



El mercurio y su uso histórico en México

Resumen:

El uso antropogénico del mercurio (Hg) para diversas funciones, incluso como pigmento y como remedios medicinales, se remonta a la antigüedad. Históricamente, las minas de Hg en la “Nueva España” (actualmente México) fueron explotadas en los actuales estados de Guerrero, Durango, Chihuahua, Guanajuato, San Luis Potosí, Aguascalientes y Querétaro. La invención del “proceso de patio” para el aislamiento de metales como el oro y la plata a través de la formación de amalgamas con Hg en la Nueva España proporcionó un método altamente rentable, de nivel industrial.

Recursos Naturales y Sociedad, 2022. Vol. 8 (2): 49-62. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2022.08.08.02.0005>

Taryn Elizabeth Symon, Daniela A. Murillo Cisneros, Tania Zenteno Savín*

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Planeación Ambiental y Conservación. Instituto Politécnico Nacional
195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096 – México

*Autor de correspondencia: tzenteno04@cibnor.mx, (612) 123-8502

Como resultado, la demanda de Hg aumentó, al igual que los esfuerzos de extracción. Sin embargo, la exposición al Hg no estuvo, ni está, exenta de riesgos. Incluso durante estos tiempos, se sabía que la exposición al Hg podía provocar numerosos efectos adversos para la salud, que iban desde problemas para hablar y síntomas neurológicos, hasta la muerte. Tras el consumo de granos tratados con Hg originarios de México y EUA, la muerte de cientos de iraquíes contribuyó a la instauración del Convenio de Minamata sobre el Mercurio. En 2015, México se convirtió oficialmente en parte de esta Convención y ha comenzado a trabajar para reducir y eliminar el uso de Hg en varios productos. Sin embargo, aunque nos estamos moviendo en la dirección correcta, la eliminación de la contaminación heredada y la prevención de la futura contaminación por Hg siguen siendo problemas importantes.

Palabras claves: *Ecotoxicología, metales pesados, Una Salud*

Abstract

The anthropogenic use of mercury (Hg) for diverse functions, including as a pigment and within medicinal remedies, dates back to ancient times. Historically, Hg mines in “New Spain” (currently Mexico) were exploited in the current states of Guerrero, Durango, Chihuahua, Guanajuato, San Luis Potosí, Aguascalientes and Querétaro. The invention of the “patio process” within New Spain provided an industrial level and highly profitably method of Hg-assisted gold and silver isolation through the formation of amalgams. As a result, Hg demand increased, as did mining efforts. However, Hg exposure was not, and is not, without risk. Even during these times, it was known that Hg exposure could result in

numerous adverse health effects, ranging from trouble talking and neurological symptoms, to death. Following the consumption of Hg-treated grains originating from Mexico and United State of America, the deaths of hundreds of Iraqis assisted in the instatement of the Minamata Convention on Mercury. In 2015, Mexico officially became part of this Convention and has begun work to reduce and eliminate the use of Hg in various products. However, although we are moving in the right direction, eliminating legacy contamination and preventing future Hg contamination remain significant problems.

Keywords: *Ecotoxicology, heavy metals, One Health*

¿Qué es el mercurio?

El mercurio (Hg) es un contaminante ambiental natural. Si miramos la tabla periódica de los elementos (**Figura 1**), todos los

elementos cuentan con sus propias letras, las que tienen significancia al respeto de cada elemento.

En el caso de mercurio, las letras *Hg* derivan del nombre griego *hydrargyrum*, o *plata líquida*, como referencia a su forma única a temperatura ambiente (Sinicropi *et al.*, 2010; Wisniak, 2008). En la misma tabla periódica, el Hg, aparece como el elemento 80 (grupo 12, periodo 6). Pero, ¿qué significa este número? ¿Fue el mercurio el elemento número 80 descubierto? De hecho, no. El número atómico, en este caso el número 80, simplemente nos dice la cantidad de protones (una partícula elemental cargada positivamente) dentro del núcleo (CK-12 Foundation, 2022). Este elemento puede existir en diferentes estados de oxidación, incluso como Hg^0 (elemental), Hg^+ (mercurioso, inorgánico) y Hg^{2+} (mercúrico, inorgánico) (Evers *et al.*, 2007). Además, el Hg puede ser transformado a Hg orgánico, incluyendo el monometilmercurio ($MeHg^+$), lo que vamos a discutir a detalle más abajo.

Las muchas caras del mercurio

Como todo lo demás en este mundo, las transformaciones de Hg están influenciadas por factores bióticos (de los seres vivos) y abióticos (no derivados de los seres vivos) (revisado en Selin, 2009).

Para efectos de este artículo, no se dará una descripción del ciclo de Hg; en cambio, simplemente diremos que el Hg^0 puede ser transformado a Hg inorgánico, el cual, a su vez, puede ser transformado a Hg orgánico.

Figuras y Tablas

Grupo →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Periodo																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
Lantánidos			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Actínidos			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Figura 1. Tabla periódica de los elementos. El mercurio (Hg) figura como el número 80 (periodo 12, grupo 6). Imagen obtenida de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14638163>.

Aunque la mayoría de estas reacciones son reversibles (i.e., el Hg inorgánico también puede transformarse a Hg⁰), una pequeña porción de Hg inorgánico y de Hg orgánico pueden quedarse atrapados en sus fases sólidas, evitando reacciones posteriores (Fitzgerald y Clarkson, 1991); lo que hace este “ciclo” relativamente no cíclico. Es importante mencionar que todas las formas de Hg (elemental, inorgánico y orgánico) son tóxicas (Sinicropi *et al.*, 2010); sin embargo, el Hg orgánico, incluyendo el monometilmercurio, presenta el mayor riesgo para la salud debido a su alta biodisponibilidad (Castellini *et al.*, 2022).

Algunos efectos adversos de la exposición crónica (prolongada) o aguda (rápida) al Hg incluyen síntomas neurológicos (convulsiones, temblores, debilidad, problemas de audición y visión, cambios

de personalidad e irritabilidad, problemas del habla, alucinaciones, respuestas lentas, etc.), disminuciones en la respuesta inmunitaria y tasas reproductivas, daño renal, daño tisular oxidativo, problemas respiratorios, e incluso la muerte (Bakir *et al.*, 1973; Das *et al.*, 2008; Das *et al.*, 2016; De Guise *et al.*, 1995; Fitzgerald y Clarkson, 1991; Iqbal y Asmat, 2012; Lalancette *et al.*, 2003; Lian *et al.*, 2020; Lian *et al.*, 2021; Rustagi y Singh, 2010; Van Hoomissen *et al.*, 2015; Wujastyk, 2015). Además, la concentración de Hg orgánico en los tejidos biológicos está influenciada por muchos factores ecológicos importantes (estructura de la cadena alimentaria, hábitat de alimentación, etc) y biológicos (metabolismo, tasa de crecimiento, etc) que determinan las tasas de bioacumulación^c y biomagnificación^d de Hg (Barwick y Maher, 2003; Newman *et al.*, 2015).

El uso histórico del mercurio en México

Aunque se desconoce cuándo se descubrió por primera vez el Hg, la evidencia sugiere que se ha utilizado en productos que van desde cosméticos hasta tratamientos medicinales (Tabla 1) durante más de 2500 años (Fitzgerald y Clarkson, 1991; Wisniak, 2008). En México, los descubrimientos arqueológicos indican que el cinabrio (una piedra roja que contiene el sulfuro de mercurio (HgS) que forma una amalgama^e) se usaba en rituales y celebraciones (1000 a. C. en Querétaro), como pigmento para figurillas (1200-400 a. C. en el sur-centro de México), y como pigmento en el sarcófago del rey maya Pacal (683 D.C. en Palenque) (Brooks, 2012). Con tantas aplicaciones, es fácil creer que el Hg abunda en el mundo natural. Sin embargo, todo lo contrario.

El mercurio es un elemento relativamente raro que se encuentra dentro de la corteza terrestre en aproximadamente 50-80 µg/kg (Iqbal y Asmat, 2012;

Wisniak, 2008). La minería histórica de Hg tuvo lugar en varios países, incluyendo España, Italia, Eslovenia, Turquía, Rusia, China, EUA, así como aquí mismo en México.

Los principales yacimientos de Hg del país se encontraron en los estados de Guerrero, Durango, Chihuahua, Guanajuato, San Luis Potosí, Aguascalientes y Querétaro (Wisniak, 2008; Figura 2). Aunque México presentaba una rica fuente, los españoles impidieron la explotación de Hg entre los años 1680 a 1811 (Brooks, 2012). Después de ganar su independencia de España en 1821, la producción de Hg en México aumentó significativamente (Castro Díaz, 2011). Aunque se deseaba usar Hg en varios productos (Tabla 1), su uso se hizo popular por su capacidad para formar amalgamas con otros elementos, lo que ayudó en el aislamiento del oro

Tabla 1. Algunos usos históricos y actuales de las diferentes formas de mercurio (Hg).

Forma de Hg	Ejemplos	Usos Históricos y Actuales
Elemental	•Mercurio metálico •Vapor de mercurio	•Termómetros •Esfigmomanómetros •Empastes dentales (amalgamas) •Producción de clorálcali •Extracciones de oro y plata (amalgamas) •Interruptores eléctricos •Lámparas fluorescentes •Espejos de adivinación •Luz reflectiva para algunos microscopios •Juguetes para niños •Jabones de belleza y cremas para aclarar la piel •Objetos ceremoniales
	•Sulfuro de mercurio (cinabrio/bermellón; HgS)	•Pigmento rojo en pintura de casa •Pigmentos de artista •Conservación/preservación de telas •Objetos ceremoniales •Pigmento corporal para guerreros •Cosméticos para la clase élite
Inorgánico	•Cloruro mercurioso (calomelano; Hg₂Cl₂)	•Antisépticos •Diuréticos •Tratamientos para la sífilis (mezclado con opio para aumentar la eficacia) •Laxantes •Polvos para la dentición •Analgésicos •Filtros acústico-ópticos
	•Nitrato de mercurio (II) (Hg(NO₃)₂)	• Fabricación de sombreros (por eso existe la expresión “loco como un sombrerero”)
	• Fulminato de mercurio (Hg(CNO)₂)	•Detonador en explosivos
Orgánico	•Monometilmercurio (MeHg⁺; CH₃Hg⁺) •Dimetilmercurio •Etilmercurio •Fenilmercurio	•Pesticidas •Fungicidas
	•Tiomersal	•Conservador en algunas vacunas •Antiséptico y antifúngico en pintura, cosméticos, lentes de contacto, medicamentos tópicos y limpiadores



y la plata. Tradicionalmente, los métodos para formar amalgamas y aislar elementos dentro de estas amalgamas incluían mezclar vigorosamente cinabrio con vinagre utilizando un mortero de cobre (Wisniak, 2008), apretarlos dentro de un trozo de cuero hasta que el Hg pasara a través de los poros con el calentamiento del producto restante para liberar el Hg, y como relleno de agujeros en los cauces de los ríos con Hg como medio para capturar el oro transportado por las corrientes (Nriagu, 1994). Sin embargo, estos procesos eran lentos, no permitían procesar grandes cantidades de oro o plata, y no generaban una ganancia considerable.



Figura 2. Ubicación de minas de mercurio históricas en México (antes Nueva España). Figura modificada de Nriagu (1994).

Elementos como el Hg, el oro y la plata tenían una gran demanda, por lo que los inventores buscaban constantemente formas de mejorar los procesos de aislamiento. Uno de esos inventores fue el español Bartolomé de Medina, residente de Pachuca, México, quien introdujo un método revolucionario para procesar grandes cantidades de plata utilizando Hg en los 1550. Este proceso se conoció como el “proceso de patio” (Figura 3), y aunque era lento, requería herramientas simples y pocos recursos naturales, era fácil de usar, y aumentaba la cantidad de plata que podía procesarse, lo que hacía que este método fuera

extremadamente lucrativo (Nriagu, 1994; Wisniak, 2008). Esencialmente, el proceso de patio consistía en cinco etapas: 1) los minerales se molían por diferentes métodos, incluyendo un molino chileno (Figura 3); 2) se añadía de 2 a 5 kg de Hg y la mezcla se volvía a moler; 3) la mezcla resultante se convertía en “tortas” en el patio mientras se añadía sal, cal o sulfato de cobre/hierro tostado y más Hg; las tortas se molían periódicamente por 3 semanas durante 5 meses; 4) las tortas eran colocadas en una tina, a veces con una gran cantidad de Hg, y se batía la mezcla para separar la amalgama de la plata; y 5) el exceso de Hg se eliminaba de la amalgama filtrándola a través de bolsas de lona y la amalgama restante se calentaba para liberar la plata del Hg (Nriagu, 1994).

Siguiendo la introducción de este método, la producción

estimada de plata en México aumentó del 12% entre los años 1493 a 1600 al 57% entre los años 1701 a 1850 (revisado en Nriagu, 1994), y en el año 1870, se estimó que aproximadamente el 70% de la plata mexicana era procesada usando este método (Nriagu, 1993).

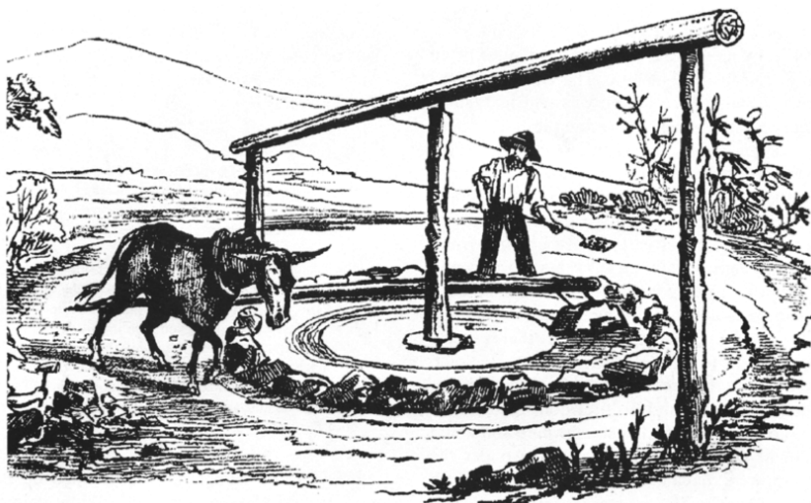


Figura 3. Representación de la etapa inicial del "proceso de patio" con el molino chileno. Imagen obtenida de Nriagu (1994).

Además, entre los años 1562 a 1570 se estimó que México usaba entre 40 a 45 toneladas de Hg al año, mientras que entre los años 1571 a 1585, este consumo aumentó a 75 toneladas anuales (Wisniak, 2008). Aunque lucrativo, el proceso de patio resultó en la liberación de alrededor del 60 al 65% de Hg a la atmósfera (Nriagu, 1993). Durante más de 300 años, cuando se usaba comúnmente el proceso de patio (1570-1900), América del Norte, por sí sola, contribuyó a la liberación de alrededor de 68 200 toneladas de Hg al medio ambiente (Nriagu, 1994); aproximadamente el peso de ¡455 ballenas azules! El Hg liberado de este proceso es libre para circular por el planeta y asentarse en lugares distantes y remotos, lo que resultaría en una contaminación global.

En el siglo XVII (1601-1700), un alquimista alemán descubrió que el fulminato de mercurio podía causar explosiones (Wisniak, 2012). En 1789, y más tarde en 1800, otros químicos reportaron explosiones similares causadas por sus experimentos con fulminato de mercurio (revisado en Wisniak, 2012). En la década de 1800, el uso de fulminato de mercurio en armas militares se hizo común en varios países (Gębka, 2016; Wisniak, 2012). Mientras, durante la Segunda Guerra Mundial, el Hg fue buscado para su uso como fulminato de mercurio en explosivos.

Antes de la Segunda Guerra Mundial, la producción de Hg en México osciló entre 37 a 294 toneladas métricas; sin embargo, en 1942, la producción nacional aumentó a 1117 toneladas métricas por su exportación a Los Estados Unidos para su uso como explosivos (Castro Díaz, 2011). La exportación

de numerosos minerales, incluido el Hg, a los Estados Unidos durante este período condujo a un importante desarrollo económico, denominado “el milagro mexicano” (Pruitt, 2020). Aunque crítico para el desarrollo nacional, este período también provocó contaminación ambiental con riesgos para la salud.

Curiosamente, se observa que incluso a lo largo del siglo XVI (1501-1600) los médicos sabían que el Hg era tóxico (Wisniak, 2008).

Sin embargo, el uso de Hg continuó. A finales de 1971, México y Estados Unidos de Norte América exportaron alrededor de 60 000 toneladas métricas de semillas de trigo Mexipak y cebada tratados con fungicidas que contenían ditiandiamida metil-mercurio a Irak debido a una escasez de granos de ese país (Bakir *et al.*, 1973). Aunque este grano sólo estaba destinado a la siembra para reponer las existencias de grano, los errores de comunicación y el vandalismo dieron como resultado que se utilizara para el consumo humano directo. En 1972, más de 6 000 personas fueron hospitalizadas por intoxicación por Hg; de estas personas, 459 murieron en el hospital (Bakir *et al.*, 1973). Después de ésta y otras crisis de salud relacionadas con el Hg, a la fecha, muchos países, incluido México, están trabajando para reducir o prohibir el uso de Hg. En 2015, México se convirtió oficialmente en parte del Convenio de Minamata sobre el Mercurio, que tiene como objetivo general “proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos del mercurio” (Minamata Convention on Mercury, 2021). Como parte de esta convención, en 2016 se publicó un informe que indica que para el año 2020 el uso de Hg en productos que incluyen baterías, bombillas fluorescentes, cosméticos (excluyendo aquellos con contenido de Hg inferior a 1 ppm y aquellos para uso

alrededor de los ojos que no tienen conservadores seguros alternativos), los pesticidas y los antisépticos tópicos se prohibirían en México, mientras que se desalentaría el uso de amalgamas dentales que contengan Hg (Echániz Pellicer, 2016), pero no se prohibiría. Este informe también indicó que se necesitan más estudios para determinar un plan de acción para la minería artesanal de Hg, que aún existe (Echániz Pellicer, 2016).

¿Como estamos hoy en día?

Aunque el gobierno de México está tomando medidas para reducir la producción y uso de Hg, todavía existen muchos retos. En 1994, la producción primaria oficial de Hg (donde el material primario buscado es Hg) en México se acabó por falta de demanda y la cantidad de mineras activas bajaron de más de 1 000 en el año

1968 a 314 en el año 2010 (revisado en Castro Díaz, 2011). Sin embargo, después de firmar el Convenio de Minamata sobre el Mercurio, la producción artesanal (de escala pequeña) de Hg, y como tal, la contaminación ambiental, en México continuó. Como parte del Convenio de Minamata sobre el Mercurio, se permitió que las minas artesanales que existían antes de la firma del contrato continuaran con la producción primaria de Hg, aunque el Hg obtenido sólo podría usarse para productos con Hg agregado (cosméticos, pesticidas, bombillas, equipo científico/médico, pilas, etc), y se le dio al gobierno hasta 15 años para eliminar esta actividad (UNEP, 2013). Además, se prohibió la apertura de minas previamente inactivas o minas nuevas (UNEP, 2013). En 2017, la exportación oficial (legal) de Hg desde México disminuyó significativamente (por la firma del Convenio de

Minamata sobre el Mercurio); sin embargo, debido a la alta demanda de Hg para su uso en la industria del oro, las minas previamente inactivas comenzaron a reabrir y las exportaciones no oficiales (ilegales) aumentaron (Marshall *et al.*, 2021). En 2020, como resultado del desempleo durante la pandemia de COVID-19, las actividades de minería artesanal aumentaron aún más, al igual que los precios del Hg; de US \$17/kg en 2010 a más de US \$186/kg en 2020 (Marshall *et al.*, 2021). A partir de 2022, la venta de Hg, para uso en la amalgamación de oro (no como un producto con Hg agregado de acuerdo con la Convención de Minamata), se puede encontrar incluso en sitios comerciales como Mercado Libre ([mercadolibre.com.mx](https://www.mercadolibre.com.mx), 2022) por MX \$3800/kg (US \$190).

Notas al calce

^a Estado de oxidación- un número positivo o negativo que indica el grado de oxidación o reducción de un átomo (CK-12 Foundation, 2022).

^b Biodisponibilidad- la capacidad de las plantas, animales y microorganismos para absorber un elemento, como el Hg (Roane *et al.*, 2015), es determinado por diferentes factores.

^c Bioacumulación- La acumulación neta de un contaminante dentro de un organismo a lo largo del tiempo (es decir, con la edad) (Newman *et al.*, 2015).

^d Biomagnificación- Ocurre cuando la concentración de un metal traza aumenta con cada nivel trófico sucesivo, en al menos dos niveles tróficos consecutivos (por ejemplo, sardina a atún a humanos) (Barwick y Maher, 2003).

^e Amalgamas- La mezcla resultante (aleación) de Hg con otro metal, como el oro o la plata.

Poniéndolo todo junto

Aunque el enfoque principal de este artículo es brindar una breve descripción del uso histórico de Hg en México, se debe notar la contribución mundial a esta contaminación “heredada”.

También se debe tener en cuenta que la contaminación por Hg no es causada únicamente por actividades humanas (antropogénicas); los eventos naturales, como los terremotos, la actividad volcánica, los incendios y la surgencia oceánica también son responsables de las emisiones y la contaminación de Hg en todo el mundo.

La *fente* exacta de liberación (natural o antropogénica) de Hg no influye en sus efectos generales, sino la forma de exposición. Cuando la exposición al Hg es a través de la dieta (forma orgánica), los organismos longevos, de alto nivel trófico y de cuerpo grande, como los humanos, son más susceptibles a los efectos adversos (negativos) para la salud, especialmente cuando residen cerca de fuentes de contaminación, como minas de Hg. Desafortunadamente, el cuerpo humano no cuenta con métodos para eliminar completamente el Hg. Sin embargo, se pueden excretar pequeñas cantidades en los fluidos corporales (sangre, saliva, leche materna), heces y cabello, mientras que mayores concentraciones se transfieren de la madre al bebé durante el embarazo (*in utero*) (Castellini *et al.*, 2012; Khan y Wang, 2009; Saturday, 2018; Shibata *et al.*, 1992; Sinicropi *et al.*, 2010). La exposición al Hg *in utero* aumenta el riesgo de trastornos en el desarrollo del bebé, como parálisis cerebral, discapacidad intelectual, e incluso puede causar la muerte (Bakir *et al.*, 1973).

Como podemos ver, todavía tenemos un largo camino por recorrer antes de que los efectos de la contaminación por Hg sean cosa del pasado y se deben realizar esfuerzos continuos, como el fortalecimiento de las políticas públicas, para prevenir futuras contaminaciones.

Agradecimientos:

Los autores agradecen el apoyo técnico en el laboratorio de Estrés Oxidativo de CIBNOR del IBQ O. Lugo-Lugo. El trabajo de investigación es financiado por The Society of Marine Mammology y CONACYT (CB-2016-01-283669 y 2016-01-2305). TES es recipiente de una beca CONACYT (802788; CVU: 922584). TZS es miembro de la red CYTED RIESCOS (ref. 419RT0578). A Lic. Gerardo Hernández, por el diseño gráfico editorial para este artículo

Bibliografía:

- Bakir, F., S.F. Damluji, L. Amin-Zaki, M. Murtadha, A. Khalidi, N.Y. Al-Rawi, S. Tikriti, H. Dhahir, T.W. Clarkson, J.C. Smith y R.A. Doherty. 1973. *Methylmercury poisoning in Iraq*. Science 181: 230-241.
- Barwick, M y W. Maher. 2003. *Biotransference and biomagnification of selenium copper, cadmium, zinc, arsenic and lead in a temperate seagrass ecosystem from Lake Macquarie Estuary, NSW, Australia*. Marine Environmental Research 56(4): 471–502.
- Brooks, W.E. 2012. *Industrial use of mercury in the ancient world*. pp. 19-24. En: Bank, M (Ed.). Mercury in the environment: Pattern and process, Berkeley, Estados Unidos.
- Castellini, M. J., L.D. Rea., J.P. Avery y T.M. O'Hara. 2022. *Total mercury, total selenium, and monomethylmercury relationships in multiple age cohorts and tissues of Steller sea lions (Eumetopias jubatus)*. Environmental Toxicology and Chemistry 41(6): 1477-1489.
- Castellini, M.J., L.D. Rea, C.L. Lieske, K.B. Beckmen, B.S. Fadely, J.M. Maniscalco y T.M. O'Hara. 2012. *Mercury concentrations in hair from neonatal and juvenile Steller sea lions (Eumetopias jubatus): Implications based on age and region in this Northern Pacific marine sentinel piscivore*. EcoHealth 9(3): 267–277.
- Castro Díaz, J. 2013. *An assessment of primary and secondary mercury supplies in Mexico*. Commission for Environmental Cooperation 1: 1-119.
- CK-12 Foundation. 2022. *Introductory chemistry*. LibreTexts, UC Davis, California, Estados Unidos.
- Das, K., A. Dupont, M. De Pauw-Gillet, C. Debier y U. Siebert. 2016. *Absence of selenium protection against methylmercury toxicity in harbour seal leucocytes in vitro*. Marine Pollution Bulletin 108(1-2): 70-76.
- Das, K., U. Siebert, A. Gillet, A. Dupont, C. Di-Poï, S. Fonfara, G. Mazzucchelli, E. de Pauw y M. de Pauw-Gillet. (2008). *Mercury immune toxicity in harbour seals: links to in vitro toxicity*. Environmental Health 7(52).
- De Guise, S., D. Martineau, P. Béland y M. Fournier. (1995). *Possible mechanisms of action of environmental contaminants on St. Lawrence beluga whales (Delphinapterus leucas)*. Environmental Health Perspectives 103(4): 73–77.
- Echániz Pellicer, G. 2016. *Evaluación de la legislación mexicana, capacidad e infraestructura del manejo del mercurio en México*. 2016: 1-80.

- Evers, D. C., Y. Han, C.T. Driscoll, N.C. Kamman, M.W. Goodale, K.F. Lambert, T.M. Holsen, C.Y. Chen, T.A. Clair y T. Butler. *Biological mercury hotspots in the Northeastern United States and Southeastern Canada*. BioScience 57(1): 29-43.
- Fitzgerald, W.F y T. Clarkson. 1991. *Mercury and monomethylmercury: Present and future concerns*. Environmental Health Perspectives 96: 159-166.
- Gębka, K., J. Bełdowski y M. Bełdowska. 2016. *The impact of military activities on the concentration of mercury in soils of military training grounds and marine sediments*. Environmental Science and Pollution Research 23: 23103-23113.
- Iqbal, K y M. Asmat. 2012. *Uses and effects of mercury in medicine and dentistry*. Journal of Ayub Medical College Abbottabad 24 (3-4): 204-207.
- Khang, M.A.K y Wang, F. 2009. *Mercury-selenium compounds and their toxicological significance: Toward a molecular understanding of the mercury-selenium antagonism*. 28 (8): 1567-1577.
- Lalancette, A., Y. Morin, L. Measures y M. Fournier. (2003). *Contrasting changes of sensitivity by lymphocytes and neutrophils to mercury in developing grey seals*. Developmental and Comparative Immunology 27(8): 735-747.
- Lian, M., C.L. Field, E. van Wijngaarden, C. Rios, M.J. Castellini, D.J. Greig, L.D. Rea, D.J. Coleman, C.E. Thomson, F.M.D. Gulland y T.M. O'Hara. 2021. *Assessment of clinical outcomes associated with mercury concentrations in harbor seal pups (Phoca vitulina richardii) in central California*. The Science of the Total Environment 758: 143686.
- Lian, M., J.M. Castellini, T. Kuhn, L. Rea, L. Bishop, M. Keogh, S.N. Kennedy, B. Fadely, E. van Wijngaarden, J.M. Maniscalco y T.M. O'Hara. 2020. *Assessing oxidative stress in Steller sea lions (Eumetopias jubatus): Associations with mercury and selenium concentrations*. Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology 235.
- Marshall, B.G., A.A. Camacho, G. Jimenez y M.M. Veiga. 2021. *Mercury challenges in Mexico: Regulatory, trade and environmental impacts*. Atmosphere 12(1): 57-78.
- Mercado Libre México. 2022. En: <https://listado.mercadolibre.com.mx/mercurio>. (Consultado 06/09/2022).
- Minamata Convention on Mercury. 2021. *About*. En: <https://www.mercuryconvention.org/en/about>. (Consultado el 02/04/2022).
- Newman, M.C. 2015. *Fundamentals of ecotoxicology: The science of pollution*. 4th ed. CRC Press, Boca Raton, Estados Unidos.
- Nriagu, J.O. 1993. *Legacy of mercury pollution*. Nature 363: 589.

- Nriagu, J.O. 1994. *Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas*. The Science of the Total Environment 149: 167-181.
- Pruitt, S. 2020. *The surprising role Mexico played in World War II*. En: <https://www.history.com/news/mexico-world-war-ii-surprising-involvement>. (Consultado el 06/09/2022).
- Roane, T.M., I.L. Pepper y T.J. Gentry. 2015. *Microorganisms and metal pollutants*. In: Pepper IL, Gerba CP, Gentry TJ (eds) Environmental Microbiology, 3rd ed. Academic Press, pp 415–439.
- Rustagi, N y R. Singh. 2010. *Mercury and health care*. Indian Journal of Occupational and hEnvironmental Medicine 14 (2): 45-48.
- Saturday, A. 2018. *Mercury and its associated impacts on environment and human health: A review*. Journal of Environment and Health Science 4 (2): 37-43.
- Selin, N.E. 2009. *Global biogeochemical cycling of mercury*. The Annual Review of Environment and Resources 34: 43-63.
- Shibata, Y., M. Morita y K. Fuwa. 1992. *Selenium and arsenic in biology: their chemical forms and biological functions*. Advances in Biophysics 28: 31–80.
- Sinicropi, M.S., D. Amantea, A. Caruso y C. Saturnino. 2010. *Chemical and biological properties of toxic metals and use of chelating agents for the pharmacological treatment of metal poisoning*. Archives of Toxicology 84: 501-520.
- UNEP (United Nations Environmental Programme). 2013. *Minamata Convention on Mercury: Text and annexes*. En: <https://www.unep.org/resources/report/minamata-convention-mercury-text-and-annexes>. (Consultado el 15/05/2022).
- Wisniak, J. 2008. *The history of mercury. From discovery to incommodity*. Revista CENIC Ciencias Químicas 39 (3): 147-157.
- Wisniak, J. 2012. *Edward Charles Howard: Explosives, meteorites, and sugar*. Educación Química 23(2): 230-239. Wujastyk, D. 2015. *Histories of mercury in medicine across Asia and beyond*. Asia 69 (4): 819-830.

Cita:

Symon T.A., Murillo Cisneros D.A. y Zenteno Savín T. 2022. El mercurio y su uso histórico en México. Recursos Naturales y Sociedad, 2022. Vol. 8 (2): 49-62.<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2022.08.08.02.0005>

Sometido: 3 de julio de 2022

Revisado: 13 de agosto de 2022

Aceptado: 23 de octubre de 2022

Editor asociado: Dr. Ramón Gaxiola Robles. Editor Asociado

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández