

Poluição por mercúrio na Amazônia: Efeitos sobre o meio ambiente e a saúde humana

Mercury pollution in the Amazon: Effects on the environment and human health

Contaminación por mercurio en la Amazonia: efectos en el medio ambiente y la salud humana

Karina da Silva Lopes Costa

Graduanda em Licenciatura em Biologia, Claretiano, Amapá, Brasil
karinalopesfarm@gmail.com

Josivan da Silva Costa

Professor Doutor, SEED, Amapá, Brasil
josivan.chemistry@gmail.com

RESUMO

Os vários garimpos de ouro, legais e ilegais, espalhados pela Amazônia, tem despertado o desenvolvimento de pesquisas sobre o descarte de mercúrio e suas implicações ambientais e na saúde humana. Este trabalho de revisão, objetivou a abordagem da problemática da poluição ambiental por mercúrio. Para isso, utilizou-se pesquisa bibliográfica com ênfase na poluição ambiental e suas consequências sobre os peixes e sobre o consumo de peixes contaminados pelas populações da Amazônia. Foi possível constatar que o consumo de peixe é a principal fonte de exposição das pessoas ao mercúrio. Em relação às mulheres grávidas, tem afetado a gestação e o feto, podendo resultar em má formação congênita. Tem afetado o comportamento emocional, neuropsicológico, a capacidade motora e as proporções físicas de adultos e crianças da Amazônia brasileira. Conclui-se que a problemática do mercúrio pode ser muito maior do que se apresenta, uma vez que pesquisas sobre a bioacumulação desse metal se concentra na determinação em peixes e seres humanos e a pesquisa em plantas e animais terrestres é incipiente.

PALAVRAS-CHAVE: Mercúrio. Poluição ambiental. Risco a saúde humana.

SUMMARY

The various gold mines, legal and illegal, spread across the Amazon, have sparked the development of research into the disposal of mercury and its environmental and human health implications. This review work aims to address the issue of environmental pollution by mercury. For this, bibliographical research was used with an emphasis on environmental pollution and its consequences on fish and on the consumption of contaminated fish by the population of the Amazon. It was found that fish consumption is the main source of people's exposure to mercury. In relation to pregnant women, it has an influence on pregnancy and the fetus, resulting in congenital malformations. It has affected the emotional and neuropsychological behavior, motor capacity and physical proportions of adults and children in the Brazilian Amazon. It is concluded that the mercury problem may be much greater than it appears, since research on the bioaccumulation of this metal focuses on determining it in fish and humans and research on terrestrial plants and animals is incipient.

KEYWORDS: Mercury. Environment pollution. Risk to human health.

RESUMEN

Las diversas minas de oro, legales e ilegales, repartidas por la Amazonia, han desencadenado el desarrollo de investigaciones sobre la eliminación del mercurio y sus implicaciones para el medio ambiente y la salud humana. Este trabajo de revisión tiene como objetivo abordar el problema de la contaminación ambiental por mercurio. Para ello se utilizó investigación bibliográfica con énfasis en la contaminación ambiental y sus consecuencias para los peces y el consumo de pescado contaminado por parte de las poblaciones amazónicas. Se encuentra que el consumo de pescado es la principal fuente de exposición de las personas al mercurio. En relación con las mujeres embarazadas, el embarazo y el feto pueden verse afectados, lo que puede derivar en una mayor formación congénita. Ha afectado el comportamiento emocional y neuropsicológico, la capacidad motora y las proporciones físicas de adultos y niños en la Amazonía brasileña. Se concluye que el problema del mercurio puede ser mucho mayor de lo que parece, ya que las investigaciones sobre la bioacumulación del metal están enfocadas a determinarlo en peces y humanos y las investigaciones sobre plantas y animales terrestres son incipientes.

PALABRAS CLAVE: Mercurio. Contaminación ambiental. Riesgo para la salud humana.

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, os problemas da poluição e contaminação por mercúrio, são extremamente preocupantes devidos aos impactos ambientais que provocam e seu grande perigo à saúde humana. Pode-se se citar a poluição ambiental que gerou a doença de Minamata, um dos maiores desastres ambientais da história, onde uma empresa produtora de PVC, descartou mercúrio como resíduo dessa fabricação. Peixes foram contaminados, e quando consumidos, contaminaram pessoas de uma comunidade local. Estas apresentaram sintomas como perda de consciência, surto de psicose, convulsões e febre. Estima-se que 5000 mil pessoas foram afetadas e 900 pessoas tenha morrido. Em 2013, ocorreu a primeira organização global (cerca de 140 países) no sentido de minimizar o despejo de mercúrio no meio ambiente, a Convenção de Minamata (WWF, 2023).

Na região amazônica, o principal problema relacionado ao mercúrio, é a mineração legal e ilegal de ouro. O mercúrio é utilizado para separar o ouro da terra a partir da formação da amálgama (ouro + mercúrio), após a separação do ouro, é diretamente descartado no ambiente (solo, água ou ar). A principal consequência ambiental muito divulgada na literatura é a bioacumulação em peixes, devido a sua forte relação com a alimentação da população humana. No entanto, este metal pode bioacumular em organismos menores, plantas e outros animais, podendo assim atingir os humanos.

Pretende-se com esse estudo apontar, a partir de pesquisa bibliográfica, as principais consequências da poluição por mercúrio sobre o meio ambiente, em especial nos peixes, e sobre a população da Amazônia. A importância deste trabalho reside na necessidade de produção de materiais de referência sobre a temática, que propiciem a coleta de informações sobre a problemática do mercúrio de forma direta e facilitada. Uma contribuição significativa para o entendimento desse metal e seus efeitos no meio ambiente e na saúde humana.

2 METODOLOGIA

Neste artigo, utilizou-se de pesquisa bibliográfica para obtenção de dados e informações sobre a poluição por mercúrio na Amazônia e como isso afeta o meio ambiente e a saúde humana. Para tanto, procedeu-se com a realização de levantamentos dos últimos dez anos (a partir de 2013), em publicações oficiais de instituições de proteção ambiental e análise de conteúdos apresentados e discutidos em eventos, sites e periódicos científicos que abordam a temática.

3 A POLUIÇÃO POR MERCÚRIO NA AMAZÔNIA

O mercúrio é muito utilizado em garimpos para a separação do ouro da terra e liberado do solo devido a erosão provocada por desmatamento e mal uso da terra. Pode chegar a água de rios e igarapés, onde é carregado até outras regiões. Assim, alcança os mais diferentes ecossistemas e seres aquáticos como os peixes, que quando consumidos, contaminam a população humana.

O mercúrio é um elemento químico que possui o símbolo Hg na tabela periódica, número atômico 80, massa atômica 200,59 e diferente de outros metais, é líquido a temperatura ambiente. Um resumo das propriedades do mercúrio pode ser visto na tabela 1. É obtido de um

mineral relativamente raro, vermelho-vivo, o cinábrio, com nomenclatura química de sulfeto de mercúrio II, HgS (ver Figura 1). Segundo o USGS (2023), sigla para o Centro de Informação Nacional Mineral dos Estados Unidos, os maiores produtores de mercúrio são China, Quirguistão, México, Peru, Rússia, Eslovênia, Espanha e Ucrânia, com estimativas de 600.000 toneladas de reservas de mercúrio no total.

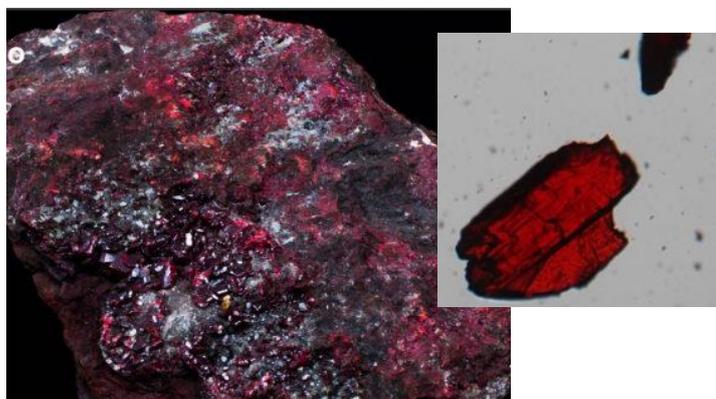
Tabela 1 – Propriedades do mercúrio

Número atômico (Z)	Massa molar (M)	Ponto de fusão (PF)	Ponto de ebulição (PE)	Densidade (d)
80	200,59 g.mol ⁻¹	-38,83 °C	356,73 °C	13,534 g.cm ⁻³

Fonte: COSTA; DAMAS; BERTOLDO, 2014.

Para a obtenção do mercúrio, uma amostra de minerais é triturada e o HgS é separado e concentrado por sedimentação, uma vez que possui alta densidade (8,17g/cm³ ou 8,17 kg/L). Se o minério for pobre em Hg, o metal é aquecido continuamente, o vapor de Hg formado é condensado de acordo com a equação da reação: $\text{HgS (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{Hg (l)} + \text{SO}_2 \text{ (g)}$. Já um minério com abundância de Hg, pode ser aquecido com cal: $4\text{HgS (s)} + 4 \text{CaO (s)} \rightarrow 4\text{Hg (l)} + \text{CaSO}_4 \text{ (s)} + 3\text{CaS (s)}$, ou com raspas de ferro: $\text{HgS (s)} + \text{Fe (s)} \rightarrow \text{Hg (l)} + \text{FeS (s)}$ (Francisco, 2021).

Figura 1 – Cinábrio em escala macroscópica (à esquerda) e microscópica (à direita)



Fonte: Adaptado de MHE, 2023.

Para a seleção do método analítico para a determinação de mercúrio, leva-se em consideração a natureza da amostra e o nível esperado de sua concentração na amostra. No entanto, é possível utilizar, em geral, os seguintes passos: coleta da amostra, tratamento prévio da amostra, separação do mercúrio da matriz seguida de extração, purificação, pré-concentração e quantificação. A técnica de determinação de mercúrio mais difundida em laboratórios ambientais é a colorimétrica. A absorção atômica é utilizada quando quantidades traços precisam ser determinadas (KASPER, et al., 2015).

3.1 A origem da poluição por mercúrio na Amazônia

Na Amazônia, as principais fontes de poluição por mercúrio são o desmatamento e a mineração, em especial, os garimpos de ouro. No entanto, é possível observar níveis elevados de mercúrio em regiões distantes das áreas de garimpo. Uma possível explicação para esse processo observado no solo, é que os chamados horizontes B, podem funcionar como se fossem

uma esponja que acumula mercúrio durante um dado período geológico. O mercúrio acumulado pode ter sua liberação de volta ao ciclo biológico acelerada, devido a erosões e incêndios florestais provocados por ação antrópica (ROCHA, et al., 2023).

O mercúrio é muito utilizado na forma de amálgama ouro-mercúrio, com posterior vaporização do mercúrio e recuperação do ouro. A vapor do mercúrio é extremamente tóxico e prejudicial a saúde, e afeta diretamente os garimpeiros no momento de seu uso. Indiretamente, os vapores podem afetar populações vizinhas, uma vez que se dispersam e viajam pelo ar. A inalação desses vapores configura a via de exposição ao mercúrio mais perigosa para essas populações (MAGALHÃES CÂMARA, 2017).

Em seu estudo sobre garimpos na Amazônia, Gesisky (2018), estimou que existiam até 800 mil garimpeiros atuando de forma legal e ilegal na Amazônia, em especial no Mato Grosso e no Pará, e em menor quantidade no Amapá, Amazonas, Rondônia e Tocantins. Já a emissão de mercúrio para a atmosfera, a partir da mineração artesanal ilegal e legal do ouro, nesses estados, apresentou índices de até 161 toneladas.

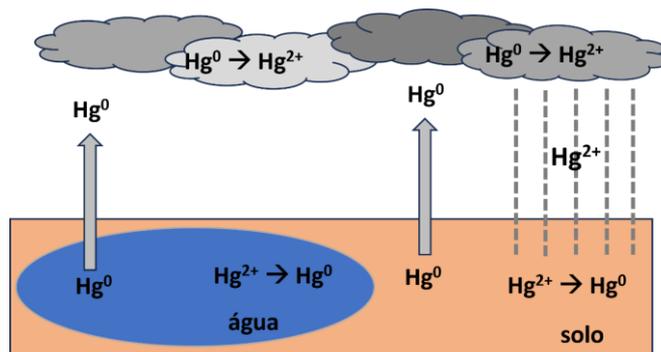
3.2 Consequências da poluição por mercúrio ao meio ambiente amazônico

As formas químicas que o mercúrio pode estar presente no meio ambiente são diversas. Estas formas apresentam diferentes características em relação a transporte, deposição e impactos no meio ambiente. O mercúrio gasoso elementar, Hg^0 , é a forma mais abundante no meio atmosférico (acima de 98%). Os compostos de Hg, em estados de oxidação maiores estão disponíveis em concentrações muito mais baixas no ar. Assim, o mercúrio pode se apresentar na forma de compostos inorgânicos e orgânicos. Estes últimos dão origem ao ciclo do mercúrio na natureza (POZZETTI, et al., 2022).

O grau de toxicidade do mercúrio e de seus compostos dependem de seu ciclo biológico. Por exemplo, o vapor de mercúrio é composto por um gás monoatômico de relativa estabilidade, que evapora da água e do solo. O vapor de mercúrio em mistura com vapor de água, é convertido em uma forma iônica (Hg^{2+}) solúvel e volta a superfície da Terra pela água da chuva, como mostrado na figura 2.

Após retornar a superfície, o mercúrio presente nos sedimentos de rios e lagos é passível de ação microbiana, sofrendo conversão em metilmercúrio (CH_3HgCl), uma das formas mais tóxicas do mercúrio, que posteriormente entra na cadeia alimentar aquática. Esses sedimentos são perigosos, o mercúrio que é depositado permanece na forma ativa, sendo substrato para a metilação por um período de aproximadamente 100 anos, mesmo se a fonte de mercúrio for eliminada (FRANCISCO, 2021).

Figura 2 – Ciclo biológico do mercúrio



Fonte: Adaptado de FRANCISCO, 2021.

O mercúrio pode ser facilmente retido e armazenado pelo solo, uma vez que realiza forte interação com o carbono presente. Ao entrar no solo, parte do mercúrio pode ser volatilizado e retorna a atmosfera podendo ser complexado com materiais orgânicos. O mercúrio também pode ser retirado do solo pelo processo de erosão ocasionado pelas chuvas, sendo carregado para rios e lagos.

3.2.1 A legislação sobre a poluição por mercúrio

O despejo de resíduos de mercúrio nos rios e solos amazônicos são descritos na literatura que aborda essa problemática, como uma das principais fontes de poluição por metais pesados. Os impactos ambientais causados por esse tipo de contaminação afetam profundamente a biologia dos organismos presentes.

Os órgãos regulamentadores preconizam alguns valores limites para a quantidade de mercúrio presente na natureza em diferentes matrizes. O órgão responsável por esse controle é o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Adicionalmente, órgãos ambientais estaduais também estabelecem valores de referência para um maior controle desse tipo de poluente na natureza, por exemplo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Abaixo, na tabela 2, são mostrados dados relativos aos valores limites de mercúrio determinados pela CETESB e pelo CONAMA.

Tabela 2 – Valores limites (máximos) para o mercúrio presente na natureza.

Meio	Concentração	Sector	Regulamentação
solo	0,5 mg/kg	Valor de prevenção	CONAMA 420/2009
	12 mg/kg*	Agrícola	
	36 mg/kg*	Residencial	
	70 mg/kg*	Industrial	
solo	0,5 mg/kg*	Valor de Prevenção	CETESB- DD 256/2016/E
	1,2 mg/kg*	VI cenário agrícola	
	0,9 mg/kg*	VI cenário residencial	
	7 mg/kg*	VI cenário industrial	
	0,05 mg/kg*	VRQ	
Água potável	0,001 mg/L	(Padrão de potabilidade)	Portaria 2914/2011 Ministério do Meio Ambiente
Água subterrânea	1 µg/L	(consumo humano)	CONAMA 396/2008
	10 µg/L	(dessedentação)	
	2 µg/L	(irrigação)	
	1 µg/L	(recreação)	

Água subterrânea	1 µg/L	(consumo humano)	CETESB- DD 256/2016/E
Águas doces ¹	0,2µg/L	(classes 1 e 2)	CONAMA 357/2005
	2 µg/L	(classe 3)	
Águas salinas e águas salobras	0,2 µg/L	(classes 1)	CONAMA 357/2005
	1,8 µg/L	(classe 2)	
Efluentes	1 µg/L	Padrão de despejo	CONAMA 430/2011

Fonte: BRASIL, 2014; CETESB, 2017.

3.2.2 O mercúrio em solos, águas e sedimentos

Sobre a poluição por mercúrio, Torrezani e colaboradores (2016), determinaram esse poluente em sedimentos da Bacia do Educandos em Manaus-AM. As análises resultaram no estabelecimento da distribuição superficial de mercúrio em frações grosseiras e fina dos sedimentos. As amostras foram coletadas em diferentes pontos de Manaus: no Instituto Federal do Amazonas (IFAM), na Unidade de Conservação Sauim-Castanheira (UCSC), na Universidade Federal do Amazonas (UFAM), em um conjunto de palafitas (CP), no Polo Industrial de Manaus (PIM) e próximo ao Rio Negro (RN). Os resultados obtidos mostraram para a fração bruta, valores acima dos limites CONAMA e CETESB, na UCSC ($0,189 \pm 0,049$ mg/kg) e em CP ($0,251 \pm 0,033$ mg/kg), de acordo com os autores isso pode ser atribuído a uma coleta pontual de sedimento rico em Hg. No entanto, essas regiões podem ser pontos de acumulação de mercúrio devido ao seu carreamento para esses locais. Por fim, foi possível constatar com o estudo, o enriquecimento com mercúrio, dos sedimentos na região do PIM, isso indica que a principal fonte de poluição por mercúrio na bacia do Educandos, é de origem industrial.

Umas das formas mais significativas de modificação da natureza é a construção de hidrelétricas (UHE). Vários impactos ambientais estão associados a este tipo de empreendimento. Para avaliar possíveis modificações ambientais numa região alterada pela construção de uma UHE, Pereira (2022), determinou a concentração de mercúrio em amostras de água e sedimentos no período de seca amazônica em ambientes sob impactos da UHE de Belo Monte no rio Xingu, Pará. Os pontos de coletas foram distribuídos a montante do reservatório principal, no reservatório principal, no trecho do rio desviado para a construção (a montante e a jusante do rio Bacajá) e a jusante da casa de força principal da usina. Os resultados para as amostras de água apresentaram as maiores concentrações de Hg a montante do reservatório principal (fora da área de influência da UHE) e em todos os pontos, as concentrações excederam os valores estabelecidos pela legislação brasileira (apresentaram o dobro, $0,4$ µg/L do recomendado pelo CONAMA, $0,2$ µg/L). Nas amostras de sedimento, as maiores concentrações de Hg foram detectadas na região do reservatório, no entanto, os valores se mantiveram dentro dos limites estabelecido pela legislação em todos os pontos (entre $0,069$ e $0,128$ µg/kg).

Outro estudo para determinação de metais pesados em sedimentos foi realizado em três diferentes localidades da Amazônia, nos reservatórios da UHE de Jirau, Rio Madeira – RO, na UHE de Cana Brava, Rio Tocantins – GO e no baixo Rio Negro – AM. As coletas de amostras foram realizadas em períodos de cheia e seca nos anos de 2014 e 2015. Os maiores valores médios de concentração de Hg foram obtidos no rio de água preta ($0,0686$ mg/kg no rio Negro),

seguido do rio de água clara (0,041 mg/kg rio Tocantins) e rio de água branca (0,014 mg/kg rio Madeira) (ROCHA, 2017). Esses valores estão de acordo com as legislações vigentes (ver tabela 1).

Ainda sobre os impactos de modificações por construção de UHEs, Bacelar (2017), realizou a avaliação espacial de mercúrio total em sedimentos do reservatório da UHE de Curuá no estado do Pará em 2016. O autor coletou amostras em quatro regiões: a montante da UHE nos rios Curuá-Una, Moju e Mojuí; transição; lacustre e a jusante da UHE. Os resultados obtidos mostraram que as concentrações de mercúrio total (HgT) foram significativamente diferentes nas quatro regiões avaliadas. Houve um aumento nos níveis médios de HgT a partir da região a montante da UHE ($0,185 \pm 0,024 \mu\text{g/kg}$), transição ($0,223 \pm 0,063 \mu\text{g/kg}$) para a lacustre ($0,263 \pm 0,033,6 \mu\text{g/kg}$) com decaimento na região a jusante UHE ($0,157 \pm 0,025 \mu\text{g/kg}$). Esses valores estão dentro da faixa estabelecida pela legislação ambiental brasileira. Foi discutida a correlação entre parâmetros físico-químicos e orgânicos e HgT. As regiões com valores baixos de sedimentos suspensos, pH, condutividade elétrica e altos valores de matéria orgânica, acarretam maiores valores de HgT nos sedimentos de fundo. E de forma contrária, valores baixos de pH, elevada coloração, com águas turvas e frias propiciam valores elevados de HgT para sedimentos em suspensão.

Oliveira, França e Rocha (2015), avaliaram o nível de mercúrio em água e sedimento de fundo do rio Tapajós no município de Itaituba, no oeste do estado do Pará. Os achados dessa pesquisa mostraram que tanto os valores de HgT na água ($0,0005 \mu\text{g/L}$) e nos sedimentos (entre $0,024$ e $0,037 \mu\text{g/g}$) foram considerados baixos. Em relação a quantidade de mercúrio no solo na foz do rio Tapajós, Sousa (2016), coletou amostras em seis pontos distintos da cidade de Santarém, Pará. Os resultados para a fração fina de solo apresentaram valores HgT entre $0,024$ e $0,269 \mu\text{g/g}$, e para a fração grossa entre $0,022$ e $0,265 \mu\text{g/g}$.

Outro estudo realizado sobre a quantidade de HgT em sedimentos de fundo, foi conduzido por Noronha Filho e colaboradores (2021), na reserva biológica do rio Trombetas (REBIO), na cidade de Oriximiná no Pará. As coletas foram realizadas em maio e setembro de 2016 e março e junho de 2017. Os resultados obtidos para HgT ficaram entre $0,00015 \mu\text{g/g}$ e $0,00025 \mu\text{g/g}$. Para esses três últimos estudos, os valores de HgT são relativamente baixos se comparados aos valores da legislação brasileira.

Souza (2014), realizou amostragem para determinação de níveis de HgT em dois rios do estado do Amazonas: no rio Solimões nas proximidades da cidade de Tabatinga e na foz do rio Javari a Jusante do município de Benjamin Constant. Ambas as cidades fazem fronteira com Colômbia. Os resultados de HgT para as análises das amostras se apresentaram dentro dos padrões estabelecidos pelo CONAMA, com valores entre $0,038$ e $0,059 \mu\text{g/g}$ com média de $0,048 \mu\text{g/g}$.

Sobre as quantidades de mercúrio em águas, solos e sedimentos apresentados nesta seção, a maioria dos estudos apontaram para HgT dentro dos padrões estabelecidos pela legislação brasileira. No entanto, para regiões com valores alterados, existe a necessidade de um maior monitoramento e levantamento das quantidades de mercúrio em outras matrizes e como isso afeta a saúde da população. Numa visão integrada, a presença de mercúrio em solos, água e sedimentos pode ser a primeira indicação de contaminação, uma vez que os peixes podem estar contaminados e podem afetar quem os consome.

3.2.3 O mercúrio em peixes e organismos aquáticos

A presença do mercúrio nas águas de rios e lagos pode afetar a vida aquática (microrganismos, flora e fauna), causando desequilíbrios ambientais, pois o mercúrio liberado pode se acumular nos tecidos de animais e plantas aquáticas. Aliado a isso, o consumo de peixes contaminados por mercúrio, é fonte de preocupação na Amazônia, pois configura a principal forma de contaminação humana por esse metal.

Sobre a questão, Oliveira (2014), quantificou o mercúrio nos músculos de peixes de 50 espécies diferentes do rio Amazonas (dois pontos no canal principal) e afluentes (em quatro pontos: Juruá, Japurá, Purus e Madeira). Do total de espécies, 26% apresentaram mercúrio (HgT) em seus tecidos musculares. No entanto, apenas a espécie *Acestrorhynchus falcirostris*, conhecida como Peixe-cachorro de nadadeira amarela (0,524 µg/g) apresentou valores acima do estabelecido pela legislação (0,500 µg/g). O autor discutiu o aumento das concentrações de HgT nos níveis tróficos de uma cadeia alimentar (a biomagnificação). As espécies zooplânctófagas, planctófagas, piscívoras e insetívoras, atingiram concentrações mais elevadas de HgT em relação aos demais níveis tróficos.

Ainda sobre a presença de mercúrio em peixes, Silva et al. (2022), determinou os níveis de HgT em duas espécies de peixes *Serrasalmus rhombeus*, Linnaeus, 1766 e *Hemiodus unimaculatus*, Bloch, 1794. As coletas aconteceram em períodos de cheia e seca em diferentes ambientes da UHE de Curuá-Una no Pará. A espécie *S. rhombeus* apresentou maiores valores de HgT (0,318±0,236 µg/g) em relação a espécie *H. unimaculatus* (0,114±0,080 µg/g). Em uma análise por espécie e em diferentes pontos, os autores observaram que *H. unimaculatus* apresentou maiores valores de HgT no reservatório da UHE (0,150±0,096.26 µg/g). Para *S. rhombeus*, os maiores valores de HgT foram obtidos à montante do reservatório (0,378±0,246 µg/g). Os resultados se apresentaram dentro dos limites normatizados pela legislação. No entanto, eles sugerem que os impactos gerados pela UHE interferem nas quantidades de mercúrio nos peixes da região.

Estudo semelhante, desenvolvido por Anjos e colaboradores (2016), foi realizada uma investigação sobre as quantidades de metilmercúrio (MeHg) em tecidos de peixes de 14 espécies do rio Roosevelt, no sudoeste da Bacia Amazônica. Foram determinados 14 pontos de coletas na extensão do rio. Os autores apontaram que a bioacumulação de MeHg ocorreu na ordem carnívoros > detritívoros > frugívoros. Em 50% das espécies, os valores de HgT para o MeHg se apresentaram acima (2,45 µg/g) dos valores limites (0,500 µg/g).

Em trabalho pioneiro no Brasil, Eufrazio (2018), quantificou HgT em amostras de poríferos do rio Tapajós, da foz a montante em um trecho com cerca de 65 km. Os resultados mostraram concentração média de HgT de 0,040,8±0,004 µg/g, com valores mais elevados para os de ambiente lacustre (0,041±0,023 µg/g) do que os de ambiente fluvial (0,028±0,029 µg/g). O picos de valores de HgT (0,090±0,030 µg/g) foram encontrados nos poríferos da região do Carapanarí (próximo a Santarém, PA). Os valores de HgT apresentados pelos poríferos, neste estudo, foram inferiores aos apresentados por outras espécies de organismos aquáticos, disponíveis na literatura.

3.3 Consequências da contaminação por mercúrio à saúde humana

Ao longo da seção 3.3, foi apresentado como o mercúrio tem impactado o meio ambiente em função da quantificação do mercúrio (HgT) na água, solo, sedimentos e quando bioacumulado em peixes. A partir disso, pode-se estabelecer uma relação em cadeia, em que o mercúrio é transferido do ambiente para os organismos vivos que o habitam (solo, água e sedimento, por exemplo) e nele estabelecem relações tróficas. No topo dessa relação, aparecem os seres humanos que se alimentam dos peixes e outros seres aquáticos, que se contaminados por mercúrio, transferem esse metal para o corpo humano, onde é bioacumulado, podendo ocasionar diversos danos à saúde.

3.3.1 A alimentação contaminada com mercúrio: peixes da Amazônia

Sobre a presença de mercúrio no corpo humano, pesquisas tem sido realizadas na Amazônia com o objetivo de determinar o mercúrio no sangue de indivíduos e avaliar o risco a saúde humana. Sobre o tema, Oliveira 2014, avaliaram os níveis de HgT no sangue de indivíduos de comunidades localizadas no estado do Pará (Samaúma, Caratateua e Barreiras). Os valores de HgT no sangue apresentaram valores médios de 0.9 µg/g em Samaúma, mínimo de 1.9 µg/g e máximo de 20.7 µg/g em Caratateua e mínimo de 4.6 µg/g e máximo de 15.7 µg/g em Barreiras. O pesquisador concluiu que a comunidade de Samaúma apresentou o menor grau de exposição ao mercúrio, enquanto Barreiras apresentou o maior grau. Cerca de 11% da comunidade de Caratateua obtiveram níveis acima do valores estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS). O consenso estabelecido com o estudo, é que existe pouco balanceio nutricional nessas comunidades, com maior consumo de pescado. Há necessidade de aplicação de medidas educativas para maior variabilidade na dieta.

Em pesquisas semelhantes realizadas na bacia do Tapajós, Andrade (2015) e Costa Júnior et al. (2018), avaliaram a exposição ao mercúrio a partir da quantificação de HgT em cabelos de indivíduos de comunidades ribeirinhas da cidade de Itaituba, Pará. Andrade (2015), avaliou dados de 17 anos de coletas (entre 1998 e 2014), com cerca de 1500 amostras. O autor concluiu que os adultos do sexo masculino apresentam maior risco de exposição. Costa Júnior et al. (2018), analisou adultos relacionando os índices de HgT com consumo de pescado, concluindo que o valores de HgT foram maiores naqueles com maior consumo de pescado. Os autores chegaram a conclusões semelhantes: O maior nível de mercúrio está diretamente relacionado ao padrão de vida mais tradicional em que a dieta é a base de pescado.

Outros três estudos, em diferentes localidades da Amazônia, buscaram investigar a relação existente entre o consumo de pescado e os níveis de HgT. Milhomem Filho et al (2016), investigou comunidades ribeirinhas às margens do rio Tocantins no município de Imperatriz, Maranhão, o autor concluiu que devido os baixos níveis de HgT nos peixes, a população foi pouco exposta ao mercúrio. Barros (2017), avaliou peixes entre as várzeas dos rios Japurá, Solimões e Auati-Paraná, obtendo baixos valores de HgT, concluindo que, para a quantidade de consumo média de pescado na região em estudo, não há risco potencial para a saúde humana. Por fim, Silva (2018), determinou valores de HgT para peixes comercializados na região do Alto Solimões, em maio e novembro de 2017. A conclusão do autor apontou para risco a saúde humana pela ingestão de pescado, de espécies carnívoras/piscívoras, em novembro (período de cheia).

Nos estudos apresentados, os autores apontam o consumo de peixes como principal causa da contaminação por mercúrio. No entanto, outros seres aquáticos servem como

alimentação na região amazônica, como é o caso do camarão-da-Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*), uma espécie de água doce. Ressalta-se a importância de pesquisas que englobem outras espécies que servem como alimento, como o caso do camarão-da-Amazônia, que possam indicar possível contaminação por mercúrio nas populações amazônicas.

3.3.2 Efeitos sobre a fertilidade, em gestantes e lactantes

Na seção anterior foram apresentados resultados sobre a exposição de comunidades amazônicas ao mercúrio. Nesse sentido, a contaminação por esse metal pode ocasionar diversos problemas a saúde, dos quais, alguns serão apresentados aqui. Como exemplo, Vianna et al. (2022), avaliou a relação entre anemia e níveis de HgT na população infanto-juvenil durante nove anos (1994 e 2002), de comunidades ribeirinhas da região do Tapajós. Os autores selecionaram comunidades com influência e sem influência de garimpos. Após análises estatísticas multivariadas dos dados, os resultados apontaram que para indivíduos sob influência do garimpo, níveis de Hg a partir 6,0µg/g possuem forte relação com a anemia, sendo a exposição por mercúrio um fator de risco para a doença.

A apresentação do estudo anterior exemplificou como os níveis de mercúrio afetam a saúde de crianças e adolescentes. No entanto, esse tipo de estudo não pode estabelecer se a anemia nas crianças foi provocada pela exposição da mãe ao mercúrio ainda na gestação. Em relação a isso, pesquisas tem sido realizadas como forma de avaliar a relação entre a exposição por mercúrio e efeitos durante o período de gestação, amamentação e fertilidade.

Sobre a fertilidade e sua relação com a exposição ao mercúrio, Miranda et al. (2020), investigou mulheres em idade fértil na cidade de Sena Madureira, Acre. A conclusão do estudo aponta que, o tempo de moradia na cidade e o hábito de consumir peixes está diretamente relacionado a exposição dessas mulheres com o mercúrio. Isso permitiu inferir que existe elevado risco de transmissão para possíveis fetos, em caso de gravidez.

O efeito teratogênico (malformação do feto) foi abordado por Cano (2014) em sua pesquisa bibliográfica. A forma orgânica do mercúrio (etilmercúrio, metilmercúrio etc.) é a mais importante no que diz respeito a efeitos durante a gestação. Pode ser diretamente transferida para o feto pela placenta e pelo leite. O líquido amniótico é a principal matriz de deposição da forma inorgânica do mercúrio. A autora expõe que o efeito intrauterino mais importante e divulgado é o de alterações do desenvolvimento neuropsicomotor.

Silva (2015) e Cerbino (2016), em seus trabalhos de mestrado, quantificaram HgT no leite materno de lactantes de comunidades ribeirinhas do rio Madeira. Cerbino (2016), estendeu sua pesquisa, além do rio Madeira, para comunidades ribeirinhas do Rio negro. Para o estudo de Silva (2015), os resultados para consumo de leite materno ultrapassou os limites toleráveis estabelecidos pela OMS (0,71 µg/kg de HgT/dia) para 8 das 9 lactantes. Já, o estudo de Cerbino (2016), mostrou valores de HgT no leite materno dentro dos padrões. O autora apontou que a maior quantidade de mercúrio está presente na fração proteica do leite.

Os achados das duas pesquisas apresentaram valores semelhantes a outros disponíveis na literatura, para a região amazônica. Mais estudos podem ser realizados para avaliar a consequência, do consumo de leite com esses níveis de mercúrio, em bebês e crianças em idade de amamentação.

3.3.3 Efeitos comportamentais, motores e físicos

O consumo de peixes e leite humano com mercúrio, são formas de exposição a adultos e crianças, por esse metal na Amazônia. Nesta seção, serão apresentados resultados de estudos sobre o efeito dos níveis de mercúrio no corpo humano em relação a fatores físicos (antropométricos), motores e comportamentais.

Dentre os efeitos do mercúrio em humanos, alguns autores abordaram a relação entre níveis de mercúrio e a motilidade. Lima (2014) e Takanashi (2014), em suas teses de doutorado e Costa Junior (2016) em sua dissertação de mestrado, estudaram comunidades da região do baixo Amazonas, crianças quilombolas das comunidades de Saracura, Arapemã, Nova Vista do Ituqui, São José, São Raimundo do Ituqui, Bom Jardim, Tiningu, Murumuru, Murumurutuba e ribeirinhos nos municípios de Itaituba e Acará. Foram obtidos dados sintomatológicos sobre motricidade: parestesia, fraqueza muscular, desequilíbrio ao andar, tremor, dor nos membros e disartria. Os resultados mostraram, no geral, possíveis relações entre HgT e manifestações motoras para os três estudos, evidenciando que manifestações motoras adversas estão diretamente ligadas a exposição ao mercúrio.

Costa Junior (2016), também avaliou a relação entre níveis de HgT e manifestações emocionais no ribeirinhos Itaituba e Acará. Em trabalho semelhante, mas com avaliação neuropsicológica e sua relação com HgT, Serra (2022), estudaram ribeirinhos na região do alto rio Madeira. Em ambos os estudos, as manifestações emocionais e testes neuropsicológicos Palográfico/organização, Palográfico/gráfico de rendimento e TEDIF 2) apresentaram correlações significativas com HgT. Isso permite inferir, que a exposição ao mercúrio, pode influenciar o comportamento dos indivíduos dessas regiões.

Para avaliação do efeito do mercúrio sobre a fatores antropométricos: altura-para-idade (A/I), peso-para-idade (P/I) e peso - para -altura (P/A) de crianças, Cunha (2017), investigou um universo amostral de 1433 pares de crianças e mães moradores das regiões dos rios Jamari, Madeira e Mamoré em Rondônia, durante cinco anos. O autor concluiu que os níveis de HgT não influenciaram os índices antropométricos das crianças avaliadas.

Os resultados discutidos nesta seção mostram que o mercúrio pode afetar significativamente as manifestações motoras e comportamentais dos indivíduos e comunidades expostas a esse metal. As conclusões dos estudos apresentados, mostram que as relações entre as quantidades de mercúrio total e as manifestações motoras e comportamentais são diretamente influenciadas pelo consumo de pescado na região.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho buscou-se apresentar material bibliográfico significativo sobre a problemática do mercúrio na Amazônia. O marco para as discussões sobre os efeitos do mercúrio no meio ambiente e na saúde humana, foi o desastre ambiental de Minamata. De acordo com o levantamento bibliográfico aqui realizado, na Amazônia, os garimpos são as principais fontes de descarte de mercúrio na natureza.

De acordo com os achados da literatura, o descarte de mercúrio na água dos rios e no solo próximo aos rios, dispersam o mercúrio nessas matrizes, e afetam diretamente os peixes e a cadeia alimentar em que estes estão envolvidos. Dados sobre o mercúrio em peixes

amazônicos, permitem inferir que o consumo de peixe contaminado é a principal via de contaminação humana por esse metal.

Foi possível apontar que, nos últimos anos, o mercúrio tem afetado as populações que se alimentam de peixes contaminados. Destaca-se os efeitos sobre a fertilidade de mulheres, sobre a gestação (efeitos teratogênicos) devido a transmissão de mercúrio da grávida para o feto e sobre a amamentação, em razão da transferência de mercúrio da mãe para o filho a partir do leite materno.

Por fim, foi possível verificar que o mercúrio também afetou o comportamento emocional, a capacidade motora e índices antropométricos (fatores físicos) de adultos e crianças de comunidades ribeirinhas da Amazônia. O efeitos discutidos neste trabalho, tiveram como parâmetro, valores previamente determinados por instituições mundialmente e nacionalmente referendadas, como a OMS, o CONAMA e a CETESB.

As pesquisas que foram utilizadas para a construção desta revisão, permitiram inferir que a problemática que envolve a poluição do meio ambiente e a contaminação de pessoas por mercúrio, tem proporções muito maiores do que se imagina. Pois, estudos sobre a bioacumulação desse metal em plantas e em animais terrestres são praticamente inexistentes quando comparadas as coletadas durante a construção desse manuscrito. Portanto, destaca-se a necessidade de pesquisas que preencham essas lacunas científicas.

5 REFERÊNCIAS

ANDRADE, P. D. O. **Avaliação temporal da exposição humana ao mercúrio no Oeste Paraense**. 2015. Dissertação (Mestrado em Doenças Tropicais) Universidade Federal do Pará. Belém, 2015.

ANJOS, M. R. et al. Bioacumulação de metilmercúrio em tecidos de peixes no rio Roosevelt, Sudoeste da Bacia Amazônica. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, p. 508-518, 2016.

BACELAR, R. J. **Avaliação espacial dos níveis de mercúrio total em sedimentos do reservatório da UHE de Curuá-Una, Pará, Brasil**. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Aquáticos Continentais Amazônicos). Universidade Federal do Oeste do Pará. Santarém. 2017.

BARROS, A. P. C. **Benefícios e risco do consumo de pirarucu (Arapaima gigas) da Amazônia central: distribuição de mercúrio em órgãos e musculatura, perfil de ácidos graxos e avaliação de risco à saúde humana**. 2017. Dissertação (Mestrado em Higiene Veterinária e Processamento Tecnológico de Produtos de Origem Animal) Faculdade de Veterinária, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resoluções do CONAMA: Resoluções publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012**. Brasília: MMA, 2012. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf>. Acesso em: 20 set. 2023.

CANO, T. M. Efeitos deletérios e teratogênicos da exposição ao mercúrio-Revisão da literatura. **Revista de Medicina e Saúde de Brasília**, v. 3, n. 3, 2014.

CERBINO, M. R. **Abordagem metaloproteômica do mercúrio em leite materno de comunidades da Bacia amazônica - Brasil**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Saúde) Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia – GO, 2016.

CETESB. **Mercurio e seus compostos**. São Paulo: SMA - Secretaria do Meio Ambiente, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Mercurio.pdf>. Acesso em: 20 set. 2023.

COSTA JUNIOR, J. M. F. **Análise das manifestações emocionais e motoras de ribeirinhos expostos ao mercúrio na Amazônia**. 2016. Dissertação (Mestrado em Doenças Tropicais) Núcleo de Medicina Tropical, Universidade Federal do Pará, , Belém, 2016.

- COSTA JUNIOR, J. M. F. et al. Teores de mercúrio em cabelo e consumo de pescado de comunidades ribeirinhas na Amazônia brasileira, região do Tapajós. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 23, p. 805-812, 2018.
- COSTA, L. T.; DAMAS, G. B.; BERTOLDO, B. Mercúrio: da antiguidade aos dias atuais. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 4, p. 1010-1020, 2014.
- CUNHA, M. P. L. **Influência da ingestão materna de peixe utilizando o mercúrio no cabelo como biomarcador sobre os índices antropométricos de crianças em Rondônia, Amazônia Ocidental**. 2017. 112 f. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde) Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- EUFRÁZIO, F. L. P. **Ecotoxicologia do mercúrio total em poríferos do Hidrossistema Fluvial Baixo Tapajós, Santarém - Pará, Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Aquáticos Naturais da Amazônia) Universidade Federal do Oeste do Pará. Santarém, 2018.
- FRANCISCO, A. R. C. **Química e toxicidade do mercúrio**, em Lisboa, Portugal, 2021. Dissertação (Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas). Faculdade de Farmácia da Universidade de Lisboa, 2021.
- GESISKY, J. **Estudo estima emissões de mercúrio nos garimpos de ouro no Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?65922/estudo-estima-emissoes-mercuriogarimpos-ouro-brasil>>. Acesso em: 18 set. 2019.
- KASPER, D. et al. Metodologias de coleta, preservação e armazenamento de amostras de água para análise de mercúrio-uma revisão. **Química Nova**, v. 38, p. 410-418, 2015.
- LIMA, A. C. M. **Estado nutricional e desenvolvimento motor de crianças ribeirinhas expostas ao mercúrio no estado do Pará- Amazônia Brasileira**. 2014. 72 f. Tese (Doutorado em Doenças Tropicais) Núcleo de Medicina Tropical, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- MAGALHÃES CÂMARA, V. Contribuições para o desenho de estudos epidemiológicos sobre poluição por mercúrio na Amazônia. **Revista Pan-Amazônica de Saúde**, v. 8, n. 4, p. 4-4, 2017.
- MHE – Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. **CINÁBRIO (Cinnabar)**. Disponível em: <https://museuhe.com.br/mineral/cinabrio-cinnabar/>. Acesso em 15 set. 2023.
- MILHOMEM FILHO, E. O. et al. A ingestão de pescado e as concentrações de mercúrio em famílias de pescadores de Imperatriz (MA). **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 19, p. 14-25, 2016.
- minata/. Acesso em: 23 set. 2023.
- MIRANDA, A. M. M. et al. “Risco epidemiológico de transmissão vertical do mercúrio na região de fronteira na Pan Amazônia. In: DAL MOLIN, R. S. (Org.) **Saúde Em Foco: Temas Contemporâneos**, v. 3, 2020.
- NORONHA FILHO, F. A. et al. Acúmulo de mercúrio em sedimentos de fundo da reserva biológica do rio Trombetas (REBIO), cidade de Oriximiná, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 5, p. 378-386, 2021.
- OLIVEIRA, C. S. B.. **Marcadores oxidantes e antioxidantes em populações expostas ao mercúrio em diferentes regiões geográficas do estado do Pará, Amazônia brasileira**. 2014. Dissertação (Mestrado em Doenças Tropicais) Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.
- OLIVEIRA, H. S. P.; FRANÇA, S. C. A.; ROCHA, E. J. P. Atividades de mineração e avaliação de metais em água superficial, sedimento de fundo e peixes no rio tapajós. In: VIEIRA, I. C. G.; JARDIM, M. A. G.; ROCHA, E. J. P. (orgs.) **Amazônia em tempo: estudos climáticos e socioambientais**, Belém: UFPA, MPEG, EMBRAPA, 2015, pp. 196-221.
- OLIVEIRA, S. R. L. **Avaliação dos níveis de mercúrio total em músculos de peixes associados à macrófitas aquáticas do Rio Amazonas e afluentes – Amazônia, Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Recursos Aquáticos Continentais Amazônicos) Universidade Federal do Oeste do Pará. Santarém, 2014.
- PEREIRA, T. N. **Mercúrio e Arsênio no rio Xingu em áreas sob a influência da usina hidrelétrica Belo Monte (AMAZÔNIA)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Conservação). Universidade Federal do Pará. Altamira. 2022.

POZZETTI, V. C. et al. Uso de mercúrio na Amazônia brasileira: contaminação, problemas e legislação vigente. **Revista Catalana de Dret Ambiental**, v. 13, n. 2, 2022.

ROCHA, B. C. P. **Distribuição e caracterização da labilidade relativa de cobre, chumbo e mercúrio em amostras de sedimentos e substâncias húmicas extraídas de sedimentos coletados em mananciais com diferentes tipos de águas da Bacia Amazônica**. 107f. Tese (Doutorado em Química). Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara. 2017.

ROCHA, C. A. M. et al. Animais aquáticos como bioindicadores de mercúrio na Amazônia. In: VIANA, W. C.; SANTOS, D. M. A. (Orgs.). **Amazônia: Tópicos atuais em ambiente, saúde e educação - volume 2**. GUARUJÁ – SP: Editora científica digital, 2023, pp. 79-100.

SERRA, C. V. **Avaliação neuropsicológica em população exposta ao mercúrio na região do alto rio Madeira – Amazônia**. 2022. 106 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) Universidade de Brasília, Planaltina, 2022.

SILVA, J. S. C. et al. Mercúrio total em duas espécies de peixe do reservatório e adjacências de uma Usina Hidroelétrica na Amazônia, Pará, Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 15, n. 1, p. 1-17, 2022.

SILVA, S. F. **Mercúrio em peixes comercializados no Alto Solimões, Tríplice Fronteira da Amazônia**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aquática e Pesca) Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

SILVA, T. M. **Metalômica aplicada ao estudo de toxicidade do mercúrio em amostras de leite humano coletadas de lactantes residentes em comunidades do alto rio Madeira, Rondônia, Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural) Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SOUZA, A. A. **Distribuição espacial e temporal de mercúrio no sedimento dos rios Solimões e Javari na fronteira Brasil-Peru e Colômbia**. Relatório de Pesquisa – Ciências Agrárias, Benjamin Constant – AM: UFAM, 2014.

TAKANASHI, S. Y. L. **Exposição ao mercúrio e desenvolvimento motor de crianças quilombolas na região do Baixo Amazonas**. 2014. 114 f. Tese (Doutorado em Doenças Tropicais) Núcleo de Medicina Tropical, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

TORREZANI, L. et al. Índice de geoacumulação de mercúrio na bacia do igarapé do Educandos (Manaus/Amazonas). **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 2, n. 3, p. 161-170, 2016.

USGS – NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER. **Mineral Commodity Summaries**. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-mercury.pdf>. Acesso em: 15 set. 2023.

VIANNA, A. S. et al. Exposição ao mercúrio e anemia em crianças e adolescentes de seis comunidades da Amazônia Brasileira. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 27, p. 1859-1871, 2022.

WWF. **Convenção de Minamata sobre o mercúrio: Os desafios da implementação**. Convenção de Minamata. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/politicaspublicas/convencao_