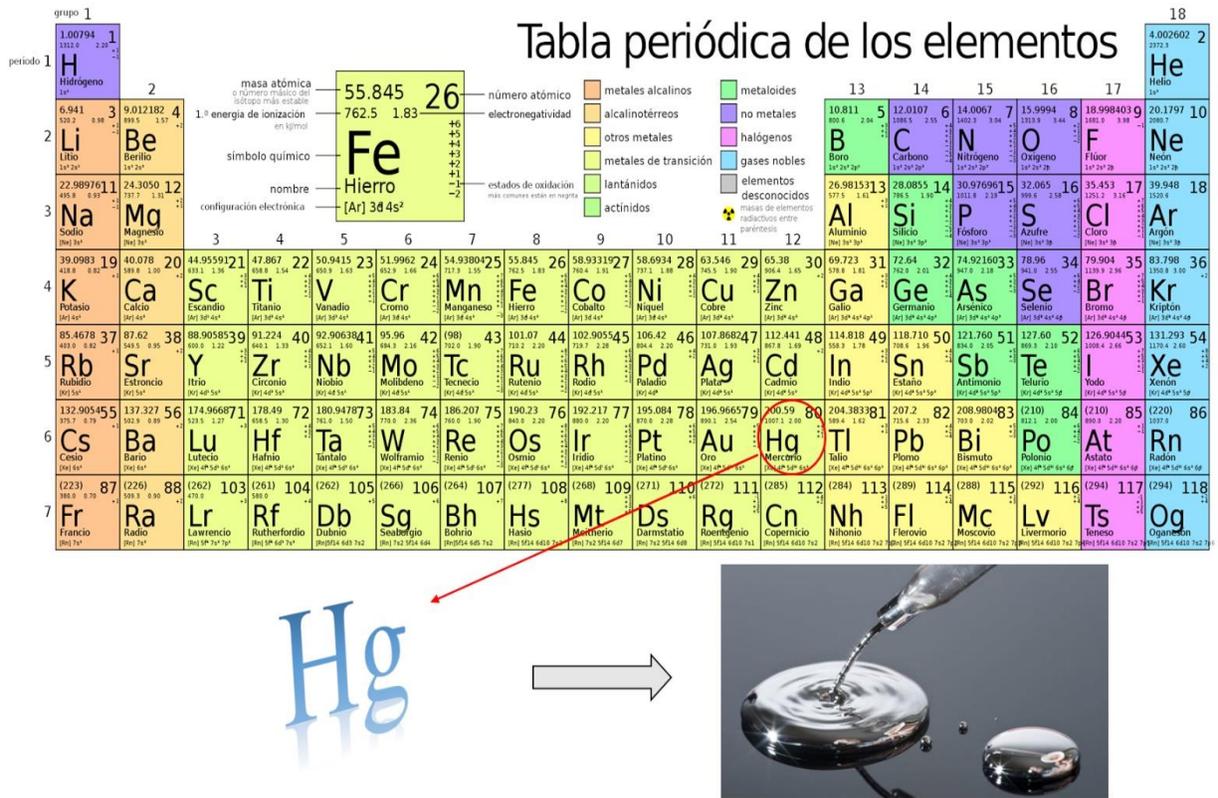


Figura 1: Representación gráfica de la Tabla Periódica de los elementos (Fuente: Wikipedia, <https://es.wikipedia.org/>). El mercurio (Hg) se encuentra en el periodo (fila) 6 y grupo (columna) 12, como parte de los metales de transición. Abajo a la derecha (fuente: Enciclopedia Humanidades, <https://humanidades.com/mercurio-metal/>), una foto de la forma líquida del Hg en condiciones de T (25 °C) y P (1 atm) estándar.



Etimológicamente proviene de la palabra griega *hydrargyros* que significa *agua-plata*, ya que, el Hg se presenta en forma líquida y de color plata brillante. Los romanos lo identificaron con el vocablo latino *argentum vivum*, que significa *plata viva*. Es el único metal que se encuentra líquido en condiciones de presión (P) y temperatura (T) estándar, es decir, en condiciones de 1 atmósfera (atm), típica presión a nivel del mar, y de 25 °C [1].

Desde el año 2000 a.C., el Hg era utilizado por indios y chinos con fines farmacéuticos. Muchas civilizaciones antiguas creían que el Hg tenía propiedades sobrenaturales: se le atribuían principalmente poderes curativos y de inmortalidad. Esto se conoce por trazas de Hg encontradas en tumbas de Egipto y China. La leyenda cuenta que el emperador chino Qin Shi Huang (210 a.C.) murió envenenado por la continua ingesta de Hg en búsqueda de la inmortalidad [2].

Diversas culturas utilizaban al Hg como símbolo de poder por sus propiedades que se creían mágicas. Los romanos, así como los egipcios, usaban al Hg como cosmético, y los griegos como ungüento. Tal y como lo presentan Cook et al. [3], también se ha encontrado Hg en algunos templos aztecas y mayas. Además, se han encontrado depósitos minerales de Hg en antiguos asentamientos humanos en México y Centroamérica. En sitios mayas (por ejemplo México, Guatemala y Honduras) se encontraron ánforas llenas de Hg líquido, así como en la pintura de objetos decorados.

En la actualidad, el Hg puede encontrarse en termómetros, barómetros y otros instrumentos cotidianos. Es usado para amalgamas dentales, pesticidas, baterías y lámparas fluorescentes. Algunos compuestos de Hg, como el cloruro de mercurio (HgCl) y el fulminato de mercurio (Hg(CNO)₂), se usan como insecticidas y detonadores en explosivos. La industria lo utiliza





principalmente en la extracción del oro (minería artesanal) y en el proceso cloro-alcalino (amalgamas de sodio).

En la corteza terrestre, el Hg se encuentra en un mineral llamado *cinabrio* (HgS, sulfuro de mercurio, que contiene más del 80% de Hg), que una vez calentado en horno a aproximadamente 700 °C libera vapores de Hg que pueden condensarse y generar la fase líquida. El cinabrio es un mineral que se genera de las manifestaciones hidrotermales, es decir, de procesos naturales relacionados con la presencia de anomalías térmicas por la presencia de volcanes activos [4]. Los principales depósitos naturales de cinabrio en el mundo se localizan en China, Kazajistán, Perú, Rusia, México y España [5].

Entre las principales propiedades físicas del Hg, se destaca una elevada volatilidad (tendencia de una sustancia a pasar a la fase vapor) y solubilidad (capacidad de una sustancia para disolverse en otra). Es importante destacar que el Hg es soluble en grasa, propiedad que lo hace altamente peligroso para la salud humana por su capacidad de penetrar la membrana celular. Además, el Hg es caracterizado por tener tres estados de oxidación (suma de cargas positivas y negativas de un átomo que dan al elemento diferentes formas químicas): Hg⁰, llamado *mercurio elemental* o *mercurio elemental gaseoso* (GEM, Gaseous Elemental Mercury, por sus siglas en inglés); Hg⁺, llamado *mercurioso* (RGM, Reactive Gaseous Mercury, por sus siglas en inglés); y Hg²⁺, llamado *mercúrico* [6]. En el ambiente, el Hg reacciona con otros elementos y forma compuestos inorgánicos, como sales (por ejemplo, cloruros, sulfuros y nitratos); y compuestos orgánicos, (o también llamados organomercuriales) como el metilmercurio (MeHg, CH₃Hg⁺) y dimetilmercurio (DMHg, (CH₃)₂Hg), que forman enlaces entre el Hg y el carbono.



Desde los años de la conquista, el Hg fue ampliamente usado para la extracción de oro en muchas mineras localizadas en diferentes países de América Latina, lo cual incrementó de forma considerable su concentración en el medioambiente (aire, suelo y agua). Las principales minas de oro en el siglo XVI se encontraban en México, Colombia, Perú y Bolivia. En México, las minas de oro se concentraban solo en el noroeste de su territorio; en los estados de Sonora y Sinaloa. México es un país rico en minerales de Hg (Zacatecas, San Luís Potosí, Durango, Querétaro y Guerrero), así que su extracción tenía como objetivo proveer de Hg otras minas para la extracción de oro y otros metales [2].

Recientemente, los gobiernos mundiales se cuestionaron sobre los efectos adversos del Hg en la salud humana. Como resultado, se realizaron esfuerzos conjuntos a nivel local, nacional e internacional con el objetivo de controlar las emisiones antropogénicas (es decir, relacionadas con la actividad humana) de este metal para preservar la salud humana. En el 2009, iniciaron las negociaciones entre los gobiernos para firmar un convenio mundial jurídicamente vinculante, considerando que el Hg es un contaminante global y ningún gobierno por sí solo puede resolver la problemática [7]. El presente artículo pretende describir los procesos y las consecuencias de las emisiones de Hg en la atmósfera, así como presentar las posibles fuentes naturales y antrópicas. La evaluación del impacto del Hg en el ecosistema terrestre y acuático puede ayudar a facilitar las iniciativas internacionales para el manejo ambiental de este contaminante y mejorar la comprensión de las emisiones de Hg, su transporte y su destino final.

El mercurio en el medioambiente

El GEM es la forma más común del Hg en el medioambiente, especialmente en la atmósfera, con un porcentaje cercano al 95%. El GEM tiene un tiempo de vida medio que fluctúa entre 6 meses





a 2 años. En cambio, el RGM, que es una forma muy reactiva, sobrevive solo algunos días en la atmósfera y representa el 2-4% del Hg total. El Hg está presente en la atmósfera con un determinado fondo geoquímico (o *background*, por su término en inglés); es decir, el contenido presente en el ambiente sin la influencia de la actividad humana. Estos resultados se obtuvieron mediante campañas oceanográficas, en las que se monitorearon las concentraciones de Hg atmosférico en lugares remotos, alejados de fuentes contaminantes. Tal y como lo presentan Sprovieri et al. [8], la concentración atmosférica de Hg en el hemisferio norte se encuentra en un rango de 1.5–1.7 nanogramos por metro cúbico (ng/m^3). En cambio, en el hemisferio sur se encuentra una concentración ligeramente inferior en un rango de 1.1–1.3 ng/m^3 [8]. El Hg es emitido en el ambiente a través de fuentes antropogénicas, o antrópicas, como la minería, la quema de carbón y gasolina, la producción de cemento, los basureros municipales y la industria cloro-álcali (Figura 2) [9].



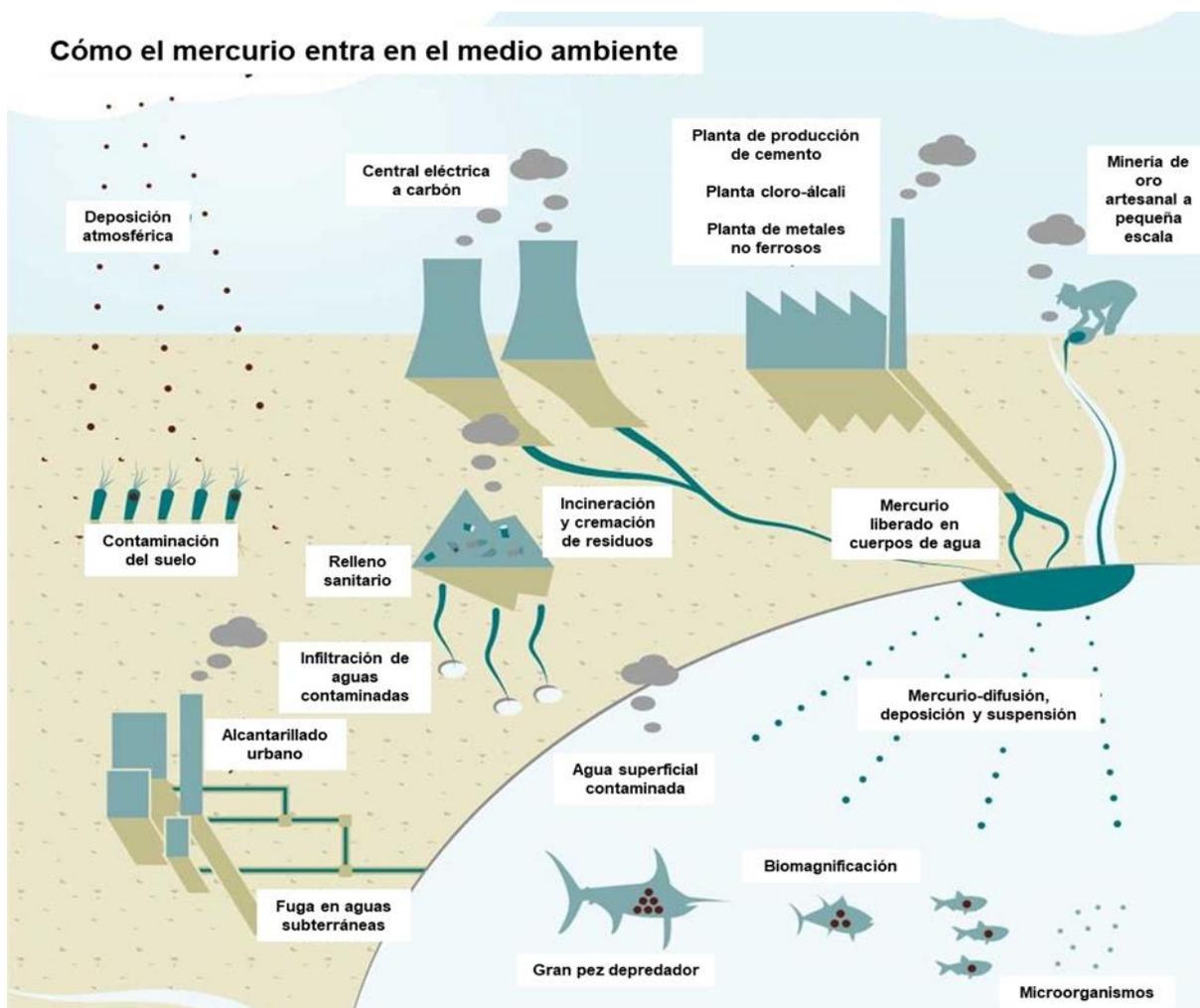


Figura 2: Principales fuentes de contaminación antropogénicas que emiten Hg en el ambiente. Imagen adaptada del Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente (UNEP, United Nation Environmental Programme, por sus siglas en inglés) [9].

La actividad antrópica es la principal emisora de Hg hacia la atmósfera, con la minería de oro artesanal de pequeña escala como fuente primaria a nivel global, en comparación a otras actividades humanas [10]. En esta práctica, el Hg es usado para la extracción del oro formando una amalgama estable, que luego será calentada (evaporando el Hg) para aislar el oro. Se estima que la minería artesanal emite a la atmósfera alrededor de 800 toneladas de Hg por año (2018) [7] y representa el 37% de la contaminación de Hg a nivel mundial (Tabla 1).





Tabla 1: Cantidades de Hg emitidas (toneladas por año) a nivel mundial según los diferentes sectores industriales.

Fuentes	Cantidad emitida
Minería artesanal y a pequeña escala	837.6
Quema de carbón	473.7
Producción de metales no ferrosos	326.6
Producción de cemento	233.1
Basureros	146.9
Monómeros de cloruro de vinilo	58.2
Quema de biomasa	51.8
Producción de metales ferrosos	39.9
Producción cloro-alcalina	15.1
Incineración de residuos	14.9
Refinación de petróleo	14.3
Combustión de petróleo y gas	7.1
Cremación	3.7

Considerando la minería de oro artesanal a pequeña escala, la técnica de amalgamación es la más utilizada a nivel mundial. Otros métodos de extracción, aunque menos comunes, incluyen la separación por gravedad-lixiviación con cianuro, la lixiviación en pilas y la flotación única, entre otros [11]. Una gran parte de esta actividad extractiva es llamada *informal*, una economía que opera sin autorización legal por parte de los gobiernos locales. Por esta razón, es difícil regular y determinar con detalle las emisiones de Hg que cada año contaminan aire, suelo y agua. La mayor actividad extractiva de oro artesanal a pequeña escala con técnica de amalgama de Hg se realiza en países del centro y sur de América, África central y meridional, Rusia y China. Se calcula que alrededor de 14 millones de personas, en los que se incluyen 5 millones de mujeres y niños, están



involucradas en la extracción de oro a nivel mundial. Una vez terminada la extracción del oro, los residuos son dispersados en el ambiente, y forman los llamados *jales mineros*. Estos pueden ser fácilmente transportados lejos del sitio minero por efectos de lluvias (y consecuente escorrentía) y erosión del viento. El Hg contenido en los jales, alrededor de 50-5000 miligramos por kilogramo de oro (mg/kg de oro), contamina el aire, las aguas subterráneas y los suelos. Estas áreas son difícilmente recuperables bajo el perfil ambiental, ya que se consideran sitios altamente contaminados.

En ambiente urbano, las principales fuentes antropogénicas de Hg son i) las emisiones de vehículos a combustión, ii) la producción de cemento, iii) los vertederos de electrónicos y iv) los crematorios [12]. El fondo geoquímico de Hg atmosférico presente en las ciudades con alto tráfico vehicular es más alto en comparación con la concentración de fondo a nivel global, con un rango entre 4 y 10 ng/m³. Los combustibles como la gasolina, diesel y el gas licuado del petróleo (LPG, *Liquefied Petroleum Gas*, por sus siglas en inglés) emiten pequeñas cantidades de Hg elemental, con respecto al gas LP que tiene la mayor cantidad de Hg en comparación a la gasolina y el diesel [13]. Un automóvil puede emitir entre 1.5 y 27 ng/m³ de Hg a la atmósfera por la combustión interna y la degradación de sus partes (pastillas de los frenos) y aditivos (aceite lubricante). Las cementeras son clasificadas como unas de las fuentes más importantes de Hg. Este último es vaporizado durante un proceso llamado *precalcinador*, que consiste en calentar a altas temperaturas material crudo, realizar la cocción en un sistema de horno rotatorio a carbón y enfriar el producto final, el cemento Clinker. Los basureros municipales, tóxicos y dañinos para la salud humana y los ecosistemas, contribuyen a la contaminación por metales pesados. Los desechos





electrónicos contienen cantidades variables de Hg en sus componentes que pueden ser liberados a la atmósfera a través de la incineración.

Los trabajadores de vertederos municipales con presencia de desechos electrónicos presentan niveles de Hg en orina extremadamente altos, por su exposición a niveles de Hg que pueden superar los 29,000 ng/m³ [14]. Se estima que las emisiones de Hg provenientes de los vertederos de electrónicos irán aumentando a lo largo de los años, debido a la creciente demanda de componentes electrónicos a nivel mundial. Los seres humanos están constantemente expuestos al Hg a través de la inhalación, ingestión y/o por la presencia de amalgamas dentales (en ciertas ocasiones pueden contener baja concentración de Hg). La práctica de cremación emite cantidades de Hg total (es decir, una combinación entre GEM y RGM) en el aire, estimadas en alrededor de 310 ng/m³. Una vez efectuada la cremación, el Hg acumulado en el cuerpo, principalmente presente en formas de compuestos orgánicos, se evapora y contribuye a la contaminación atmosférica local [15].

Además de la contribución antropogénica, el Hg es emitido en el ambiente por fuentes naturales, como las emisiones volcánicas, los incendios forestales y la erosión del suelo. La contribución de las emisiones de Hg en el ambiente a través de fuentes naturales es estimada en 500 toneladas por año (tons/a). Las emisiones volcánicas son potencialmente la fuente más importante de Hg natural en la atmósfera. Si bien las mediciones del flujo y concentraciones de Hg volcánico se presentaron en la literatura desde la década de 1970, todavía existe una gran incertidumbre sobre la efectiva contribución de las emisiones volcánicas en el balance global de Hg. Estudios [16] estiman una contribución entre 0.6 a 1000 tons/a, con un promedio de alrededor de 700 tons/a. Las emisiones de Hg volcánico se ven obstaculizadas por la diferente naturaleza y peligrosidad



de los sistemas volcánicos, por las dificultades metodológicas y por limitada comprensión de destino del Hg volcanogénico posterior a la emisión. La mayor dificultad se presenta al medir la concentración del Hg emitido durante una erupción volcánica. Por esta razón, la mayoría de los estudios se concentran en las mediciones de Hg proveniente de volcanes no explosivos con una desgasificación pasiva relativamente moderada, es decir, la liberación continua no explosiva de gases. Se hipotetiza que los volcanes continentales con un origen tectónico convergente (también llamados *volcanes de arco* o *zona de subducción*), el choque entre una placa con corteza oceánica contra una placa de corteza continental, emiten grandes cantidades de Hg. Esa hipótesis es validada por un reciente artículo [17] que determina las emisiones de Hg del Popocatepetl (volcán que se encuentra en una zona de subducción) durante su fase eruptiva. Por último, el Hg es también emitido durante los incendios forestales por la quema de biomasa y materia orgánica, y por la erosión de rocas y suelos mineralizados con compuestos de Hg (Figura 3). Se estima que los incendios forestales emiten alrededor de 600 tons/a de Hg a la atmósfera. En cambio, el Hg proveniente de los suelos y la vegetación se estima alrededor de 1000 tons/a. Una pequeña parte de Hg, alrededor de 100 tons/a, es emitido por la evaporación de los cuerpos de agua, como por ejemplo los ríos, los lagos y los océanos.

Las fuentes naturales pueden sumarse a la contaminación por Hg en ambientes urbanos, como es el caso de las erupciones volcánicas o incendios forestales. Sin embargo, también pueden afectar la contaminación del aire a miles de kilómetros de distancia, como con erupciones particularmente fuertes, en las que la pluma volcánica (mezcla de gases proveniente del volcán) tiene la capacidad de llegar a la estratósfera (capa atmosférica localizada entre 10 y 50 km de



altura) y transportarse a lo largo del planeta para después acumularse y depositarse por efecto de la gravedad (depósito seco) o de la lluvia (depósito húmedo).

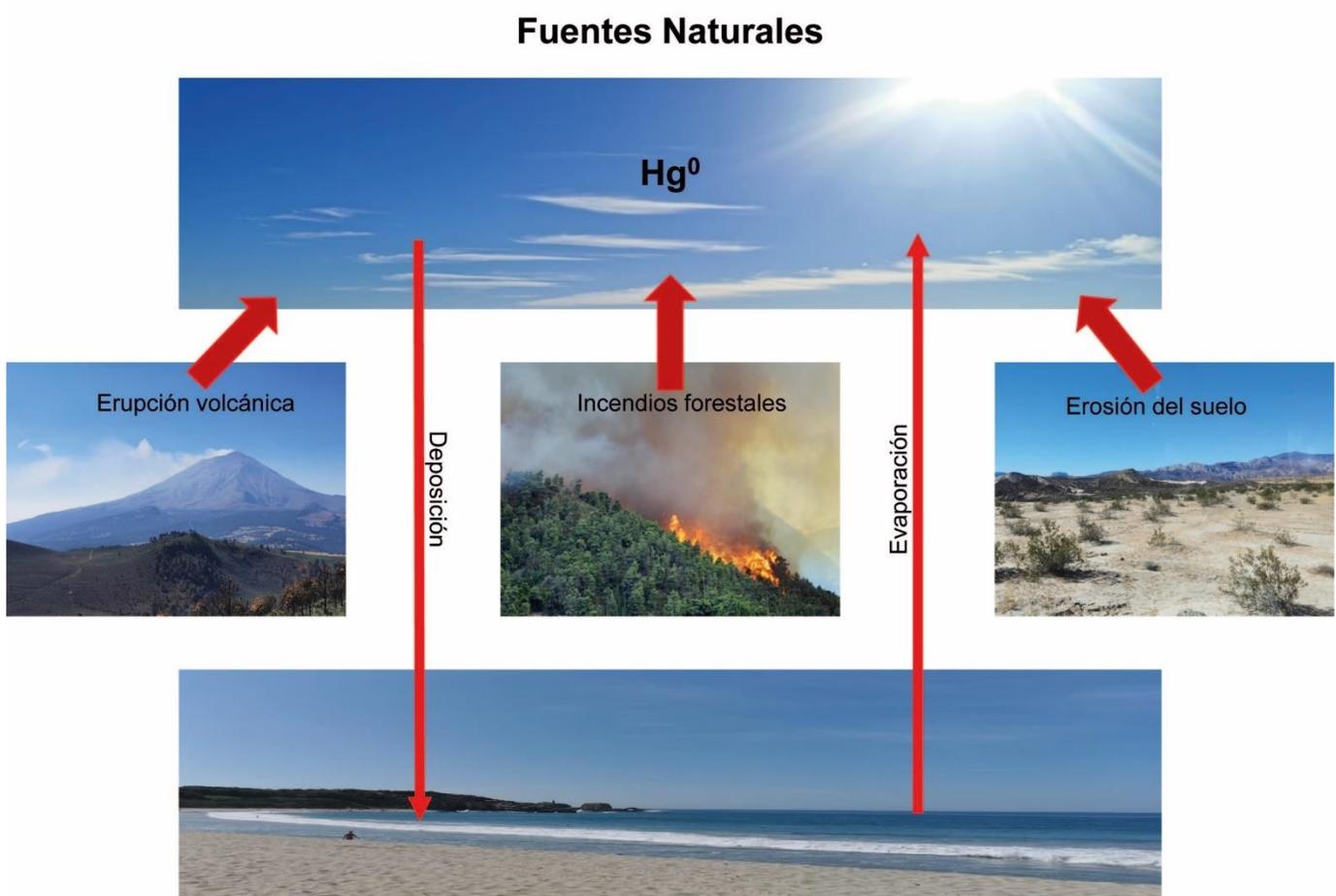


Figura 3: Principales fuentes naturales de contaminación de Hg.

Efectos toxicológicos del mercurio

En el siglo XVII, era necesario remover el pelo de las pieles para transformarlo en fieltro y fabricar sombreros; para esto se emplearon varios métodos basados en mercurio. El fieltro es un material antiguo con bajo impacto ambiental (100% biodegradable), que se obtiene aglomerando fibras de lana o pelo animal. Anteriormente, se utilizaba orina humana para realizar este proceso, pero

pronto se notó que la orina de los enfermos por sífilis era más efectiva en comparación a la orina de una persona sana. En el siglo XVII, la sífilis se curaba con el cloruro de Hg. Desde entonces, se entendió que el Hg tenía ciertas propiedades para trabajar la piel de los animales de manera efectiva.

En el siglo XIX, la orina fue sustituida por el nitrato mercúrico ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$), un compuesto más adecuado en términos técnicos, pero tóxico. En estos años, los estándares de seguridad para los obreros de la industria manufacturera de sombreros eran casi inexistentes. Las habitaciones donde se realizaban esos trabajos estaban mal ventiladas, por lo que los sombrereros respiraban enormes cantidades de vapores de Hg, más de 30,000 ng/m^3 diarios. Además, en algunas ocasiones, para remover el pelo de la piel del animal los trabajadores usaban los dientes, ingiriendo directamente el Hg. Uno de los primeros síntomas por exposición de Hg de los sombrereros era el temblor de las manos, seguido por inestabilidad emotiva, problemas en comunicarse verbalmente y alucinaciones. Las víctimas de esta enfermedad mostraban ansiedad, timidez, cambios emocionales, irritabilidad y comportamientos antisociales, con actitudes peligrosas. Es probable que en estas ocasiones y por el comportamiento extravagante nació el término coloquial *sombrero loco*, que se hizo famoso por el libro de *Alicia en el País de las Maravillas* de Lewis Carroll. Todos estos síntomas se conocían desde principios del siglo XIX, con el nombre de *eretismo*, acuñado en 1805.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el Hg es un elemento neurotóxico; es decir, tiene una particular afinidad en dañar el cerebro y sus conexiones neuronales, sobre todo en la forma de MeHg. La OMS establece en 300 ng/m^3 la exposición límite diaria a los vapores de Hg. En general, los trabajadores de la industria minera y de la producción cloro-álcali (exposición





ocupacional) están expuestos a concentraciones mayores a 300 ng/m^3 , lo que afecta negativamente a la salud. La presencia de efectos adversos debidos a la exposición a Hg depende de diferentes factores, como la forma del Hg (elemental, inorgánico u orgánico), la concentración de Hg, la edad de la persona expuesta (en general los niños y las personas de la tercera edad son las más afectadas), el tiempo de exposición, la vía de exposición (inhalación, ingestión y contacto dérmico), y en caso la persona padezca otros problemas de salud. El Hg elemental y el MeHg son especialmente nocivos, llegan con facilidad al cerebro y a los riñones, lo que causa daños permanentes. Además, la exposición al Hg ha sido asociada con autismo, lupus, Parkinson, Alzheimer, esclerosis múltiple, problemas cardiovasculares y otras enfermedades [18]. También, en exposición durante el embarazo, se han observado importantes daños al desarrollo del feto, con posible retraso mental, ceguera e incapacidad para hablar. Actualmente, la literatura publicada no ha clarificado si existe una relación entre la exposición a los compuestos del Hg y el desarrollo de determinadas formas de cáncer. Las principales vías de exposición son por inhalación e ingestión, con una absorción entre el 80 y 95%.

El Hg elemental tiene mucha afinidad con compuestos sulfhídricos y proteínas, por lo que tiene la capacidad de reaccionar rápidamente con la mucosa respiratoria. Una vez en contacto con la membrana alveolar, el Hg se oxida para convertirse en RGM. El MeHg es más liposoluble (puede disolverse en grasas) y se absorbe más fácilmente a través de la mucosa intestinal. Una intoxicación por MeHg puede afectar a la membrana celular y las enzimas y generar estrés oxidativo, es decir, un desequilibrio entre radicales libres y antioxidantes, por lo que impide el transporte de aminoácidos. Se ha reportado que algunas consecuencias de esta intoxicación son ataxia (alteraciones motoras), temblores, y disestesias (distorsión de un sentido). El MeHg se



forma cuando el Hg inorgánico es metilado por microorganismos, principalmente bacterias anaeróbicas, es decir, organismos capaces de sobrevivir en ausencia de oxígeno en el sedimento. Este compuesto se dispersa y se condensa en los organismos pelágicos muy rápidamente. Una vez concluida la acción bacteriana, el MeHg es absorbido por el plancton, nutriente fundamental para la vida marina. La concentración de MeHg es elevada en pescado y mariscos (principales consumidores de plancton) por los procesos de bioacumulación, que es el depósito gradual de una determinada sustancia química en el organismo durante un cierto tiempo, y de biomagnificación, que es el aumento de los niveles de un determinado compuesto o contaminante según sube de nivel trófico. Si bien, el contenido de MeHg en la mayoría de los pescados es reportado en cantidades menores a 0.4 mg/kg, los peces depredadores (biomagnificación), como el pez espada y tiburón, reportan cantidades 200 veces mayores. El consumo de pescado, sobre todo el atún, es la principal ruta de exposición del MeHg en la población humana.

Otro compuesto organometálico del Hg es el DMHg, que se considera un neurotóxico muy letal. Es la neurotoxina conocida más potente, capaz de matar a un ser humano con cantidades pequeñas, de alrededor de 0.1 mililitros (mL). Es un compuesto que no se encuentra en la naturaleza, sino que se crea en laboratorio al formar la amalgama de sodio con haluros de metilo. El DMHg tiende a bioacumularse, pues el proceso de eliminación en el cuerpo es muy lento. Además, tiene la capacidad de atravesar con facilidad la barrera hematoencefálica y llegar al cerebro, donde se acumula. Una vez que el cerebro entra en contacto con el DMHg es casi imposible sobrevivir; los síntomas de envenenamiento suelen aparecer cuando es demasiado tarde.





Este compuesto atraviesa con facilidad muchos materiales (como el PVC y el neopreno) incluyendo el látex de los guantes de laboratorio, que proporcionan una protección insuficiente ante este compuesto. La Dra. Karen Wetterhahn vivió en primera persona la escasa protección de los guantes de látex y fue la primera víctima del DMHg [19]. Según la bitácora del laboratorio, en agosto de 1996, unas gotas de DMHg cayeron y en cuestión de segundos atravesaron los guantes, y entraron en contacto directo con la piel. La Dra. Wetterhahn tuvo los primeros síntomas de envenenamiento en enero de 1997, y en el mismo mes fue diagnosticada con intoxicación por DMHg, con 4 miligramos por litro (mg/L) de Hg en la sangre. El cuerpo humano puede soportar una concentración máxima de DMHg de 0.2 mg/L. Finalmente, en el mes de junio, después de varias semanas en coma, la Dra. Wetterhahn falleció. La muerte de la Dra. Wetterhahn no fue en vano, agencias nacionales e internacionales aumentaron y mejoraron los estándares de seguridad, reforzando los criterios de evaluación de compuestos potencialmente tóxicos y su manejo.

En la vida cotidiana, las personas comunes tienen contacto con el Hg a través de varias fuentes, entre las cuales se encuentran las lámparas a led, amalgamas dentales, joyería de oro con impurezas, baterías, la combustión de carbón y el excesivo consumo de pescado. El contenido de Hg presente en estas fuentes no alcanza el límite máximo permitido (200 ng/m^3) de exposición diaria establecido por la OMS, por lo que no representa un riesgo directo para las personas. En cambio, si consideramos, por ejemplo, a los trabajadores en fábricas (exposición ocupacional) de lámparas a led o a los productores de baterías, estas personas están expuestas diariamente a concentraciones de Hg altas y peligrosas para la salud.



El convenio de Minamata

Los principales desastres a nivel mundial causados por la ingestión de MeHg se registraron en Iraq, Estados Unidos (New Mexico) y en Japón (Minamata). Estos tres casos tienen en común la contaminación por MeHg de un cierto tipo de comida que estaba en la base de la dieta local, como semillas, cerdos y pescado. El caso más emblemático es el envenenamiento por Hg ocurrido en la ciudad portuaria de Minamata [20].

El primer y más importante desastre a nivel mundial por envenenamiento de Hg se registró en 1953 en la bahía de Minamata, localizada en la ciudad de Minamata, Japón. En esta ocasión, una industrial local descargó en la bahía una enorme cantidad de cloruro de Hg, que fungía como un catalizador para la producción de cloruro de vinilo y acetaldehído. Una vez en contacto con el agua y el sedimento de la bahía, las bacterias metilaron el Hg inorgánico y este se transformó en MeHg. Este último se bioacumuló en el pescado y en los mariscos, que eran parte fundamental de la dieta de los habitantes de Minamata (Figura 4).



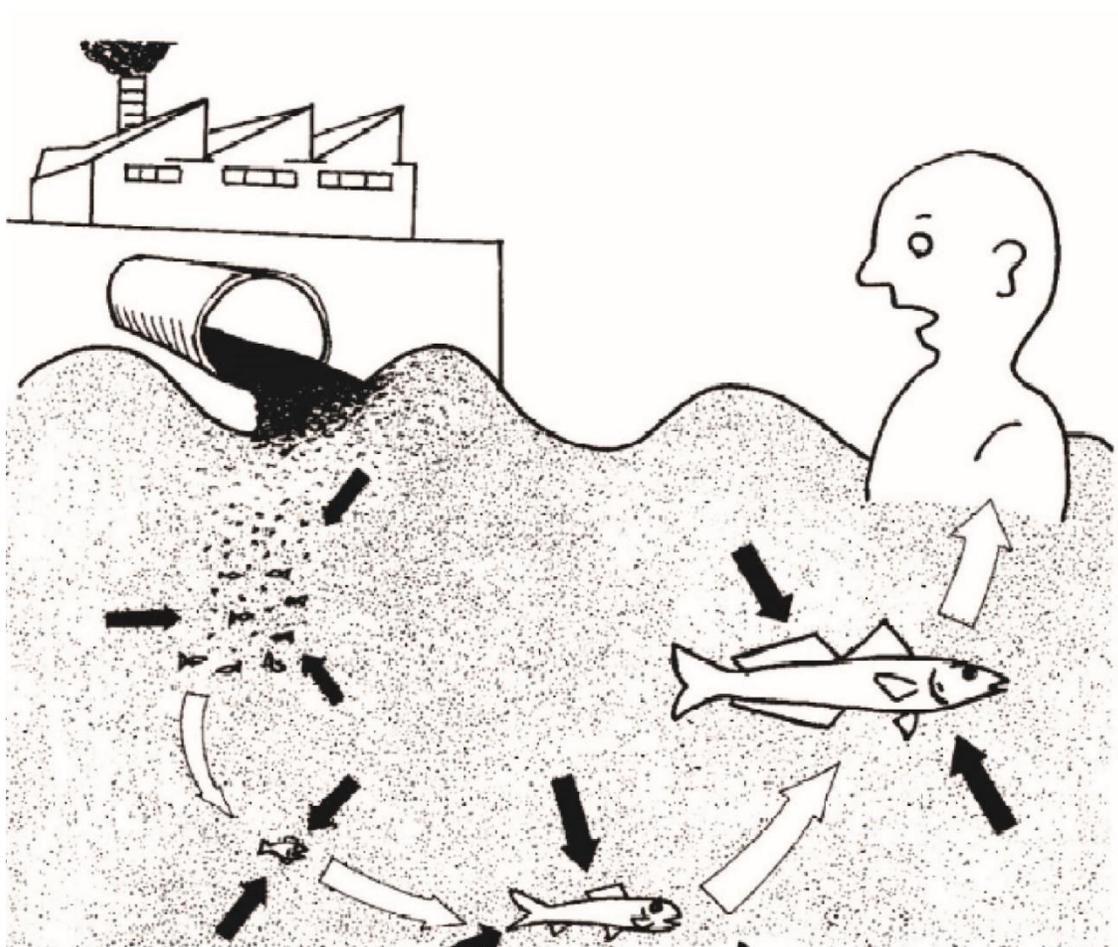


Figura 4: Imagen esquemática del derrame de material contaminado por cloruro de Hg en la bahía de Minamata, Japón. El Hg primero fue absorbido por el pescado y luego, completando la cadena trófica, fue consumido por los habitantes de Minamata [21].

En el pescado se encontraron concentraciones de Hg de alrededor 10 mg/kg. Una estricta correlación fue evidenciada entre el consumo de pescado y la severidad del desastre. Los primeros en enfermar fueron los animales, principalmente los gatos, y posteriormente los habitantes de Minamata. Adultos y niños desarrollaron un síndrome neurológico, con síntomas de ataxia, tremor, campos visuales restringidos y parestesias, es decir, una sensación de quemadura o pinchazo localizada en manos, brazos o piernas. Los recién nacidos también tuvieron graves consecuencias, presentaron un subdesarrollo cognitivo y parálisis cerebral. En total, murieron más

de 900 personas y se enfermaron más de 2 millones entre adultos (50%), niños (33%) y fetos (12%).

En febrero de 2009, tuvo lugar una reunión del Consejo de Gobierno de las Naciones Unidas para el Programa del Medio Ambiente (UNEP, United Nations Environment Programme, por su sigla en inglés). Esta reunión acordó crear un instrumento legalmente vinculante para mitigar los impactos adversos a la salud humana y los ecosistemas provocados por la contaminación por Hg. Un total de 5 reuniones fueron organizadas entre el 2011 y 2013 para armar el documento final del convenio. En octubre del 2013, las negociaciones concluyeron y el *convenio de Minamata* fue suscrito por más de 120 países alrededor del mundo, con el objetivo de proteger la salud humana y el ambiente de las emisiones antropogénicas del Hg y sus compuestos. El convenio entró formalmente en vigor en agosto del 2017 con la obligación de controlar y eliminar las fuentes antropogénicas de Hg. Según lo reportado por Bank [22], el mayor decremento de Hg atmosférico fue detectado en Asia, con un promedio de 27 toneladas por año desde 2018 hasta 2020. Esta disminución se debe al control de la minería artesanal de oro no regularizada y del uso de carbón. Actualmente, no se han reportado avances significativos en la región de América Latina y Caribe.

Conclusión

El Hg es reconocido globalmente como un contaminante altamente tóxico y potencialmente dañino para la salud humana y el ecosistema animal y vegetal. En siglos pasados, así como en la actualidad, la amalgamación del Hg con otros metales continúa siendo usada para la extracción del oro y la industria cloro-álcali. La contaminación del medio ambiente involucra el transporte por aire y el consecuente depósito del Hg en suelo, sedimento y agua. Las principales vías de exposición son por inhalación, a través de los vapores de Hg, y por ingestión, a través del consumo





humano de pescado contaminado por MeHg. En los últimos años, los criterios de evaluación del riesgo por exposición a Hg han mejorado, al comprobarse los efectos adversos sobre el sistema nervioso y los riñones. Se han reportado casos severos de intoxicación masiva de MeHg por bioacumulación en peces, como en Minamata, y por fungicidas (por ejemplo, el desastre de grano envenenado en Iraq). Si bien el Hg es considerado un contaminante a escala global, esfuerzos a una escala más local mediante estrategias de mitigación para el consumidor final y la vida silvestre han sido implementados. El control sobre las emisiones antropogénicas es actualmente una prioridad importante para la política nacional e internacional, con el desarrollo de tecnologías para limitar la liberación del Hg y la contaminación del medio ambiente.



Referencias

- [1] M. Marchini, M. Gandolfi, L. Maini, M. Martelli, “Exploring the ancient chemistry of mercury”, PNAS, vol. 119, pp. e2123171119, 2022. <https://doi.org/10.1073/pnas.2123171119>
- [2] M.A. Blesa y G. Castro, “Historia natural y cultural del mercurio”, 1a ed. – Buenos Aires: Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias, 2015. ISBN: 978-987-28123-3-1. http://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2017/10/libro_historia_natural_cultural_mercurio.pdf
- [3] D.E. Cook, T.P. Beach, S.L. Beach, N.P. Dunning, S.D. Turner, “Environmental legacy of pre-Columbian Maya mercury”, Frontiers in Environmental Science, vol. 10, 2022. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.986119>
- [4] B. Gworek, W. Dmuchowski, A.H. Baczewska-Dabrowska, “Mercury in the terrestrial environment: a review”, Environmental Science Europe, vol. 32, pp. 128, 2020. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x>
- [5] USGS, “United States Geological Survey Minerals Resources Program”, 2009. Ver: <https://www.usgs.gov/programs/mineral-resources-program>
- [6] L. Si, B.A. Branfireun, J. Fierro, “Chemical Oxidation and Reduction Pathways of Mercury Relevant to Natural Waters: A Review”, Water, vol. 14, pp. 1891, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14121891>
- [7] UNEP, 2013a, “Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport”, United Nations Environment Programme (UNEP), Chemicals Branch, Geneva, Switzerland. <https://www.unep.org/resources/report/global-mercury-assessment-2013-sources-emissions-releases-and-environmental>
- [8] F. Sprovieri, I.M. Hedgecock, and N. Pirrone, “An investigation of the origins of reactive gaseous mercury in the Mediterranean marine boundary layer”, Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 10, pp. 3985–3997, 2010. <https://doi.org/10.5194/acp-10-3985-2010>
- [9] UNEP (2013). Mercury – time to act. Geneva: UNEP Chemicals Branch (https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27436/mercury_timetoact.pdf?sequence=1&isAllowed=y).





- [10] P.S. Soe, W.T. Kyaw, K. Arizono, Y. Ishibashi, T. Agusa, "Mercury Pollution from Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Myanmar and Other Southeast Asian Countries", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19(10), pp. 6290, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph19106290>
- [11] Yanti, I., Marlina, T., Anugrahwati, M., Wicaksono, W.P., Winata, W.F, "The comparison of gold extraction methods from the rock using thiourea and thiosulfate", *Open Chemistry*, vol. 21, 2023. <https://doi.org/10.1515/chem-2023-0102>
- [12] B. Schiavo, O. Morton-Bermea, E. Salgado-Martínez, R. García-Martínez, E. Hernández-Álvarez, "Health risk assessment of gaseous elemental mercury (GEM) in Mexico City", *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 194, pp. 456, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10107-7>
- [13] J.H. Wong, J.Y. Park, T.G. Lee, "Mercury emissions from automobiles using gasoline, diesel, and LPG", *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 7547–7552, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.04>
- [14] G. Aubrac, A. Bastiansz, N. Basu, "Systematic Review and Meta-Analysis of Mercury Exposure among Populations and Environments in Contact with Electronic Waste", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19(19), pp. 11843, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph191911843>
- [15] H. Piagno, R. Afshari, "Mercury from crematoriums: human health risk assessment and estimate of total emissions in British Columbia". *Canadian Journal of Public Health*, vol. 111, pp. 1011–1019, 2020. <https://doi.org/10.17269/s41997-020-00327-0>
- [16] B.A. Edwards, D.S. Kushner, P.M. Outridge, F. Wang, "Fifty years of volcanic mercury emission research: Knowledge gaps and future directions", *Science of The Total Environment*, vol. 757, pp. 143800, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143800>
- [17] B. Schiavo, O. Morton-Bermea, E. Salgado-Martinez, J. Arellano, E. Hernández-Álvarez, "Estimates of mercury flux and temporal variability of Hg/SO₂ ratio in the plume of Popocatepetl volcano (Mexico)", *Journal of South America Earth Sciences*, vol. 101, pp. 102614, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102614>



- [18] P.J. Jannetto, and C.T Cowl, "Elementary Overview of Heavy Metals", *Clinical Chemistry*, vol. 69(4), pp. 336-349, 2023. <https://doi.org/10.1093/clinchem/hvad022>
- [19] M.B. Blayney, "The Need for Empirically Derived Permeation Data for Personal Protective Equipment: The Death of Dr. Karen E. Wetterhahn", *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 16, pp. 233-236, 2010. <https://doi.org/10.1080/104732201460389>
- [20] S.G. Gilbert, "Chapter: Mercury Tragedies: Incidents and Effects", *Encyclopedia of Toxicology* 3er edition, pp. 211-216, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00085-3>
- [21] 10 Things to Know about Minamata Disease, Minamata Disease Municipal Museum. Recuperado de (<https://www.minamatadiseasemuseum.net/10-things-to-know>).

Cómo citar este artículo:

Schiavo, B., Morton-Bermea, O., Meza-Figueroa, D., & Arredondo-Palacios, T. E. (2024). *El mercurio como contaminante: fuentes, vías de exposición y efectos en la salud*. *EPISTEMUS*, 18(36). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i36.306>

