



O caso do mercúrio: Toxicidade dos organomercuriais¹

Wamber Broni de Souza², Genilson Pereira Santana³

Resumo

O mercúrio é um metal que tem uma estreita relação com a humanidade. Foi altamente recomendado para o tratamento de várias doenças. No entanto, a descoberta dos seus efeitos tóxicos, tornaram o Hg uma preocupação mundial. Vários casos de contaminação foram relatados em que o mais conhecido é o da Cidade Minamata (Japão). Os habitantes de Minamata apresentaram sintomas da contaminação por metilmercúrio (metil-Hg), tais como disfunção neuronal, danos nos sistemas nervoso central. Este artigo apresenta as principais fontes de contaminação ambiental por mercúrio, bem como os efeitos tóxicos causados por compostos organomercuriais.

Palavras-Chave: organomercuriais, contaminação, tóxico, peixe.

Abstract

Mercury is a metal that has a close relationship with the humanity. It was highly recommended to treatment of various diseases. However, the discovery of its toxic effects, the Hg becomes a worldwide concern. Several cases of contamination have been reported in which the most known is the Minamata City (Japan). Minamata habitants showed symptoms of methyl mercury (methyl-Hg) contamination such as neural disfunction, damage to the central nervous systems. This article presents the main sources of enviromental contamination by mercury as well as the toxic effects caused by organomercury compounds.

Key-words: organomercury, contamination, toxic, fisher.

¹Parte da tese de Doutorado do primeiro autor junto à Universidade Federal do Amazonas

²Professor Assistente do Colegiado de Zootecnia da Universidade Federal do Amazonas, ICSEZ, Estrada Parintins-Macurany, 1805, Jacaréacanga, Parintins, Amazonas, email: wambersaa@ufam.edu.br

³Professor Associado do Departamento de Química da Universidade Federal do Amazonas – Depto de Química, ICE, Av. Gal. Rodrigo Octávio, 3.000, Coroado II, Manaus, Amazonas, e-mail: gsantana2005@gmail.com

1. Introdução

O Hg é um problema global, pois o vapor de Hg e os compostos organomercuriais voláteis podem viajar grandes distâncias na atmosfera (DASTOOR e LAROCQUE, 2004). O Hg elementar é oxidado e os organomercuriais se decompõem ambos em Hg^{2+} , por reações com o ozônio ou pelos radicais hidroxilas ou halogênios da atmosfera. Os íons Hg^{2+} são solvatados pelas moléculas de água e depositam-se pela chuva. Assim, podem ocorrer depósitos de Hg bem longe das fontes de emissão, e ele acaba sendo distribuído quase que uniformemente ao redor do globo (PACYNA et al., 2010).

O Hg e seus compostos são usados para fins industriais, medicamentos, cosmético, produção de cloro-álcalis, em dispositivos de fiação e interruptores, instrumentos de medição e controle, iluminação e tratamento dentário.

Ele ocorre naturalmente no ambiente, podendo ser encontrado em sua forma elementar (metálico), inorgânico, e formas orgânicas (RODRÍGUEZ et al., 2012). Comumente ele está associado a outros elementos químicos, principalmente enxofre. Geralmente, o Hg forma o minério cinábrio (HgS), que é um composto de cor vermelha ou preta de estruturas cristalinas hexagonal e cúbica, respectivamente. As maiores reservas estão concentradas na Itália e na Espanha (BATEMAN, 1978).

A Figura 1 apresenta o ciclo do Hg no ambiente. Observa-se que o Hg ocorre sob três estados de oxidação na forma inorgânica: Hg^0 , que se encontra principalmente na forma de gás, e duas formas oxidadas, íon mercuroso (Hg_2^{2+}), forma pouco estável em sistemas naturais, e o íon mercúrico (Hg^{2+}). Na forma orgânica, o Hg^{2+} se apresenta ligado covalentemente a um ou dois radicais orgânicos, sendo o metilmercúrio (metil-Hg - $HgCH_3^+$) e o dimetilmercúrio (dimetil-Hg ($Hg(CH_3)_2$), os organomercuriais mais comuns.

Grande parte da atividade de biometilação das bactérias redutoras de sulfato produz dimetil-Hg, que, sendo volátil, é liberado para a atmosfera. Outras bactérias possuem uma enzima (a metil-Hg liase) que quebra a ligação metil do metil-Hg e outra enzima (a metil-Hg redutase) reduzindo o Hg^{2+} resultante a Hg^0 ; este é um mecanismo de proteção para os microorganismos, livrando-os do Hg como Hg^0 volátil (SCHLUTER, 2000).

Em termos antrópicos o mercúrio é manipulado em fábricas que produzem

substâncias químicas, como cloro-álcali, que são consideradas fontes de contaminação de Hg (BIESTER et al., 2002; BERNAUS et al., 2006; REIS et al., 2009). Geralmente, nos distritos de mineração de Hg, o solo pode tornar-se poluído devido à natureza extensiva das atividades de mineração e refino (EGLER et al., 2006; FENG et al., 2006; LI et al., 2008).

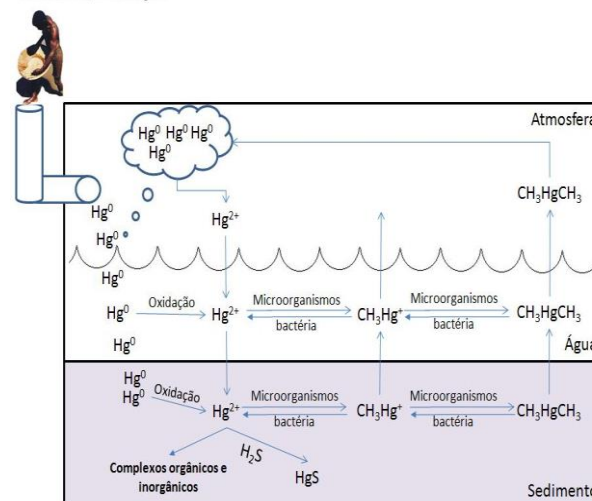


Figura 1 - Ciclo Biogeoquímico do Hg na natureza. (Adaptado: BAIRD, 2002)

Outra fonte, antrópica de contaminação de Hg, ocorre através da deposição atmosférica de Hg proveniente do refinamento de metais não ferrosos (RIEUWERTS e FARAGO, 1996; FENG et al., 2006; STAFILOV et al., 2010; LI et al., 2011).

Resíduos como baterias, equipamentos elétricos e eletrônicos, medidores de pressão arterial, lâmpadas fluorescentes e termômetros depositados em aterros sanitários são outra fonte de poluição por Hg (SEMU et al., 1986; KIM e KIM, 2002; KARUNASAGAR et al., 2006; HAN e SHIYAB, 2008; CHENG e HU, 2012). Solução de cloreto de Hg, também, é outra fonte de poluição. Elas são usadas para a preservação da madeira (BOLLE et al., 2008).

Os efeitos tóxicos do Hg fez com que esse metal seja o objeto de estudo de muitos pesquisadores ao redor do mundo (e.g. WU et al., 2013; GOODRICH, et al., 2013; MIKLAVCIC, et al., 2013; NG et al., 2013; SCHMIDT et al., 2013; SOUSSA, et al., 2013; LEINO et al., 2013; PARK et al., 2013).

A fim de demonstrar os efeitos tóxicos do Hg foram abordados os seguintes tópicos nesta revisão: os efeitos tóxicos, o Hg no ambiente e em

humano, bem como os organomercuriais (metil-Hg, dimetil-Hg, entre outros).

2. Metodologia

Para a realização desta revisão sobre o Hg foram consultadas obras desde os anos 70 até atual. Foram consultadas fontes bibliográficas como: *Scopus*, *Scirus*, *Pubmed*, *Chemical Abstract*, *SciELO*.

3. Efeitos tóxicos do Hg

O Hg está listado entre os elementos com altos índices de toxicidade para o homem e muitos animais (JARUP, 2003, ZAHIR et al., 2005). Praticamente, todos os compostos de Hg apresentam índices de toxicidades elevados para o homem, embora o Hg^0 tenha que ser oxidado a formas iônicas para mostrar efeitos tóxicos.

Isso ocorre normalmente devido à afinidade desse elemento pelos radicais sulfidrilas (SH) das proteínas, que interferem no metabolismo e na função celular pela capacidade de inativar os radicais SH das enzimas, inibindo o mecanismo enzimático, fundamental a oxidação celular ((BARBOSA et al., 1997; BRITO, 1998)

Dentre suas formas orgânicas, o metil-Hg é considerado mais tóxico (BONSIGNORE, et al., 2013). O metil-Hg é formado pela metilação do Hg inorgânico, sendo produzido por bactérias comuns em ambientes aquáticos (MYERS, et al., 2009). Quando entra na cadeia alimentar aquática, o metil-Hg é bioacumulado e bioconcentrado, principalmente em peixes (VAN DER VELDEN et al., 2013; CARBONELL et al., 2009).

A exposição ao metil-Hg leva a perda da visão (BARBONI et al., 2009; MELA et al., 2010); efeitos neurotóxicos e cardiovasculares em humanos (MEGLER et al., 2007; VIEIRA, et al., 2013); deficiência reprodutiva e mudança de comportamento na vida selvagem (SCHEUHAMMER et al., 2007);

O metil-Hg é absorvido pelo intestino ao tornar-se complexado pelo cloreto do estômago, formando o cloreto de metil-Hg (CH_3HgCl), o qual, sendo eletricamente neutro, pode atravessar as membranas. Uma vez dentro das células, o metil-Hg liga-se aos grupos tiolatos e se acumula. Experiências mostram que ocorrem variações mitocondriais, indução da peroxidação, disrupções, dos microtubos e quebra de proteínas (GOYER, 2000).

O metil-Hg é um poluente altamente neurotóxico que se acumula nos organismos e

biomagnifica ao longo da cadeia trófica. O metil-Hg passou a ter importância para os pesquisadores a partir do momento que foram encontrados altos níveis desse composto em organismos aquáticos e que esses altos níveis de metil-Hg não estava associada à entrada de compostos organomercuriais (BALOGH et al., 2002; DOMAGALSK et al., 2004; MARCELO et al., 2005).

3.1 O Hg no ambiente

A maioria do Hg presente em humanos está na forma de metil-Hg, quase todo se origina do peixe usado na alimentação. O Hg em peixes apresenta-se normalmente como metil-Hg (HOLSBECK et al., 1996; NAKAGAWA et al., 1997) Em contraste aos organoclorados, os quais predominam nas porções gordurosas de peixe, o metil-Hg pode ligar-se aos grupos sulfidrílicos em proteínas sendo distribuído por todo o peixe (ROBLEDO, 2012). Conseqüentemente, a parte que contém Hg não pode ser cortada antes de o peixe ser ingerido.

Os peixes absorvem o metil-Hg que está dissolvido na água pelas guelras (bioconcentração) ou pela alimentação (biomagnificação) (WATRAS et al., 1998; CARBONELL et al., 2009). A razão entre o metil-Hg no músculo do peixe e o dissolvido na água na qual o peixe nada é cerca de 1 milhão por um e pode exceder 10 milhões por um. A mais alta concentração de metil-Hg (acima de $1 \mu g g^{-1}$) é usualmente encontrada em carnívoros grandes e do final da cadeia alimentar marinha como tubarão, serra leal, peixe-paleta camelo, peixe espada e grandes atuns (vendidos como filés e sushi), e em espécies de água doce como robalo, truta e lúcio, em média, o peixe mais velho terá mais metil-Hg bioacumulado (MIKLAVCIC et al., 2013). Espécies não carnívoras como o peixe branco não acumulam muito Hg porque a biomagnificação na sua cadeia alimentar opera em uma extensão muito menor do que em peixes carnívoros.

Em lagos, o conteúdo de Hg em peixes é geralmente maior em águas ácidas, provavelmente por causa da solubilidade do Hg ser maior e a metilação de Hg ser mais rápida em pH mais baixo. Desta maneira, a acidificação de águas naturais indiretamente aumenta a exposição de peixes predadores ao metil-Hg (GREENFIELD et al., 2001; PICKHARDT e FISHER, 2007; JARDINE et al., 2012a;).



O tempo de meia-vida de compostos de Hg em humanos é de 44-56 dias (AL-SALEH et al., 2011), que é muito mais longo do que os sais de Hg^{2+} , em parte, pela maior solubilidade em um ambiente lipídico. Conseqüentemente, o metil-Hg pode-se acumular no organismo em concentrações muito maiores que as observadas no estado estacionário, mesmo que a pessoa consuma diariamente quantidades que, individualmente, não seriam prejudiciais.

A maioria dos problemas ambientais divulgados envolvendo o Hg está relacionada com o fato que a forma metilada é um veneno cumulativo. No entanto, em concentrações suficientemente altas, ele pode ser fatal. Em 1997, a pesquisadora Karen Wetterhahn, do Dartmouth College, morreu por envenenamento de Hg vários meses depois que uma ou duas gotas de dimetil-Hg puro aparentemente passaram pela luva de látex que ela usava enquanto trabalhava em experimento com o composto. Compostos de dialquil-Hg, incluindo dimetil-Hg, são também chamados de supertóxicos porque eles são muito tóxicos mesmo em pequenas quantidades (NIERENBERG et al., 1998).

Os sais de Hg são relativamente inofensivos, pois as membranas, que apresentam uma barreira de hidrocarbonetos às espécies iônicas, são impermeáveis ao Hg^{2+} . Da mesma forma, o Hg não é absorvido pelo intestino, de forma que ele não é tóxico quando ingerido. Entretanto o vapor de Hg é altamente tóxico, pois os átomos neutros passam através das membranas dos pulmões e também através da barreira sangue-cérebro (EPA, 1997; ATSDR, 1999; WHO, 1991). Uma vez no cérebro o Hg^0 é oxidado a Hg^{2+} pela energética atividade oxidante da mitocôndria das células do cérebro, e o Hg^{2+} liga-se fortemente a importantes grupos tiolatos das proteínas neuronais (YAO et al., 1999).

3.2 Compostos Organomercuriais

O Hg é uma neurotoxina poderosa, mas somente se ele chegar ao interior das células nervosas. Mais perigoso ainda do que o vapor de Hg são os organomercuriais, particularmente o metil Hg (WHO, 1991). A maior toxicidade dos compostos organomercuriais é explicada por sua maior absorção e menor excreção. As diferenças das manifestações clínicas dos compostos organomercuriais, quando comparadas com as produzidas pelos compostos inorgânicos, relacionam-se, sobretudo aos locais de

armazenamento no organismo. É importante ressaltar que os sintomas geralmente observados na intoxicação por compostos inorgânicos, raras vezes são observados na intoxicação por compostos organomercuriais (SALGADO et al., 1993).

Estudo de modelos de complexação de superfície indica que há três tipos de sítios ácidos na superfície da lignina: grupos carboxílicos alifáticos, carboxílicos aromáticos e fenólicos, grupos oxigenados que contribuem para a adsorção do Hg^{2+} . O modelo de complexação de superfície associado com a espectroscopia de raios X de absorção síncrotron tem mostrado que a espécie predominantes de adsorção de Hg^{2+} na lignina muda de $HgCl_2^0$ para o complexo monodentado $-C-O-HgCl$ e então o complexo bidentado $-C-O-Hg-O-C$ com aumento do valor de pH de 2,0 para 6,0 (LV, et al., 2012).

O Hg em sistemas naturais está presente em níveis extremamente baixos (5-50 pM), e nesse níveis, o Hg irá se ligar preferencialmente com sítios mais fortes (isto é, sítios reduzidos de enxofre) disponíveis na matéria orgânica. Haitzer et al. (2002) e Yin et al. (1997) demonstraram experimentalmente que quando a razão da concentração Hg/DOM ($240 \mu g Hg mg^{-1} DOM$) é alta o Hg irá se ligar a grupos oxigenados como grupos carboxílicos.

Estimativas sugerem que a redução abiótica de Hg^{2+} , principalmente por carbono orgânico dissolvido (DOC), poderia ser responsável por 10-70% da DGM lançado a partir de um fluxo de contaminantes (ALLARD e ARSENIE, 1991). Portanto, a reação entre Hg^{2+} e o carbono orgânico dissolvido desempenhar papel importante na transformação de Hg no ambiente. Como os grupos carboxílicos são um dos principais sítios de ligação no DOC para metais em concentração traços, o conhecimento sobre a redução da Hg^{2+} por moléculas relativamente pequenas de ácidos dicarboxílicos pode fornecer informações importantes sobre os mecanismos das reações complexas entre Hg^{2+} e macromoléculas orgânicas. Por outro lado, o oxigênio dissolvido é reportado como um agente que afeta a redução de Hg^{2+} por ácidos orgânicos (ALLARD e ARSENIE, 1991; BEUCHER et al., 2002; ABABNEH et al., 2006; PEHKONEN E LIN, 2011).

Estudos de difração de raios X e espectroscopia de absorção de estrutura fina (XAFS) mostram que a ligação de Hg na



superfície de carbono parece estar associada com oxigênio e os complexos de oxigênio superficiais são mais prováveis de fornecer sítios ativos para ligação do Hg^0 (LI et al., 2002). Entretanto não estão claros quais grupos funcionais oxigenados participam na adsorção do Hg^0 , em parte devido à falta de informação sobre a característica química dos carbonos testados (LI et al., 2003). Além disso, há controvérsia sobre o efeito da funcionalidade dos adsorventes de carbono ativado de superfície de oxigênio nas suas propriedades de adsorção de Hg (GRANITE et al., 2000; KWON et al., 2002; MAROTO-VALER et al., 2005) concluíram que complexos de superfície de oxigênio são os sítios ativos para captura de Hg^0 após conduzirem uma série de estudos em várias amostras com diferentes funcionalidades de superfície. Outros estudos mostraram que grupos funcionais oxigenados reduzem o Hg capturado pelo processo de fisiosorção (GRANITE et al., 2000; LEE e PARK, 2003; MAROTO-VALER et al., 2005).

4. Considerações finais

Essa revisão mostrou que dentre as formas mais tóxicas de Hg se encontra o metil-Hg, composto potencialmente tóxico ao ambiente e ser humano. Dentre as doenças podem ser citadas disfunção do sistema nervoso central, coordenação motora, doenças cardiovasculares, cegueira, entre outras, podendo levar até a morte.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela Bolsa de Doutorado.

Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. Os autores e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

Referências

ABABNEH, F. A.; SCOTT, S. L.; AL-REASI, H. A.; Lean, D. R. S. Photochemical reduction and reoxidation of aqueous mercuric chloride in the presence of ferrioxalate and air. *The Science of*

the total environment, v.367, n. (2-3), p.831-9, 2006. Doi: [10.1016/j.scitotenv.2006.02.018](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.018)

BATEMAN, A.M. *Yacimentos minerais de rendimento econômico*. Barcelona: Omega, 1978. 746p.

BRITO, D.F. *Toxicologia Humana Geral*. 2 ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 1998. p. 172-179.

AL-SALEH, I.; SHINWARI, N.; MASHHOUR, A.; EL, G.; MOHAMED, D.; RABAH, A. International Journal of Hygiene and Heavy metals (lead , cadmium and mercury) in maternal , cord blood and placenta of healthy women. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v.214, n.2, p.79-101, 2011. Doi: [10.1016/j.ijheh.2010.10.001](https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2010.10.001)

GOYER, R. A. N. *Toxicological effects of methylmercury*. Washington: National Academy Press. 2000. 344p.

JARDINE, T. D.; KIDD, K. A.; RASMUSSEN, J. B. Aquatic and terrestrial organic matter in the diet of stream consumers: implications for mercury bioaccumulation. *Ecological Applications*, v. 22, n. 3, p. 843-855, 2012. Doi [10.1890/11-0874.1](https://doi.org/10.1890/11-0874.1)

BERNAUS, A.; GAONA, X.;REE, D. V.; VALIENTE, M. Determination of mercury in polluted soils surrounding a chlor-alkali plant Direct speciation by X-ray absorption spectroscopy techniques and preliminary geochemical characterisation of the area. *Analytica Chimica Acta*, v. 565, p. 73-80, 2006. Doi: [10.1016/j.aca.2006.02.020](https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.02.020)

BIESTER, H.; MULLER, G.; SCHOLER, H. F. Estimating distribution and retention of mercury in three different soils contaminated by emissions from chlor-alkali plants: part I. *The Science of the Total Environment*, v. 284, p. 177-189, 2002. Doi: [10.1016/S0048-9697\(01\)00884-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00884-1)

BOLLEN, A.; WENKE, A.; BIESTER, H. Mercury speciation analyses in $HgCl_2$ -contaminated soils and groundwater – Implications for risk assessment and remediation strategies. *Water Research* v.42, p.91-100, 2008. Doi: [10.1016/j.watres.2007.07.011](https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.011)

BROUSSARD, L. A.; HAMMETT-STABLER, C. A.; WINECKER, R. E. The toxicology of mercury. *Laboratory medicine*, v.33, n.8, p.614-625, 2002.

MIKLAVCIC, A.; CASSETTA, A.; SNOJ, J.; MAZEJ, D.; KRŠNIK, M.; MARIUZ, M.; BARBONE, F.; HORVAT, M. Mercury arsenic and selenium



exposure levels in relation to fish consumption in the Mediterranean area. **Environmental Research**, v. 120, p. 7-17, 2013. Doi: [10.1016/j.envres.2012.08.010](https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.08.010)

CHENG, H.; HU, Y. Mercury in Municipal Solid Waste in China and Its Control: A Review. **Environmental science & technology**, v. 46, p. 593-605, 2012. Doi: [10.1021/es2026517](https://doi.org/10.1021/es2026517)

CLARKSON, T. W.; MAGOS, L.; MYERS, G. J. The Toxicology of Mercury – Current Exposures and Clinical Manifestations. **The new england journal of medicine**, v. 349, n. 18, p. 1731-1737, 2003. Doi: [10.1056/NEJMra022471](https://doi.org/10.1056/NEJMra022471)

COX, C.; CLARKSON, T. W.; MARSH, D. O.; AMIN-ZAKI, L.; TIKRITI, S.; MYERS, G. G. Dose-Response Analysis of Infants Prenatally Exposed to Methyl Mercury: An Application of a Single Compartment Model to Single-Strand Hair Analysis. **Environmental research**, v. 332, p. 318-332, 1989. Doi: [10.1016/S0013-9351\(89\)80075-1](https://doi.org/10.1016/S0013-9351(89)80075-1)

DASTOOR, A. P.; LAROCQUE, Y. Global circulation of atmospheric mercury: a modelling study. **Atmospheric Environment**, v.38, p. 147-161, 2004. Doi: [10.1016/j.atmosenv.2003.08.037](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.08.037)

DIETRICH, M. O.; MANTESE, C. E.; SOUZA, D. O.; FARINA, M. Motor impairment induced by oral exposure to methylmercury in adult mice. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 19, p. 169-175, 2005. Doi: [10.1016/j.etap.2004.07.004](https://doi.org/10.1016/j.etap.2004.07.004)

DOMAGALSKI, J. L.; ALPERS, C. N.; SLOTTON, D. G.; SUCHANEK, T. H.; AYERS, S. M. Mercury and methylmercury concentrations and loads in the Cache Creek watershed, California. **Science of the Total Environment**, v. 327, p. 215-237, 2004. Doi: [10.1016/j.scitotenv.2004.01.013](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.01.013)

EGLER, S. G.; RODRIGUES-FILHO, S.; VILLAS-BÔAS, R. C.; BEINHOFF, C. Evaluation of mercury pollution in cultivated and wild plants from two small communities of the Tapajós gold mining reserve, Pará State, Brazil. **The Science of the total environment**, v. 368, n. 1, p. 424-33, 2006. Doi: [10.1016/j.scitotenv.2005.09.037](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.037)

FENG, X. Gold mining related mercury contamination in Tongguan, Shaanxi Province, PR China. **Applied Geochemistry**, v.21, p. 1955-1968, 2006. Doi: [10.1016/j.apgeochem.2006.08.014](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.08.014)

FENG, X.; LI, G.; QIU, G. A preliminary study on mercury contamination to the environment from

artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang County, Guizhou, China: Part 2. Mercury contaminations to soil and crop. **Science of the Total Environment**, v.368, p. 47-55, 2006. Doi: [10.1016/j.scitotenv.2005.09.036](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.036)

PICKHARDET, P. C.; FISHER, N. S. Accumulation of Inorganic and Methylmercury by Freshwater Phytoplankton in Two Contrasting Water Bodies. **Environment Science Technology**, v. 41, n. 1, p. 125-131, 2007. Doi: [10.1021/es060966w](https://doi.org/10.1021/es060966w)

DE FLORA, S.; BENNICELLI, C.; BAGNASCO, M. Genotoxicity of mercury compounds. A review. **Mutation Research**, v.317, p.57-79, 1994. Doi: [10.1016/0165-1110\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0165-1110(94)90012-4)

GOODRICH, J. M.; WANG, Y.; GILLESPIE, B.; WERNER, R.; FRANZBLAU, A.; BASU, N. Methylmercury and elemental mercury differentially associate with blood pressure among dental professionals. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v.216, n. 2, p.195-201, 2013. Doi: [10.1016/j.ijheh.2012.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.03.001)

GREENFIELD, B. K.; HRABIK, T. R.; HARVEY, C. J.; CARPENTER, S. R. Predicting mercury levels in yellow perch: use of water chemistry, trophic ecology, and spatial traits. **Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences**, v.58, p.1419-1429, 2001. Doi: [10.1139/cjfas-58-7-1419](https://doi.org/10.1139/cjfas-58-7-1419)

NIERENBERG, D. W.; ORDGREN, R.E.; CHANG, M. B.; SIEGLER, R. W.; BLAYNEY, M. B.; HOCHBERG, F.; TORIBARA, T. Y.; CERNICHIARI, ELSA.; CLARKSON, T. Delayed cerebellar disease and death after accidental exposure to dimethylmercury. **The New England Journal of Medicine**, v.338, n.27, p.1672-1676, 1998. Doi: [10.1056/NEJM199806043382305](https://doi.org/10.1056/NEJM199806043382305)

JÄRUP, L. Hazards of heavy metal contamination. **British Medical Bulletin**, v.68, p.167-182, 2003. Doi: [10.1093/bmb/ldg032](https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032)

KARUNASAGAR, D.; KRISHNA, M. V. B.; ANJANEYULU, Y.; ARUNACHALAM, J. Studies of mercury pollution in a lake due to a thermometer factory situated in a tourist resort: Kodaikkanal, India. **Environmental Pollution**, v. 143, p. 153-158, 2006. Doi: [10.1016/j.envpol.2005.10.032](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.10.032)

KIM, K.; KIM, M. Mercury emissions as landfill gas from a large-scale abandoned landfill site in



Seoul. **Atmospheric Environment**, v.36, p. 4919-4928, 2002. Doi: [10.1016/S1352-2310\(02\)00408-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00408-9)

KYUN, S.; LEE, S.; BASU, N.; FRANZBLAU, A. Associations of blood and urinary mercury with hypertension in U.S Adults : The NHANES 2003 – 2006. *Environmental Research*, p. 1–9, 2013. Doi: [10.1016/j.envres.2013.02.003](https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.02.003)

LEINO, O.; KARJALAINEN, A. K.; TUOMISTO, J. T. Effects of docosahexaenoic acid and methylmercury on child's brain development due to consumption of fish by Finnish mother during pregnancy: A probabilistic modeling approach. **Food and Chemical Toxicology**, v.54, p. 50–58, 2013. Doi: [10.1016/j.fct.2011.06.052](https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.06.052)

LI, P.; FENG, X.; SHANG, L.; QIU, G.; MENG, B.; LIANG, P.; ZHANG. Mercury pollution from artisanal mercury mining in Tongren, Guizhou, China. **Applied Geochemistry**, v.23, p. 2055–2064, 2008. Doi :[10.1016/j.apgeochem.2008.04.020](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.04.020)

LI, Z.; FENG, X.; LI, G.; BI, X.; SUN, G.; ZHU, J.; QIN, H. Mercury and other metal and metalloid soil contamination near a Pb / Zn smelter in east Hunan province , China. **Applied Geochemistry**, v. 26, n. 2, p. 160–166, 2011. Doi: [10.1016/j.apgeochem.2010.11.014](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.11.014)

MELA, M.; CAMBIER, S.; MESMER-DUDONS, N.; LEGEAY, A.; ALBERTO, C.; RIBEIRO, D. O.; VENTURA, F. D.; MASSABUAU, J. Methylmercury localization in Danio rerio retina after trophic and subchronic exposure : A basis for neurotoxicology. **Neuro Toxicology**, v.31, p. 448–453, 2010. Doi: [10.1016/j.neuro.2010.04.009](https://doi.org/10.1016/j.neuro.2010.04.009)

MERGLER, D.; ANDERSON, H. A.; HING, L.; CHAN, M.; MAHAFFEY, K. R.; MURRAY, M.; SAKAMOTO, M.; Methylmercury Exposure and Health Effects in Humans: A Worldwide Concern. **Ambio: A Journal of the Human Environmen**, v. 36, n 1, p. 3–11, 2007. Doi: [10.1579/0044-7447\(2007\)36\[3:MEAHEI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[3:MEAHEI]2.0.CO;2)

MEYER, M. L.; JOHNSON, D. K. Episodes of Elevated Methylmercury Concentrations in Prairie Streams. **Environmental Science and Technology**, v. 36, n. 8, p. 1665–1670, 2002. Doi: [10.1021/es011265w](https://doi.org/10.1021/es011265w)

MYERS, G. J.; THURSTON, S. W.; PEARSON, A. T.; DAVIDSON, P. W.; COX, C.; SHAMLAYE, C. F.; CERNICHIARI, E. Postnatal exposure to methyl mercury from fish consumption : A review and new data from the Seychelles Child

Development Study. **Neuro Toxicology**, v.30, p.338–349, 2009. Doi: [10.1016/j.neuro.2009.01.005](https://doi.org/10.1016/j.neuro.2009.01.005)

PACYNA, E. G.; PACYNA, J. M.; SUNDSETH, K.; MUNTHE, J.; KINDBOM, K.; WILSON, S.; STEENHUISEN, F. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020. **Atmospheric Environment**, v.44, n.20, p.2487–2499, 2010. Doi: [10.1016/j.atmosenv.2009.06.009](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.009)

REIS, A. T.; RODRIGUES, S. M.; ARAÚJO, C.; COELHO, J. P.; PEREIRA, E.; DUARTE, A. C. Mercury contamination in the vicinity of a chlor-alkali plant and potential risks to local population. **The Science of the total environment**, v. 407, n. 8, p. 2689–700, 2009. Doi: [10.1016/j.scitotenv.2008.10.065](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.065).

BARBOSA, A. C.; GARCIA, A. M.; DE SOUZA, J. R. Mercury contamination in hair of riverine populations of Apiacás Reserve in the Brazilian Amazon. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 97, p.1-8, 1997. Doi: [10.1007%2FBF02409639](https://doi.org/10.1007%2FBF02409639)

RIDGE, O.; HAN, F. X.; SHIYAB, S.; CHEN, J.; SU, Y.; MONTS, D. L.; WAGGONER, C. A. Extractability and Bioavailability of Mercury from a Mercury Sulfide Contaminated Soil. **Water Air Soil Pollution**, v.194, p.67–75, 2008. Doi: [10.1007/s11270-008-9699-7](https://doi.org/10.1007/s11270-008-9699-7)

RIEUWERTS, J. S.; FARAGO, M. Mercury concentrations in a historic lead mining and smelting town in the Czech Republic: a pilot study. **The Science of the Total Environment**, v. 188, p.167-171, 1996. Doi: [10.1016/0048-9697\(96\)05167-4](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05167-4)

ROBLEDO, M. A. Chronic methyl mercury poisoning may trigger endemic pemphigus foliaceus "fogo selvagem". *Medical Hypotheses*, v.78, p. 60–66, 2012. Doi: [10.1016/j.mehy.2011.09.041](https://doi.org/10.1016/j.mehy.2011.09.041)

RODRÍGUEZ, O.; PADILLA, I.; TAYIBI, H.; LÓPEZ-DELGADO, A. Concerns on liquid mercury and mercury-containing wastes: A review of the treatment technologies for the safe storage. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 197–205, 2012. Doi: [10.1016/j.jenvman.2012.02.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.02.013)

STAFILOVA, T.; SAJN, R.; PANCEVSKI, Z.; BOEV, B.; FRONTASYEVAD, M. V.; STRELKOVAD, L. P. Heavy metal contamination of topsoils around a lead and zinc smelter in the Republic of Macedonia. **Journal of**



Hazardous Materials, v.175, p.896–914, 2010. Doi: [10.1016/j.jhazmat.2009.10.094](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.094)

SCHEUHAMMER, A. M.; MEYER, M. W.; SANDHEINRICH, M. B.; MICHAEL, W. Effects of Environmental Methylmercury on the Health of Wild Birds, Mammals, and Fish. **Ambio: A Journal of the Human Environment**, v.36, n.1, p.12–19, 2007. Doi: [10.1579/0044-7447\(2007\)36\[12:EOEMOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[12:EOEMOT]2.0.CO;2)

SCHLÜTER, K. Review: evaporation of mercury from soils. An integration and synthesis of current knowledge. **Environmental Geology**, v.39, p.249–271, 2000. Doi: [10.1007/s002540050005](https://doi.org/10.1007/s002540050005)

SCHMIDT, L.; BIZZI, C. A.; DUARTE, F. A.; DRESSLER, V. L.; FLORES, E. M. M. Evaluation of drying conditions of fish tissues for inorganic mercury and methylmercury speciation analysis. **Microchemical Journal**, v.108, p.53–59, 2013. Doi: [10.1016/j.microc.2012.12.010](https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.12.010)

SEMU, E.; SINGH, B. R. Mercury Pollution of effluent, air, and soil near a battery factory in tanzania. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.27, p.141–146, 1985. Doi: [10.1007/BF00464776](https://doi.org/10.1007/BF00464776)

SHARON, Q.; LIN, C.; HWANG, Y.; HSIEH, W.; LIAO, H.; CHEN, P. Mercury, APOE, and children's neurodevelopment. **Neurotoxicology**, v. 17, p. 1–8, 2013. Doi: [10.1016/j.neuro.2013.03.012](https://doi.org/10.1016/j.neuro.2013.03.012)

SOUSSA, E.; SHALABY, Y.; MARIA, A. M.; MARIA, O. M. Evaluation of oral tissue response and blood levels of mercury released from dental amalgam in rats. **Archives of Oral Biology**, p.1–8, 2013. Doi: [10.1016/j.archoralbio.2013.03.012](https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2013.03.012)

SOUZA, M. M.; GLORIA, E. N. E.; BASTOS, W. R. Mercury concentrations in inland waters of gold-mining areas in rondonia, Brazil. **The Science of the Total Environment**, v. 88, p. 233–240, 1989. Doi: [10.1016/0048-9697\(89\)90238-6](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90238-6)

CARBONELL, G.; BRAVO, J. C.; FERNÁNDES, C.; TARAZONA, J. V. A New Method for Total Mercury and Methyl Mercury Analysis in Muscle of Seawater Fish. **The Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.83, p.210–213, 2009. Doi: [10.1007/s00128-009-9720-x](https://doi.org/10.1007/s00128-009-9720-x)

TELLES, M.; BARBONI, S.; ZACHI, E. C.; LAGO, M.; APARECIDA, R.; TEIXEIRA, A.; TAUB, A.; DA COSTA M. F.; SILVEIRA, L. C. L.; VENTURA, D. F. Preliminary Findings on the Effects of Occupational Exposure to Mercury Vapor Below Safety Levels on Visual and Neuropsychological Functions. **Journal of**

occupational and environmental Medicine, v. 51, n. 12, p. 1403–1412, 2009. Doi: [10.1097/JOM.0b013e3181bca9ea](https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3181bca9ea)

VELDEN, S. VAN DER.; REIST, J. D.; BABALUK, J. A.; POWER, M. Biological and life-history factors affecting total mercury concentrations in Arctic charr from Heintzelman Lake, Ellesmere Island, Nunavut. **Science of the Total Environment**, v. 433, p. 309–317, 2012. Doi: [10.1016/j.scitotenv.2012.06.055](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.055)

VIEIRA, S. M.; DE ALMEIDA, R.; HOLANDA, I. B. B.; MUSSY, M. H.; GALVÃO, R. C. F.; CRISPIM, P. T. B.; DÓREA, J. G.; BASTOS, W. R. Total and methyl-mercury in hair and milk of mothers living in the city of Porto Velho and in villages along the Rio Madeira, Amazon, Brazil. **International journal of hygiene and environmental health.**, p. 1–8, 2013. Doi: [10.1016/j.ijheh.2012.12.011](https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.12.011)

WATRAS, C. J.; BACKA, R. C.; HALVORSENA, S.; HUDSON, R. J. M.; MORRISONA, K. A.; WENTE, S. P. Bioaccumulation of mercury in pelagic freshwater food webs. **The Science of the Total Environment**, v. 219, p. 183–208, 1998. Doi: [10.1016/S0048-9697\(98\)00228-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00228-9)

WU, M.; YAN, C.; XU, J.; WU, W. Umbilical cord blood mercury levels in China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 25, n. 2, p. 386–392, 2013. Doi: [10.1016/S1001-0742\(12\)60061-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60061-8)

YANG, X.; WANG, L. Spatial analysis and hazard assessment of mercury in soil around the coal-fired power plant: a case study from the city of Baoji, China. **Environmental Geology**, v. 53, p. 1381–1388, 2008. Doi: [10.1007/s00254-007-0747-1](https://doi.org/10.1007/s00254-007-0747-1)

YAO, C. P.; ALLEN, J. W.; ASCHNER, M. Metallothioneins Attenuate Methylmercury-Induced Neurotoxicity in Cultured Astrocytes and Astrocytoma Cells. *Annals new york academy of sciences*, p.223–226, 1999.

YIN, R.; FENG, X.; WANG, J.; BAO, Z.; YU, B.; CHEN, J. Mercury isotope variations between bioavailable mercury fractions and total mercury in mercury contaminated soil in Wanshan Mercury Mine, SW China. **Chemical Geology**, v. 336, p. 80–86, 2013. Doi: [10.1016/j.chemgeo.2012.04.017](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.017)

ZAHIR, F.; RIZWI, S. J.; HAQ, S. K.; KHAN, R. H. Low dose mercury toxicity and human health. *Environmental Toxicology and Pharmacology*,



v.20, p.351-360, 2005. Doi:
[10.1016/j.etap.2005.03.007](https://doi.org/10.1016/j.etap.2005.03.007)

SALGADO, P.E.T.; LARINI, L.; LEPERA, J.S. **Metais**. In: Larini, L. (ED). **Toxicologia**. 2 ed. São Paulo: Manole, p. 114-135, 1993.

USEPA, In: Mercury Study Report to Congress. Office of Air Quality Planning and Standards and Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Washington, DC. 1997.

WHO. Environmental Health Criteria 118. Inorganic Mercury. International Program on Chemical Safety. Geneva:World Health Organization, 1991.

ATSDR. Toxicological Profile for Mercury. Atlanta, GA: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999.

US EPA (US Environment Protection Agency). Water quality criterion for the protection of human health: methylmercury. [EPA-823-R-01-001](https://www.epa.gov/epaospr/tscap/pubs/823r01001.pdf); 2001.

ALLARD, B.; ARSENIÉ, I. Abiotic reduction of mercury by humic substance in aquatic system - an important process for the mercury cycle. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.56, p.457-464, 1991. Doi: [10.1007/BF00342291](https://doi.org/10.1007/BF00342291)

BEUCHER, C.; WONG-WAH-CHUNG, P.; RICHARD, C.; MAILHOT, G.; BOLTE, M.; COSSA, D. Dissolved gaseous mercury formation under UV irradiation of unamended tropical waters from French Guyana. **The Science of the total environment**, v. 290, n. (1-3), p. 131-8, 2002. Doi: [10.1016/S0048-9697\(01\)01078-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01078-6)

GRANITE, E. J.; PENNLINE, H. W.; HARGIS, R. A. Novel Sorbents for Mercury Removal from Flue Gas. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.39, n.4, p.1020-1029, 2000. Doi: [10.1021/ie990758v](https://doi.org/10.1021/ie990758v)

HAITZER, M.; AIKEN, G. R.; RYAN, J. N. Binding of mercury(II) to dissolved organic matter: the role of the mercury-to-DOM concentration ratio. **Environmental science & technology**, v.36, n.16, p.3564-70, 2002. Doi: [10.1021/es025699i](https://doi.org/10.1021/es025699i)

KWON, S.; BORGUET, E.; VIDIC, R. D. Impact of surface heterogeneity on mercury uptake by carbonaceous sorbents under UHV and atmospheric pressure. **Environmental science & technology**, v. 36, n. (19), p.4 162-9, 2002. Doi: [10.1021/es0256818](https://doi.org/10.1021/es0256818)

LEE, S.; PARK, Y. Gas-phase mercury removal by carbon-based sorbents. **Fuel Processing Technology**, v. 84, p. 197-206, 2003. Doi: [10.1016/S0378-3820\(03\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(03)00055-9)

LI, Y.; LEE, C.; GULLETT, B. The effect of activated carbon surface moisture on low temperature mercury adsorption. **Carbon**, v. 40, n.1, p.65-72, 2002. Doi: [10.1016/S0008-6223\(01\)00085-9](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00085-9)

LI, Y.; LEE, C.; GULLETT, B. Importance of activated carbon's oxygen surface functional groups on elemental mercury adsorption. **Fuel**, v.82, n.4, p.451-457, 2003. Doi: [10.1016/S0016-2361\(02\)00307-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00307-1)

LV, J.; LUO, L.; ZHANG, J.; CHRISTIE, P.; ZHANG, S. Adsorption of mercury on lignin: combined surface complexation modeling and X-ray absorption spectroscopy studies. **Environmental pollution**, v.162, p.255-61, 2012. Doi: [10.1016/j.envpol.2011.11.012](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.11.012)

MAROTO-VALER, M. M.; ZHANG, Y.; GRANITE, E. J.; TANG, Z.; PENNLINE, H. W. Effect of porous structure and surface functionality on the mercury capacity of a fly ash carbon and its activated sample. **Fuel**, v. 84, n. 1, p. 105-108, 2005. Doi: [10.1016/j.fuel.2004.07.005](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.07.005)

PEHKONEN, S. O.; LIN, C. Aqueous Photochemistry of Mercury with Organic Acids. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 48, p.144-150, 2011. Doi: [10.1080/10473289.1998.10463661](https://doi.org/10.1080/10473289.1998.10463661)

YIN, Y.; ALLEN, H. E.; HUANG, C. P.; SANDERS, P. F. Interaction of Hg(II) with soil-derived humic substances. **Analytica Chimica Acta**, v.341, p.73-82, 1997. Doi: [10.1016/S0003-2670\(96\)00509-0](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(96)00509-0)