

El mercurio y su efecto en el material genético

Mercury effects on genetic material

Martín Gabriel Frías-Espéricueta*✉, Marisela Aguilar-Juárez*, Sarahí Roos-Muñoz**, Carmen Cristina Osuna-Martínez*, Carolina Delgado-Álvarez***, Carolina Bojórquez***, Juan Carlos Bautista-Covarrubias****, Isidro Osuna-López*****, Mario Nieves-Soto*

Frías-Espéricueta, M. G., Aguilar-Juárez, M., Roos-Muñoz, S., Osuna-Martínez, C. C., Delgado-Álvarez, C., Bojórquez, C., & Nieves-Soto, M. (2022). El mercurio y su efecto en el material genético. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 30(86), e3437, <https://doi.org/10.33064/iycuaa2022863437>

RESUMEN

El mercurio es uno de los metales tóxicos de mayor preocupación ambiental. En la presente revisión se muestran los principales aportes antropogénicos de este elemento al ambiente y, en particular, algunos datos del aporte de mercurio a los océanos. Además, se revisaron estudios en donde se evaluó el daño en el material genético (e.g. ácido desoxirribonucleico) por exposición al mercurio en humanos.

Palabras clave: mercurio; efectos; ADN; cáncer.

Recibido: 24 de noviembre de 2021, Aceptado: 18 de julio de 2022

*Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa. Paseo Claussen s/n, Mazatlán, C. P. 82000, Sinaloa, México. Correo electrónico: friasm@uas.edu.mx; maguilar@uas.edu.mx; carmen.cristina.osuna@uas.edu.mx; direccion.dgip@uas.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3729-1986>; <https://orcid.org/0000-0003-0862-5542>; <https://orcid.org/0000-0003-4934-5790>; <https://orcid.org/0000-0001-6624-5068>

**Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Mazatlán. Corsario 1 No. 203, Col. Urías, Mazatlán, Sinaloa, C. P. 82070, México. Correo electrónico: saromu2@hotmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7954-0354>

***Universidad Politécnica de Sinaloa. Carretera Municipal Libre km 3, Mazatlán-Higueras Colonia Genaro Estrada, Mazatlán, C. P. 82199, Sinaloa, México. Correo electrónico: cdelgado@upsin.edu.mx; cbojorquez@upsin.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0787-9997>; <https://orcid.org/0000-0002-3371-059X>

****Unidad Académica Escuela Nacional de Ingeniería Pesquera, Universidad Autónoma de Nayarit. Bahía de Matanchén, San Blas, C. P. 63740, Nayarit, México. Correo electrónico: juanb@uan.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4790-9898>

*****Universidad Autónoma de Occidente. Blvd. Lola Beltrán s/n, Culiacán, C. P. 80020, Sinaloa, México. Correo electrónico: isidro.lopez@udo.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7063-0954>

✉ Autor para correspondencia

ABSTRACT

Mercury is a toxic metal of high environmental concern. This review shows the main anthropogenic sources of this element in the environment and the mercury contribution to oceans. In addition, studies evaluating damage to genetic material (e.g. deoxyribonucleic acid) from mercury exposure in humans were revised.

Keywords: mercury; effects; DNA; cancer.

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental inició desde que el hombre dominó el fuego (Nriagu, 1996) y a partir de entonces se ha estado contaminando el ambiente a través de diversas actividades (Soegianto et al., 2020); donde sobresalen la minería, agricultura, industria y urbanización (Wu et al., 2016). Actualmente la problemática ambiental es de gran preocupación; donde la concentración de metales (como el mercurio) aumenta como consecuencia de las diversas actividades humanas (Paéz-Osuna et al., 2017).

El mercurio (Hg) puede resultar muy peligroso, incluso en mínimas cantidades, dado que diversos estudios han demostrado los múltiples efectos que el mercurio tiene a nivel organismo, por lo que en el presente artículo se exponen las afectaciones genéticas directas a la cadena del ácido nucleico ADN (ácido desoxirribonucleico). Por lo anterior, en el presente trabajo se presentan los resultados de estudios realizados en personas trabajadoras de minas que han presentado enfermedades relacionadas con la exposición al mercurio.

DESARROLLO

¿Cómo llega el mercurio al ambiente? Sundseth, Pacyna, Pacyna, Pirrone y Thorne (2017) reportan que las emisiones globales de mercurio se estiman hasta 4,070 t/año, las cuales son transportadas vía atmósfera a lugares muy distantes de su fuente original. Las actividades humanas más comunes que también aportan grandes cantidades de mercurio al ambiente son la minería, las industrias relacionadas con la producción de sosa cáustica y de pinturas, las actividades metalúrgicas, residuos dentales y la quema de carbón (hidroeléctricas) (figura 1) (De Almeira Rodríguez, Gomes Ferrari, Neves dos Santos, & Conte Junior, 2019; United States Environmental Protection Agency, 26 de abril de 2020). Otras fuentes de mercurio son la agricultura y las lámparas fluorescentes caseras (Al-azzawie, Umran, & Hyader, 2013). De acuerdo con la United Nations Environment Programme (2019) a nivel global la minería a pequeña escala y artesanal emiten 37.7% de mercurio al ambiente y esta actividad es muy frecuente en los países en desarrollo (Veiga, Maxson, & Hylander, 2006) como México. Se calcula que el mercurio tiene un aporte de 3.8×10^9 g/año a los océanos a través de la atmósfera, mientras que 0.3×10^9 g/año entran a través de los ríos (Outridge, Mason, Wang, Guerrero, & Heimbürger-Boavida, 2018).

Streets, Zhang y Wu (2009) proyectan que las emisiones de Hg a nivel global pudieran incrementar hasta 96% para el año 2050 y dicho incremento sería ocasionado principalmente por los países desarrollados/en desarrollo de Asia.



Figura 1. Fuentes de mercurio al ambiente.
Elaboración propia.

¿Por qué el mercurio es preocupante? El mercurio se encuentra disponible en el ambiente donde los organismos (incluido el hombre) lo pueden incorporar a sus tejidos (vía respiración y/o alimentación) y en función del tiempo de exposición y de la concentración de mercurio que entra al cuerpo, pueden ocurrir efectos tóxicos a nivel fisiológico, celular y bioquímico (Páez Osuna & Frías Espéricueta, 2011). Este elemento se puede encontrar tanto en formas orgánicas como inorgánicas (ambas tóxicas); pero debido a que las formas orgánicas tienen mayor solubilidad en lípidos éstas atraviesan más fácilmente la membrana celular y pueden acumularse en los tejidos, provocando daño a las células (Crespo-López et al., 2009). Por ejemplo, el mercurio que está en los termómetros tiene una forma inorgánica y es menos tóxico; sin embargo, cuando éste llega a cuerpos de agua como lagunas costeras con ayuda de algunas bacterias se transforma a su forma química orgánica (como el metilmercurio).

Otra fuente común de mercurio a los humanos es a través del alimento, ya que este metal al llegar a los cuerpos acuáticos se encuentra disponible y se acumula en los tejidos de diversas especies acuáticas (Jara-Marini, Molina-García, Martínez-Durazo, & Páez-Osuna, 2020; Zahir, Rizwi, Haq, & Khan, 2005) como tiburones, pez espada, entre otros. Por tanto, aquellas poblaciones (como las de regiones costeras) que tienen alto consumo de productos de la pesca, están más expuestas a incorporar mercurio a sus tejidos. Por ejemplo, Delgado-Alvarez et al. (2017) reportaron que habitantes de campos pesqueros de la zona costera de Sinaloa, México presentan mayor riesgo por el mercurio que personas habitando en ciudades.

El ADN: ácido desoxirribonucleico

La célula es un componente fundamental de los organismos vivos y los organelos que la componen le dan soporte y la energía necesaria para que lleve a cabo sus funciones (Herrera Paz, 2018). Entre sus componentes principales están el núcleo, el cual está rodeado por una membrana que resguarda el genoma que contiene el material genético que se hereda (a los hijos) y que se conoce como ácido desoxirribonucleico (ADN) (Wold, Rich, Weeks, & Lutter, 2020). El ADN es una macromolécula que se considera el componente principal de los cromosomas y es conocida como la molécula de la vida (Herrera Paz, 2018).

El ADN tiene una estructura flexible de gran tamaño que se encuentra de forma compacta en los cromosomas, durante el desarrollo de un individuo se encarga de resguardar y transmitir el material hereditario entre generaciones (Herrera Paz, 2018; Illana, 2014). Por tanto, el ADN regula y coordina el funcionamiento celular y se encarga de la transmisión de la información, control de la duplicación, reparación, autorregulación y reproducción de cada organismo (Herrera Paz, 2018). La conformación estructural de la molécula del ADN tiene la apariencia de una doble hélice formado por dos cadenas de nucleótidos (Illana, 2014; Wold et al., 2020). Los nucleótidos son las unidades estructurales básicas de la molécula del ADN y están formados por una base nitrogenada, un azúcar y uno o más grupos fosfato (Illana, 2014). En la molécula del ADN se encuentran dos tipos de bases nitrogenadas; las bases purínicas y las pirimidínicas, que comprenden a los nucleótidos adenina y guanina (bases purínicas) y citosina y timina (bases pirimidínicas); las cuales, al ser complementarias entre sí, permiten realizar las funciones del ADN (Illana, 2014).

Exposición al mercurio y sus efectos a nivel genético

El mercurio es uno de los metales que tienen la capacidad de unirse a la molécula de ADN y provocar daños considerables. En la tabla 1 se presentan algunos daños reportados en humanos.

Tabla 1
Efectos del mercurio en el ADN de humanos

Referencia	Efectos del Hg en el ADN humano	Consecuencias del daño al ADN
Rao et al. (2001), Skalny et al. (2022)	Reacción con grupos sulfídricos (-SH) de las proteínas e inhibición enzimática	Alteración de la información genética y de la fidelidad de la replicación. Inhibición de la reparación de los mecanismos de reparación del ADN.
Rao et al. (2001)	Generación de ROS	Rompimiento de la cadena de ADN.
Guillé et al. (1981), Rao et al. (2001)	Al unirse con el ADN alteración de las pares de bases	Mutaciones
Guillé et al. (1981), Rao et al. (2001).	Al unirse con el ADN formación de enlaces cruzados entre las cadenas de ADN	Mutaciones
Skalny et al. (2022)	Oxidación de los ácidos nucleicos	Roturas de doble cadena, mayor frecuencia. Aberraciones cromosómicas (alteración de su estructura)

Nota: Elaboración propia.

Como consecuencia de esta unión del mercurio al ADN se pueden citar algunos estudios en donde se documentan los efectos en humanos. Al respecto, Zahir et al. (2005) indica que el mercurio se asocia con problemas neurológicos, cardíacos, inmunológicos, nefrológicos, motores, reproductivos y genéticos, entre otros. Algunos de estos efectos han sido observados en personas expuestas en sus lugares de trabajo. Por ejemplo, en un estudio realizado en la orina de mineros de la región de Wanshan, China encontraron altos niveles de mercurio en aquellos mineros que también reportaron daño al ADN mediante indicadores de estrés oxidativo en la sangre (Chen et al., 2005).

Cebulska-Wasilewska, Panek, Żabiński, Moszczyński y Au (2005) y Al-azzawie et al. (2013) determinaron daño al ADN e inhibición en su reparación en linfocitos de trabajadores de una industria cloro-alkali (que produce cloro e hidróxido de sodio) ubicada en Polonia e Irak, respectivamente, en la cual estuvieron expuestos al mercurio de manera crónica (continua por largo tiempo). Por su parte, en otra región de China (SE), Xu et al. (2018) determinaron que 62.1% de niños que viven alrededor de una zona que recibe desperdicios electrónicos tuvieron un valor de Hg en su sangre $>10 \mu\text{g/dL}$ y esto fue relacionado con indicadores de daño al ADN.

Como se mencionó anteriormente el mercurio tiene varios efectos en el humano; y otro efecto importante es el del daño al material genético, de ahí que también es considerado un contaminante genotóxico y dichos efectos se han documentado aun a niveles ambientales relativamente bajos de mercurio (Zahir et al., 2005). Este daño genotóxico del mercurio puede ser mediante diversos mecanismos (Crespo-López et al., 2009): (1) mediante unión directa a la molécula del ADN (Li, Jiang, & Yan, 2006), dado que el mercurio y sus compuestos orgánicos e inorgánicos pueden reaccionar con las bases púricas (adenina y guanina) y pirimidínicas (timina y citosina) del ADN. Por ejemplo, el metilmercurio tiene afinidad por la guanina y citosina, mientras que el etilmercurio por la adenina y citosina; y el mercurio inorgánico se une de preferencia a la timina (figura 2).

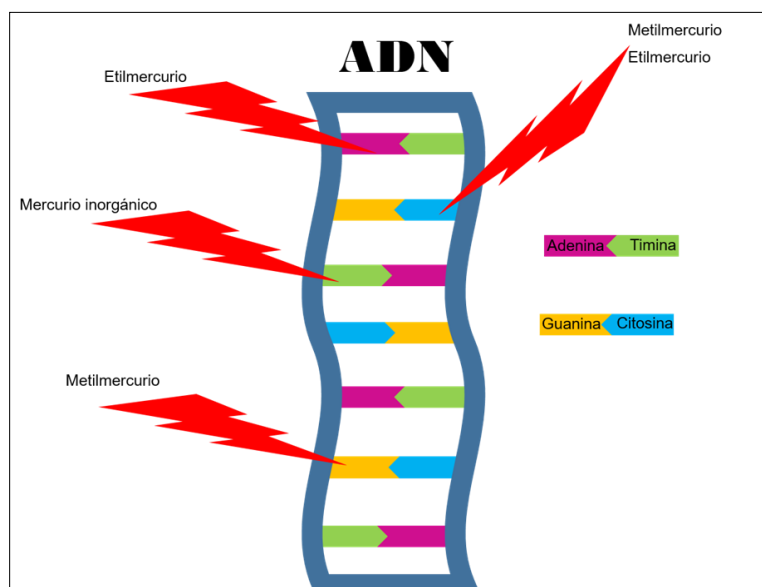


Figura 2. Unión del mercurio y sus compuestos a las bases púricas (adenina y guanina) y pirimidínicas (timina y citosina) del ADN. Elaboración propia.

Otros de los mecanismos con los que el mercurio causa daño genotóxico es mediante: (2) la formación indirecta de radicales libres que son generados durante el estrés oxidativo (Halliwell & Gutteridge, 2015) y se unen directamente a la molécula del ADN (Crespo-López et al., 2009); (3) el mercurio se une a las enzimas que reparan daños en el ADN, alterando la estructura de la enzima y su actividad, volviéndola incapaz de reparar el ADN (Asmuß, Mullenders, & Hartwig, 2000). Cuando un individuo ha sido expuesto a contaminantes genotóxicos las consecuencias son efectos teratogénicos (malformaciones congénitas o cambios en la fisionomía de los recién nacidos) y carcinogénicos (cáncer). En lo que se refiere a efectos teratogénicos por exposición al mercurio se han reportado efectos a nivel del sistema nervioso central, con consecuencias en las funciones del lenguaje y motoras (estabilidad y movimiento), de atención y de memoria y del campo visual (NRC, 2000).

Con respecto a la aparición de cáncer por exposición al mercurio los científicos no se han puesto de acuerdo, debido a ciertos factores que no permiten concluirlo. Dicha diferencia de opiniones se debe a la presencia de múltiples factores de confusión. Por ejemplo, Boffeta et al. (1998) reportaron la presencia de cáncer de pulmón y de hígado en 6,784 hombres y 265 mujeres que trabajaron en minas de cuatro países de Europa y que estuvieron expuestos al mercurio. Pero debido a que en esas minas los trabajadores también estuvieron expuestos a sílice, los autores no pudieron concluir que la aparición de cáncer fue por la exposición al mercurio.

Sin embargo, Janicki, Dobrowolski y Kraśnicki (1987) reportaron que las personas que estuvieron expuestas a fungicidas que contenían mercurio y tenían una concentración de 1.24 µg/g de mercurio en su cabello (la cantidad de mercurio en el cabello es considerado un marcador de exposición a este elemento) desarrollaron leucemia aguda. Asimismo, el estudio de Kinjo et al. (1996) reportó que aquellas personas de la ciudad de Minamata (Japón) que estuvieron expuestas al mercurio por el pescado consumido tuvieron un factor de riesgo de muerte por leucemia ocho veces mayor que aquellos que no estuvieron expuestos al contaminante. Por lo anterior, la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) y la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) han considerado al mercurio como un potencial (que puede ser) agente carcinogénico.

CONCLUSIONES

Los estudios demuestran un incremento en los niveles de concentración de mercurio en el ambiente. Además, existen varios estudios que presentan evidencia del daño del mercurio al ADN de seres humanos, lo que puede provocar alteraciones en su molécula. La exposición al mercurio de ciertos trabajadores puede repercutir en su salud, principalmente en minas donde se extrae oro, en que la exposición al mercurio ha sido relacionada con leucemia, entre otros efectos. De manera general, el consumo de ciertos peces es considerado como la principal exposición del hombre al mercurio, por lo que es importante estar monitoreando el nivel de concentración de mercurio en los peces de importancia comercial y realizar estudios para monitorear el contenido de mercurio en el cuerpo de personas expuestas a este metal y de este modo relacionarlo con ciertas enfermedades.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al proyecto PROFAPI-UAS clave PRO_A1_023.

REFERENCIAS

- Al-azzawie, H. F., Umran, A., & Hyader, N. H. (2013). Oxidative stress, antioxidant status and DNA damage in mercury exposure workers. *British Journal of Pharmacology and Toxicology*, 4(3), 80-88. doi: 10.19026/bjpt.4.5367
- Asmuß, M., Mullenders, L. H. F., & Hartwig, A. (2000). Interference by toxic metal compounds with isolated zinc finger DNA repair proteins. *Toxicology Letters*, 112-113, 227-231. doi: 10.1016/s0378-4274(99)00273-8
- Boffeta, P., Garcia-Gómez, M., Pompe-Kirn, V., Zaridze, D., Bellander, T., Bulbulyan, M., ... Merler, E. (1998). Cancer occurrence among European mercury miners. *Cancer Causes & Control*, 9(6), 591-599. doi: 10.1023/a:1008849208686
- Cebulska-Wasilewska, A., Panek, A., Żabiński, Z., Moszczyński, P., & Au, W. W. (2005). Occupational exposure to mercury vapour on genotoxicity and DNA repair. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 586(2), 102-114. doi: 10.1016/j.mrgentox.2005.06.009
- Chen, C., Qu, L., Li, B., Xing, L., Jia, G., Wang, T., ... Chai, Z. (2005). Increased oxidative DNA damage, as assessed by urinary 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine concentrations, and serum redox status in persons exposed to mercury. *Clinical Chemistry*, 51(4), 759-767. doi: 10.1373/clinchem.2004.042093
- Crespo-López, M. E., Macêdo, G. L., Pereira, S. I. D., Arrifano, G. P. F., Picanço-Diniz, D. L. W., do Nascimento, J. L. M., & Herculano, A. M. (2009). Mercury and human genotoxicity: Critical considerations and possible molecular mechanisms. *Pharmacological Research*, 60(4), 212-220. doi: 10.1016/j.phrs.2009.02.011
- De Almeida Rodríguez, P., Gomes Ferrari, R., Neves dos Santos, L., & Conte Junior, C. A. (2019). Mercury in aquatic fauna contamination: A systematic review on its dynamics and potential health risks. *Journal of Environmental Sciences*, 84, 205-218. doi: 10.1016/j.jes.2019.02.018
- Delgado-Alvarez, C. G., Frías-Espéricueta, M. G., Ruelas-Inzunza, J., Becerra-Álvarez, M. J., Osuna-Martínez, C. C., Aguilar-Juárez, M., ... Voltolina, D. (2017). Total mercury in muscle and liver of *Mugil* spp. from three coastal lagoons of NW Mexico: Concentrations and risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(7), 312. doi: 10.1007/s10661-017-6020-5
- Guillé, E., Grisvard, J., & Sissoëff, I. (1981). Structure and function of metallo-DNA in the living cell. En D. F. Williams (Ed.), *Systemic aspects of biocompatibility* (pp. 39-141). FL, US: CRC Press.
- Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. C. (2015). *Free radicals in biology and medicine* (5ª ed.). NY, US: Oxford University Press. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198717478.001.0001
- Herrera Paz, E. F. (2018). ADN, disco duro de la vida. *Revista Médica Hondureña*, 86(1-2), 75-85. Recuperado de <http://www.bvs.hn/RMH/pdf/2018/pdf/Vol86-1-2-2018-21.pdf>
- Illana, C. J. (2014). Biología molecular y estructura del ADN. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 110(3), 234-240. Recuperado de <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/564/623>
- Janicki, K., Dobrowolski, J., & Kraśnicki, K. (1987). Correlation between contamination of the rural environment with mercury and occurrence of leukemia in men and cattle. *Chemosphere*, 16(1), 253-257. doi: 10.1016/0045-6535(87)90129-9

- Jara-Marini, M. E., Molina-García, A., Martínez-Durazo, A., & Páez-Osuna, F. (2020). Trace metal trophic transference and biomagnification in a semiarid coastal lagoon impacted by agriculture and shrimp aquaculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(5), 5323-5336. doi: 10.1007/s11356-019-06788-2
- Kinjo, Y., Akiba, S., Yamaguchi, N., Mizuno, S., Watanabe, S., Wakamiya, J., ... Kato, H. (1996). Cancer mortality in Minamata disease patients exposed to methylmercury through fish diet. *Journal of Epidemiology*, 6(3), 134-138. doi: 10.2188/jea.6.134
- Li, Y., Jiang, Y., & Yan, X.-P. (2006). Probing mercury species-DNA interactions by capillary electrophoresis with on-line electrothermal atomic absorption spectrometric detection. *Analytical Chemistry*, 78(17), 6115-6120. doi: 10.1021/ac060644a
- National Research Council. (2000). *Toxicological effects of methylmercury*. DC, US: National Academies Press.
- Nriagu, J. O. (1996). A history of global metal pollution. *Science*, 272(5259), 223. doi: 10.1126/science.272.5259.223
- Outridge, P. M., Mason, R. P., Wang, F., Guerrero, S., & Heimbürger-Boavida, L. E. (2018). Updated global and oceanic mercury budgets for the United Nations Global Mercury Assessment 2018. *Environmental Science & Technology*, 52(20), 11466-11477. doi: 10.1021/acs.est.8b01246
- Páez Osuna, F., & Frías Espericueta, M. G. (2011). Principios de ecotoxicología. En F. Páez Osuna (Ed.), *Metales en camarón de cultivo y silvestre: Importancia, efectos y transferencia trófica* (pp. 31-54). D. F., México: El Colegio de Sinaloa.
- Páez-Osuna, F., Álvarez-Borrego, S., Ruiz-Fernández, A. C., García-Hernández, J., Jara-Marini, M. E., Bergés-Tiznado, M. E., ... Sanchez-Cabeza, J.-A. (2017). Environmental status of the Gulf of California: A pollution review. *Earth-Science Reviews*, 166, 181-205. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.01.014
- Rao, M. V., Chinoy, N. J., Suthar, M. B., & Rajvanshi, M. I. (2001). Role of ascorbic acid on mercuric chloride-induced genotoxicity in human blood cultures. *Toxicology in Vitro*, 15(6), 649-654. doi: 10.1016/s0887-2333(01)00081-9
- Skalny, A. V., Aschner, M., Sekacheva, M. I., Santamaria, A., Barbosa, F., Ferrer, B., ... Tinkov, A. A. (2022). Mercury and cancer: Where are we now after two decades of research? *Food and Chemical Toxicology*, 164, 113001. doi: 10.1016/j.fct.2022.113001
- Soegianto, A., Putranto, T. W. C., Luffi, W., Almirani, F. N., Hidayat, A. R., Muhammad, A., ... Hidayati, D. (2020). Concentrations of metals in tissues of cockle *Anadara granosa* (Linnaeus, 1758) from East Java coast, Indonesia, and potential risk to human health. *International Journal of Food Science*, 2020, 5345162. doi: 10.1155/2020/5345162
- Streets, D. G., Zhang, Q., & Wu, Y. (2009). Projections of global mercury emissions in 2050. *Environmental Science & Technology*, 43(8), 2983-2988. doi: 10.1021/es802474j
- Sundseth, K., Pacyna, J. M., Pacyna, E. G., Pirrone, N., & Thorne, R. J. (2017). Global sources and pathways of mercury in the context of human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1), 105. doi: 10.3390/ijerph14010105
- United Nations Environment Programme. (2019). *Global Mercury Assessment 2018* [Documento en pdf descargable]. Ginebra, Suiza: UN Environment Programme Economy Division-Chemicals Health Branch International Environment House. Recuperado de <https://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018>
- United States Environmental Protection Agency. (26 de abril de 2020). Mercury emissions: The global context [Página de Internet]. US: Autor. Recuperado de <https://www.epa.gov/international-cooperation/mercury-emissions-global-context>
- Veiga, M. M., Maxson, P. A., & Hylander, L. D. (2006). Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining. *Journal of Cleaner Production*, 14(3-4), 436-447. doi: 10.1016/j.jclepro.2004.08.010

- Wold, M. S., Rich, A., Weeks, D., & Lutter, L. C. (2020). Deoxyribonucleic acid (DNA). *AccessScience*. doi: 10.1036/1097-8542.186500
- Wu, X., Cobbina, S. J., Mao, G., Xu, H., Zhang, Z., & Yang, L. (2016). A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(9), 8244-8259. doi: 10.1007/s11356-016-6333-x
- Xu, X., Liao, W., Lin, Y., Dai, Y., Shi, Z., & Huo, X. (2018). Blood concentrations of lead, cadmium, mercury and their association with biomarkers of DNA oxidative damage in preschool children in an e-waste recycling area. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(4), 1481-1494. doi: 10.1007/s10653-017-9997-3
- Zahir, F., Rizwi, S. J., Haq, S. K., & Khan, R. H. (2005). Low dose mercury toxicity and human health. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 20(2), 351-360. doi: 10.1016/j.etap.2005.03.007



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material
La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.