



Universidade Federal do Amapá  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais



IRVIN BENITO ISMANTO MARTOREDJO

**TENDÊNCIAS NA DISTRIBUIÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO  
ENTRE HUMANOS E ANIMAIS NA AMAZÔNIA INFLUENCIADAS PELA  
MINERAÇÃO DE OURO EM PEQUENA ESCALA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

MACAPÁ – AP

2023

IRVIN BENITO ISMANTO MARTOREDJO

**TENDÊNCIAS NA DISTRIBUIÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO  
ENTRE HUMANOS E ANIMAIS NA AMAZÔNIA INFLUENCIADAS PELA  
MINERAÇÃO DE OURO EM PEQUENA ESCALA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Alexandro Cezar Florentino

Co-orientadora: Dra. Lenize Batista Calvão Santos

MACAPÁ - AP

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP  
Elaborado por Mário das Graças Carvalho Lima Júnior – CRB-2 / 1451

---

M387 Martoredjo, Irvin Benito Ismanto.

Tendências na distribuição da contaminação por mercúrio entre humanos e animais na Amazônia influenciadas pela mineração de ouro em pequena escala: uma revisão sistemática / Irvin Benito Ismanto Martoredjo. - Macapá, 2023.

1 recurso eletrônico. 49 folhas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Macapá, 2023.

Orientador: Alexandro Cezar Florentino.

Co-orientadora: Lenize Batista Calvão Santos.

Modo de acesso: World Wide Web.

Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Amazônia. 2. Mercúrio. 3. Ouro - Minas e mineração. I. Florentino, Alexandro Cezar, orientador. II. Santos, Lenize Batista Calvão. III. Universidade Federal do Amapá. IV. Título.

CDD 23. ed. – 622.342209811

---

MARTOREDJO, Irvin Benito Ismanto. **Tendências na distribuição da contaminação por mercúrio entre humanos e animais na Amazônia influenciadas pela mineração de ouro em pequena escala**: uma revisão sistemática. Orientador: Alexandro Cezar Florentino. 2023. 49 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais. Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2023.


**IRVIN BENITO ISMANTO MARTOREDJO**

**TENDÊNCIAS NA DISTRIBUIÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO  
ENTRE HUMANOS E ANIMAIS NA AMAZÔNIA INFLUENCIADAS PELA  
MINERAÇÃO DE OURO EM PEQUENA ESCALA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Aprovada em 29 de dezembro de 2023.


**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **ALEXANDRO CEZAR FLORENTINO**  
Data: 23/01/2024 22:33:10-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Alexandro Cezar Florentino - Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)

Documento assinado digitalmente  
 **LENIZE BATISTA CALVAO SANTOS**  
Data: 24/01/2024 10:22:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dra. Lenize Batista Calvão Santos - Universidade Federal do Pará (UFPA)

Documento assinado digitalmente  
 **ALEX DE NAZARE DE OLIVEIRA**  
Data: 24/01/2024 14:26:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Alex de Nazaré Oliveira - Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)

Documento assinado digitalmente  
 **ANTONIO FERREIRA DE OLIVEIRA**  
Data: 24/01/2024 23:20:05-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Antonio Ferreira de Oliveira - Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)

Documento assinado digitalmente  
 **DAIMIO CHAVES BRITO**  
Data: 24/01/2024 14:36:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Daímio Chaves Brito - Universidade do Estado do Amapá (UEAP)

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que me apoiaram nesta dissertação. Primeiramente, agradeço à minha família pela paciência e apoio, e até mesmo pela sugestão de tentar estudar no Brasil.

Agradeço imensamente a todos os membros do Laboratório de Ictio e Genotoxicidade - LIGEN, que me apoiaram sob a supervisão do professor Dr. Alexandro Cezar Florentino, que também foi o orientador principal do meu projeto. Além disso, sou grato à Dra. Jéssica Caroline Evangelista Vilhena e ao Dr. Antonio Ferreira de Oliveira, como pós-doutorandos que revisaram meu trabalho e deram suas opiniões.

Minha co-orientadora, Dra. Lenize Batista Calvão Santos, e seus revisores pela Universidade Federal do Pará (UFPA) merecem agradecimentos pelo apoio nas técnicas de revisão sistemática e ciencométrica/ bibliometria.

Agradeço à equipe da Universidade de Brasília (UNB), ao Dr. Carlos José Sousa Passos e à Dra. Andréia de Almeida pela assistência na análise de geoprocessamento.

Além disso, gostaria de agradecer ao Dr. Alex Bruno Lobato Rodrigues pela revisão adicional no artigo. Sua contribuição foi essencial para aprimorar nosso trabalho.

Agradeço a todos os professores que ofereceram as diferentes disciplinas durante meu curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), bem como à Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), e ao departamento Pró-Reitoria de Cooperação e Relações Interinstitucionais (PROCRI) e especialmente Sr. José Cosme Dos Anjos Farias, pela assistência aos estudantes internacionais. Agradeço o Dr. Paulo Gustavo Pellegrino Correa por ajudar com o processo de adaptação ao país.

Expresso minha gratidão pela bolsa fornecida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Amapá (FAPEAP).

Por fim, expresso minha gratidão ao governo federal do Brasil, ao governo local do Amapá pela oportunidade dada para estudar aqui, e ao pessoal da imigração em Amapá e à embaixada no Suriname pela paciência comigo.

## RESUMO

Martoredjo, I. B. **Tendências na distribuição da contaminação por mercúrio entre humanos e animais na amazônia influenciadas pela mineração de ouro em pequena escala: uma revisão sistemática** 49 f. Dissertação – Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2023.

A mineração clandestina em pequena escala persiste em uma tendência crescente e são consideradas a principal fonte de emissões de mercúrio (Hg) de origem antropogênica na região da floresta amazônica. As atividades de exploração não só promovem a erosão, acelerando a transmissão dos sedimentos naturalmente ricos em Hg da Amazônia, mas também introduzem concentrações adicionais de Hg<sup>0</sup> através de suas práticas rudimentares de amalgamação de ouro. A contaminação por Hg é uma grande preocupação para a saúde devido à sua capacidade de bioacumular e biomagnificar nas cadeias alimentares ecológicas, especialmente nas vias aquáticas, onde o mercúrio aquoso pode ser convertido em metilmercúrio (MeHg), uma neurotoxina potente e biocompatível conhecida. Essas características são agravadas pela natureza volátil e pela mobilidade aumentada do mercúrio, especialmente em situações de maior atividade antropogênica e degradação florestal. As concentrações atmosféricas podem ser altas e permanecerem indetectáveis sob a folhagem das árvores. Dessa forma, a metodologia se propõe a fazer uma avaliação espacial da contaminação tecidual por Hg, com base em dados secundários obtidos de uma revisão sistemática de pesquisas contemporâneas realizadas entre 2017 e 2023, conforme os protocolos Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) e Population, Exposure, Comparator, Outcome (PECO). Os resultados da revisão caracterizaram os níveis de Hg nos músculos dos peixes, notavelmente altos em espécies predatórias. As avaliações *in-situ* subsequentes nos ecossistemas aquáticos e a importância de uma dieta à base de peixe entre as populações da Amazônia revelaram que os níveis de Hg no cabelo humano excediam o nível de tolerância da Organização Mundial da Saúde de 6 µg/g. Além disso, a análise geográfica concluiu que a alta contaminação tecidual era onipresente, independentemente da proximidade com áreas de mineração em pequena escala. Isso destaca a necessidade de estudos adicionais em territórios sub-representados nos dados espaciais.

**Palavras-chave:** Amazônia, contaminação de mercúrio, mineração de pequena escala.

## SUMMARY

Martoredjo, I. B. **Trends in the distribution of mercury contamination among humans and animals in the amazon influenced by small-scale gold mining: a systematic review** 49 p. Dissertation – Department of Environment and Development, Federal University of Amapá, Macapá, 2023.

Clandestine small-scale mining operations persist in a rising trend and are considered the main source of anthropogenic mercury (Hg) emissions in the Amazon rainforest region. The exploitation activities not only promote erosion, accelerating the transmission of the Amazon's naturally high Hg sediments, but also introduce additional Hg<sup>0</sup> concentrations through their rudimentary gold amalgamation practices. The contamination of Hg is a major health concern due to its ability to bioaccumulate and biomagnify within the ecological food chains, especially in waterways, where aqueous mercury can be converted to methylmercury (MeHg), a known potent and biocompatible neurotoxin. These characteristics are aggravated by mercury's volatile nature and increased mobility, especially in situations of higher anthropogenic activity and forest degradation. Atmospheric concentrations can be high and remain undetected beneath the tree foliage. Therefore, the methodology proposes to carry out a spatial evaluation of tissue contamination by Hg, based on secondary data obtained from a systematic review of contemporary research conducted between 2017 until 2023, following the Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) and Population, Exposure, Comparator, Outcome (PECO) protocols. The review results characterized Hg levels in fish muscles, notably high in predatory species. Subsequent *in-situ* assessments in aquatic ecosystems and the significance of a fish diet among Amazon populations revealed that human hair Hg levels exceeded the World Health Organization's tolerance level of 6 µg/g. Furthermore, geographical analysis concluded that high tissue contamination was ubiquitous, regardless of proximity to small-scale mining areas. This underscores the need for additional studies in underrepresented territories in spatial data.

**Keywords:** Amazonia, mercury contamination, small scale mining.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>9</b>
	<b>REFÊRENCIAS .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1	Geral .....	16
2.2	Específicos.....	16
<b>3</b>	<b>ARTIGO SUBMETIDO NO JOURNAL MDPI TOXICS: TENDÊNCIAS NA DISTRIBUIÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO ENTRE HUMANOS E ANIMAIS .....</b>	<b>17</b>
<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>3</b>
2.1.	<i>Geoprocessamento.....</i>	5
2.2.	<i>Análise estatística .....</i>	5
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>6</b>
3.1.	<i>Mineração .....</i>	19
<b>4.</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>21</b>
4.1.	<i>Limitações .....</i>	23
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>24</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>25</b>



## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A Floresta Amazônica, muitas vezes aclamada como rico em biodiversidade e o pulmão da Terra, enfrenta uma crise ambiental crescente alimentada por operações de mineração clandestina em pequena escala na região.

A contaminação por mercúrio (Hg) representa uma grave ameaça ao delicado equilíbrio ecológico da Amazônia e um grande desafio tanto para a saúde pública quanto para o meio ambiente na região amazônica, impulsionada pelas atividades de mineração artesanal ou em pequena escala do metal ouro. A liberação de concentrações substanciais de mercúrio no sedimento, na atmosfera da floresta e nas vias fluviais tem sido bem documentada (Casagrande *et al.*, 2020, 2023; Gerson *et al.*, 2022; Hacon *et al.*, 2020). Este setor se destaca como o principal contribuinte para o consumo e as emissões antropogênicas de mercúrio (Crespo-Lopez *et al.*, 2021), com uma parte significativa do setor informal recorrendo a práticas rudimentares de amalgamação para a extração de ouro devido às oportunidades limitadas nas regiões rurais (Adler Miserendino *et al.*, 2018; Esdaile; Chalker, 2018).

A prevalência de operações de mineração em pequena escala está testemunhando uma expansão sem precedentes em toda a floresta amazônica. A mineração continua na vanguarda do desmatamento e da degradação florestal, especialmente para os outros países amazônicos com territórios no Amazônia ocidentais (uma perda da floresta de quase 1000 km<sup>2</sup> por mineração de ouro artesanal no Peru) e norte, no escudo da Guiana (Espejo *et al.*, 2018; Finer M, Ariñez A, 2023; Kalamandeen *et al.*, 2020). Em 2020, o Brasil teve uma taxa anual de 101,7 km<sup>2</sup> de floresta perdida por mineração ilegal (Siqueira-Gay; Sánchez, 2021). Os tipos de exploração em pequena escala são a mineração subterrânea, aluvial e a céu aberto, sendo esta última a mais prevalente na Amazônia (Goix *et al.*, 2019; Londoño *et al.*, 2023; Moulatlet *et al.*, 2023). Notavelmente, nas bacias dos rios Madeira, Tapajós e Madre de Dios são regiões-chave para a mineração aluvial na Amazônia, caracterizadas por operações de dragagem (Kahhat *et al.*, 2019; Queiroz *et al.*, 2022).

Esse aumento nas atividades de mineração não só intensifica a liberação de mercúrio, mas também levanta preocupações sobre as implicações ecológicas e sociais mais amplas na região. Atividades de mineração ilegais estabeleceram sua própria infraestrutura de transporte clandestina, utilizando estradas, pistas de pouso e vias fluviais para navegar e invadir territórios indígenas (Achatz *et al.*, 2021; Alcalá-Orozco; Caballero-Gallardo; Olivero-Verbel, 2019; da

Silva *et al.*, 2023; Vallejos *et al.*, 2020; Vega *et al.*, 2018). A disseminação e mobilização de mercúrio dentro desses territórios surge como uma preocupação significativa, especialmente considerando que tanto a população ribeirinha rural quanto os próprios garimpeiros dependem fortemente de peixes como alimento básico (De Oliveira *et al.*, 2021; Taux; Kraus; Kaifie, 2022; Vasconcellos *et al.*, 2021).

Os sistemas aquáticos desempenham um papel crucial no ciclo do mercúrio na Amazônia (Mestanza-Ramón *et al.*, 2023). Embora o processo não seja totalmente compreendido, sabe-se que o mercúrio elementar ( $Hg^0$ ) introduzido pela mineração e o mercúrio inorgânico ( $Hg^{2+}$ ) natural, particularmente prevalente nos sedimentos da região da Amazônia e em tributários de água preta, podem ser convertidos em metilmercúrio (MeHg) por microrganismos nos ecossistemas aquáticos, uma forma mais biocompatível e potente do elemento (Isaure *et al.*, 2020; Junk *et al.*, 2015; Kasper *et al.*, 2018; Ma; Du; Wang, 2019). Portanto, um aumento na mobilização de espécies de Hg, incluindo MeHg, deve ser esperado nas vias fluviais onde a poluição mineira é predominante. Além disso, a região da Amazônia possui altos níveis de depósitos naturais de mercúrio inorgânico nos sedimentos, particularmente em tributários de água preta. A Convenção de Minamata, adotada pelos países amazônicos, destaca essa questão. Portanto, é essencial entender esse ciclo para mitigar os danos causados pela contaminação por mercúrio (Silva *et al.*, 2017). Embora volátil à temperatura ambiente, o mercúrio é uma substância prioritária de preocupação com a saúde pública, sendo ubíquo, e pode causar danos celulares atacando o sistema nervoso central, com a complicação mais notável de sintomas neurológicos e sistemas vasculares, como indicado por uma revisão contemporânea de escopo de pesquisa (Crespo-Lopez *et al.*, 2023).

Dada a vastidão da região amazônica internacional, espera-se que haja lacunas geoespaciais na pesquisa sobre a contaminação por Hg, uma consequência da mineração em pequena escala clandestina (Rudke *et al.*, 2020). No entanto, a mineração clandestina em pequena escala na Amazônia tem uma área típica de até 10.000 m<sup>2</sup> (Lobo *et al.*, 2018), que pode estar além do escopo da resolução convencional de imagens de satélite e pode não ser detectada no mapeamento com sensoriamento remoto. Além disso, para a exploração aluvial, o rastreamento requer a classificação das plumas de sedimentos ou a presença das próprias dragas (Moomen *et al.*, 2022; Rudke *et al.*, 2020).

Atualmente, há uma ausência notável de uma revisão sistemática e meta-análise que poderiam preencher essas lacunas (Santos-Sacramento *et al.*, 2021). (Lobo *et al.*,

2018)(Moomen *et al.*, 2022; Rudke *et al.*, 2020) Tal análise poderia fornecer uma representação espacial da bioacumulação de mercúrio no nível do tecido, acomodando assim uma avaliação mais abrangente da situação. Isso levou à questão norteadora geral que impulsionam essa pesquisa: Quais áreas na região da Amazônia o estudo de avaliação de mercúrio se concentra e quais são os níveis médios em animais e humanos?

Portanto, esta pesquisa sugere uma revisão de escopo como uma abordagem preliminar para avaliar as concentrações de Hg no tecido representadas por estudos realizados entre 2017 a 2023 em contraste com a pegada geográfica da mineração em pequena escala.

A hipótese principal desta pesquisa sugere maiores concentrações de pesquisa e alto mercúrio total (THg) nos tecidos onde a atividade de mineração em pequena escala, especialmente as atividades ilegais, é alta. Isso significa que a distribuição espacial dos estudos existentes sobre o impacto do mercúrio na Amazônia é desproporcional, deixando algumas áreas críticas sem dados suficientes para avaliar os riscos e consequências da exposição ao mercúrio.

Esta pesquisa é crucial para atender a urgência de uma perspectiva abrangente sobre a compreensão da contaminação por mercúrio na Amazônia e da cadeia alimentar. Isso é especialmente relevante para as às comunidades tribais rurais que dependem de peixes como parte fundamental de sua dieta. As descobertas contribuirão para o conhecimento existente, auxiliando formuladores de políticas, ambientalistas e comunidades locais em formulação de estratégias específicas para mitigar os efeitos adversos da mineração em pequena escala no ecossistema amazônico e saúde humana.

## REFERÊNCIAS

ACHATZ, Rafaela Waddington *et al.* Impacts of the Goldmining and Chronic Methylmercury Exposure on the Good-Living and Mental Health of Munduruku Native Communities in the Amazon Basin. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 18, n. 17, p. 8994, 2021.

ADLER MISERENDINO, Rebecca *et al.* Mercury Pollution in Amapá, Brazil: Mercury Amalgamation in Artisanal and Small-Scale Gold Mining or Land-Cover and Land-Use Changes?. **ACS Earth and Space Chemistry**, [s. l.], v. 2, n. 5, p. 441–450, 2018.

ALCALA-OROZCO, Maria; CABALLERO-GALLARDO, Karina; OLIVERO-VERBEL, Jesus. Mercury exposure assessment in indigenous communities from Tarapaca village, Coutuhe and Putumayo Rivers, Colombian Amazon. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 26, n. 36, p. 36458–36467, 2019.

CASAGRANDE, Gabriela Cristina Rabello *et al.* Assessment of atmospheric mercury deposition in the vicinity of artisanal and small-scale gold mines using glycine max as bioindicators. **Water, Air, & Soil Pollution**, [s. l.], v. 231, p. 1–14, 2020.

CASAGRANDE, Gabriela Cristina Rabello *et al.* Atmospheric mercury in forests: accumulation analysis in a gold mining area in the southern Amazon, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 195, n. 4, p. 477, 2023.

CRESPO-LOPEZ, Maria Elena *et al.* Mercury: What can we learn from the Amazon?. **Environment International**, [s. l.], v. 146, 2021.

CRESPO-LOPEZ, Maria Elena *et al.* Revisiting Genetic Influence on Mercury Exposure and Intoxication in Humans: A Scoping Review. **Toxics**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. 967, 2023.

DA SILVA, Carlos Fabricio Assunção *et al.* The drivers of illegal mining on Indigenous Lands in the Brazilian Amazon. **The Extractive Industries and Society**, [s. l.], v. 16, p. 101354, 2023.

DE OLIVEIRA, Débora Francielli *et al.* Mercury in wild animals and fish and health risk for indigenous Amazonians. **Food Additives & Contaminants: Part B**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 161–169, 2021.

ESDAILE, Louisa J.; CHALKER, Justin M. The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. **Chemistry - A European Journal**, [s. l.], v. 24, n. 27, p. 6905–6916, 2018.

GERSON, Jacqueline R *et al.* Amazon forests capture high levels of atmospheric mercury pollution from artisanal gold mining. **Nature communications**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 559, 2022.

GOIX, Sylvaine *et al.* Quantifying the impacts of artisanal gold mining on a tropical river system using mercury isotopes. **Chemosphere**, [s. l.], v. 219, p. 684–694, 2019.

HACON, Sandra De Souza *et al.* Mercury Exposure through Fish Consumption in Traditional Communities in the Brazilian Northern Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 17, n. 15, p. 5269, 2020.

ISAURE, Marie-Pierre *et al.* Relationship Between Hg Speciation and Hg Methylation/Demethylation Processes in the Sulfate-Reducing Bacterium *Pseudodesulfovibrio hydrargyri*: Evidences From HERFD-XANES and Nano-XRF. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 11, p. 584715, 2020.

JUNK, Wolfgang J. *et al.* A classification of the major habitats of Amazonian black-water river floodplains and a comparison with their white-water counterparts. **Wetlands Ecology and Management**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 677–693, 2015.

KAHHAT, Ramzy *et al.* Environmental impacts of the life cycle of alluvial gold mining in the Peruvian Amazon rainforest. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 662, p. 940–951, 2019.

KASPER, Daniele *et al.* **Mercury in Black-Waters of the Amazon**. [S. l.: s. n.], 2018.

LOBO, Felipe De Lucia *et al.* Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI/Sentinel-2 Imagery (2017). **Remote Sensing**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1178, 2018.

LONDOÑO, Natalia Cano *et al.* Life Cycle impacts assessment of two gold extraction systems in Colombia: Open-pit and alluvial mining. [s. l.], 2023.

MA, Ming; DU, Hongxia; WANG, Dingyong. Mercury methylation by anaerobic microorganisms: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 49, n. 20, p. 1893–1936, 2019.

MESTANZA-RAMÓN, Carlos *et al.* Assessment of Hg pollution in stream waters and human health risk in areas impacted by mining activities in the Ecuadorian Amazon. **Environmental Geochemistry and Health**, [s. l.], v. 45, n. 10, p. 7183–7197, 2023.

MOOMEN, Abdul-Wadood *et al.* Assessing the Applications of Earth Observation Data for Monitoring Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) in Developing Countries. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 14, n. 13, p. 2971, 2022.

MOULATLET, Gabriel M. *et al.* A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards. **Chemosphere**, [s. l.], v. 339, p. 139700, 2023.

QUEIROZ, Julia *et al.* Socioeconomic cost of dredge boat gold mining in the Tapajós basin, eastern Amazon. **Resources Policy**, [s. l.], v. 79, p. 103102, 2022.

RUDKE, Anderson Paulo *et al.* Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS- and remote sensing-based assessment. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 263, p. 110392, 2020.

SANTOS-SACRAMENTO, Leticia *et al.* Human neurotoxicity of mercury in the Amazon: A scoping review with insights and critical considerations. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 208, 2021.

SILVA, Rafaela Rodrigues Da *et al.* Convenção de Minamata: análise dos impactos socioambientais de uma solução em longo prazo. **Saúde em Debate**, [s. l.], v. 41, n. spe2, p. 50–62, 2017.

SIQUEIRA-GAY, Juliana; SÁNCHEZ, Luis E. The outbreak of illegal gold mining in the Brazilian Amazon boosts deforestation. **Regional Environmental Change**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 1–5, 2021.

TAUX, Kira; KRAUS, Thomas; KAIFIE, Andrea. Mercury Exposure and Its Health Effects in Workers in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) Sector—A Systematic Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 19, n. 4, 2022.

VALLEJOS, Patricia Quijano *et al.* Undermining Rights: Indigenous Lands and Mining in the Amazon. [s. l.], 2020.

VASCONCELLOS, Ana Claudia Santiago de *et al.* Health risk assessment of mercury exposure from fish consumption in Munduruku indigenous communities in the Brazilian Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 18, n. 15, p. 7940, 2021.

VEGA, Claudia M. *et al.* Human mercury exposure in yanomami indigenous villages from the Brazilian Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 1–13, 2018.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Revisar de forma sistemática os estudos contemporâneos sobre a presença e distribuição geográfica de mercúrio em tecidos animais e humanos na Amazônia, levando em consideração a influência da mineração de ouro em pequena escala na contaminação por mercúrio.

### **2.2 Específicos**

1. Realizar uma revisão sistemática nos estudos existentes para avaliar o impacto da contaminação por mercúrio na população humana e em animais na região amazônica;
2. Revisar os biomarcadores que são empregados nos estudos para medir os níveis de mercúrio total em amostras animais e humanas;
3. Revisar as concentrações teciduais de Hg obtidas nos estudos com referências estabelecidas para indicar níveis dos efeitos potenciais na saúde das populações animal e humana;
4. Analisar a distribuição espacial dos resultados da revisão, em conjunto com os territórios conhecidos de mineração em pequena escala.



**3 ARTIGO SUBMETIDO NO JOURNAL MDPI TOXICS: TENDÊNCIAS NA DISTRIBUIÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO ENTRE HUMANOS E ANIMAIS**

Review

# Mercury in the Amazon: Presence in Animal and Human Tissues and Geographic Distribution by Scoping Review

Irvin Martoredjo<sup>1</sup>, Lenize Batista Calvão Santos<sup>2</sup>, Jéssica Caroline Evangelista Vilhena<sup>1</sup>, Alex Bruno Lobato Rodrigues<sup>3</sup>, Carlos José Sousa Passos<sup>4</sup>, Andréia de Almeida<sup>4</sup>, and Alexandro Cezar Florentino<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA/UNIFAP), Universidade Federal Do Amapá, Rod. Juscelino Kubitschek, Km 02 - Jardim Marco Zero, 68903-419, Macapá, AP, Brazil; irvmarto@gmail.com; vilhena.jessica@gmail.com; alexandrocezar@unifap.br

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia (PPGECO), Instituto de Ciências Biológicas (ICB), Universidade Federal do Pará (UFPA), Rua Augusto Correia, N.1, Bairro Guamá, Belém 66075-110, Pará, Brazil; lenizecalvao@gmail.com

<sup>3</sup> Analytical Chemistry Laboratory, Department of Exact and Technological Sciences, Federal University of Amapá, Rod. JK, km 02, Macapá 68903-419, Brazil; alex.rodrigues@unifap.br

<sup>4</sup> Faculty UnB at Planaltina (FUP/UnB) Planaltina, University of Brasília, Brasília, Federal District (DF), 73345-010, Brazil; cjpassos@unb.br; andreiaalmeida.df@gmail.com

\* Correspondence: e-mail@e-mail.com

**Abstract:** A contaminação por mercúrio na Amazônia é uma preocupação significativa para a saúde pública, decorrente tanto de fontes naturais quanto de atividades intensivas de mineração na região. Este metal é usado para separar o ouro dos sedimentos, formando uma amálgama que facilita a extração de metais preciosos. Nesse sentido, esse estudo tem como foco responder as seguintes perguntas: Qual é o impacto da mineração relacionada ao mercúrio na população animal e humana na Amazônia? O objetivo geral deste estudo foi realizar uma revisão sistemática da literatura existente para identificar lacunas na cobertura geográfica e avaliar o impacto da contaminação por mercúrio na população humana e animal na região amazônica. Nossa hipótese é de que estudos e concentrações mais elevadas de mercúrio em amostras de tecido estarão mais próximos das áreas de mineração. Empregamos os protocolos PECO e PRISMA-ScR para coletar artigos publicados entre 2017 e 2023, selecionados com base em critérios que representam pontos projetados no mapa dentro dos limites biogeográficos da Amazônia. As concentrações de mercúrio aumentam com os níveis tróficos, atingindo valores elevados como 3,7 µg/g em músculos de peixes predadores e 34,9 µg/g em cabelo humano. O nível médio de mercúrio em humanos excede 6 µg/g, ultrapassando os níveis de tolerância. Embora as regiões de mineração apresentem altas concentrações de mercúrio, a maior incidência é observada entre as populações com dietas à base de peixe. A pesquisa em peixes é crucial para avaliar o risco à saúde humana, dado que os peixes representam a principal fonte de proteína na região.

**Keywords:** Mercúrio de tecido; Impacto ambiental; Mineração; Distribuição espacial; Ecossistemas aquáticos; Comunidades ribeirinhas; Ecotoxicologia; Ecoregião; Biosfera; Hábitos de dieta

Citation: To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Firstname Lastname

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



Copyright: © 2023 by the author. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introdução

A vasta extensão geográfica da região amazônica, abarcando aproximadamente 7 milhões de km<sup>2</sup>, é caracterizada por uma notável diversidade biológica e pela presença

de ecossistemas complexos, compreendendo tanto ambientes aquáticos quanto terrestres [1–3]. A região, notável por sua relevância ecológica, vem sofrendo uma pressão crescente devido ao intensificado desenvolvimento de atividades antrópicas. Em particular, o setor de mineração se destaca como um dos principais fatores que impulsionam essa pressão. Esse aumento das atividades mineiras tem levado não apenas à deterioração da cobertura vegetal, mas também à erosão do solo, culminando na degradação das florestas da área. [4–6]. O Painel Científico para a Amazônia identifica essas atividades humanas como o principal catalisador da degradação florestal, impactando múltiplos aspectos dos ecossistemas [7].

Na Amazônia, a dinâmica da Mineração de Ouro Artesanal e em Pequena Escala (ASGM) variou significativamente entre os países, embora geralmente tenha sido desencadeada pela descoberta de novos depósitos auríferos e estimulada pela lucratividade desta atividade. Esse fenômeno foi frequentemente exacerbado pela combinação de fraca aplicação das leis ambientais e intensa atividade de lobby. O surgimento da ASGM na Amazônia pode ser rastreado até a década de 1950, especificamente na bacia do Tapajós, localizada no estado do Pará, Brasil. Este período testemunhou uma onda de migração de cerca de 200.000 garimpeiros para a região, marcando o início de uma era de intensa exploração aurífera [8]. Durante a década de 1980, esta atividade se expandiu consideravelmente, atingindo territórios indígenas, o que levou a diversas implicações socioambientais.[9].

A mineração ilegal na Amazônia brasileira experimentou um crescimento exponencial, com um aumento superior a 90% desde 2017. Esse intenso crescimento resultou em uma perda significativa de cobertura florestal, alcançando um total de 101,7 km<sup>2</sup> apenas no ano de 2020. Um foco particular de preocupação tem sido a bacia do Tapajós, onde se observou um alto nível de desmatamento. Este aumento alarmante na perda de floresta está diretamente relacionado a operações de mineração em larga escala, as quais frequentemente se aproveitam de lacunas nas políticas ambientais vigentes. Essa tendência destaca a necessidade crítica de revisão e fortalecimento das medidas de governança ambiental, visando a proteção efetiva da biodiversidade e dos ecossistemas amazônicos [10,11]. É crucial ressaltar que a mineração em pequena escala realizadas por garimpeiros invasores ocorre em territórios protegidos e habitados por comunidades indígenas, sobretudo no Brasil. Entre 2017 e 2022, juntamente com as tendências crescentes de desmatamento, houve uma invasão de terras indígenas por atividades de mineração ilegal [11–16]. Essas invasões têm sido incentivada pelos preços crescentes do ouro, com o recente aumento observado durante a pandemia da COVID-19 como o exemplo mais recente [17].

Além disso, a exploração de recursos florestais contribui substancialmente para a degradação ambiental na Amazônia, com a mineração em pequena escala desempenhando um papel crucial em países como Suriname, Equador, Peru e Guiana [18–22].

Os garimpeiros invasores empregam métodos de extração rudimentares que envolvem o uso de mercúrio, resultando em contaminação dos recursos hídricos circundante [12,23–26]. Esta prática agrava o problema da contaminação por mercúrio, gerando a forma mais tóxica conhecida como metilmercúrio (MeHg) da conversão do mercúrio por bactérias redutoras de sulfato nos ambientes aquáticos. O MeHg, representa cerca de 80% do total de mercúrio encontrado no cabelo humano, onde a presença na matriz biológica indica a exposição crônica ao mercúrio. O MeHg percorre a cadeia alimentar, causando danos notavelmente neurológicos e cardiovasculares irreversíveis em animais e humanos [27,28].

Esta é uma ameaça significativa para as populações vulneráveis da Amazônia, cuja subsistência depende da natureza e o consumo de peixes é a principal fonte de proteína animal e a via primária de exposição ao mercúrio [26,29–33].

94 Todavia, é imprescindível considerar que a Amazônia naturalmente apresenta níveis  
95 elevados de mercúrio, provenientes de fontes vulcânicas nos Andes, presentes no solo  
96 florestal, que são transportados para os rios por afluentes, diluindo-se na água e aderindo  
97 aos sedimentos [34–37]. A exploração mineira pode, portanto, acelerar a liberação e  
98 mobilização de mercúrio inorgânico natural através do desmatamento e erosão, além do  
99 mercúrio elementar introduzido para o processo de amalgamação [38,39].

100 Revisões anteriores evidenciaram uma lacuna-espacial significativa nas publicações  
101 científicas sobre mercúrio na Amazônia, especificamente em países amazônicos,  
102 excluindo o Brasil, apesar da urgência do tema para as comunidades ribeirinhas, cuja  
103 subsistência depende da pesca. As publicações internacionais também carecem de  
104 representatividade, já que apresentam-se em números insuficientes [40]. Estudos  
105 cienciométricos sobre contaminação de Hg revelaram um foco mais acentuado na  
106 Amazônia em comparação com outros biomas brasileiros, com ênfase em mineração de  
107 ouro, exposição de peixes ao Hg, e contaminação por Hg no corpo d'água e sedimentos  
108 dos rios [41,42]. Adicionalmente, uma revisão sistemática recente sobre as características  
109 geológicas da bacia Amazônica destacou a distribuição desigual do enriquecimento de  
110 metais perigosos, incluindo o mercúrio, decorrente das atividades de mineração, assim  
111 como a escassez de dados provenientes de outros países na bacia Amazônica [43].

112 Uma revisão sobre guildas alimentares e hábitos alimentares na Amazônia revelou  
113 níveis relativamente elevados de MeHg em peixes predadores em comparação com seus  
114 homólogos não predadores [44]. Adicionalmente, uma revisão crítica sobre o risco do  
115 mercúrio para a saúde humana sugere a necessidade de dados específicos do local e do  
116 peixe, já que o consumo de peixe é a principal via de exposição ao mercúrio em humanos  
117 no mundo todo [45]. Assim, emerge a questão central: Qual é o impacto da mineração na  
118 contaminação por mercúrio na população animal e humana da Amazônia? O objetivo  
119 geral deste estudo é realizar uma revisão sistemática da literatura para identificar lacunas  
120 na cobertura geográfica e avaliar o impacto da contaminação por mercúrio na população  
121 humana e animal na região amazônica. Nossa hipótese é de que estudos e concentrações  
122 mais elevados de mercúrio em amostras de tecido estarão mais próximos das áreas de  
123 mineração.

## 124 2. Materiais e métodos

125 A utilização do PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and  
126 Meta-Analyses) na catalogação dos artigos permite que a revisão sistemática seja  
127 documentada de forma clara e transparente, e garante a replicabilidade do estudo [46,47].  
128 Esta revisão de escopo foi conduzida seguindo o PRISMA-ScR (Preferred Reporting Items  
129 for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews). O  
130 VosViewer™ versão 1.6.19.0 (Leiden, the Netherlands) foi empregado como uma  
131 ferramenta preliminar [48] para identificar as tendências na sintaxe de busca relacionada  
132 a esse tema, que é relevante para as concentrações de mercúrio na região amazônica. A  
133 análise foi realizada utilizando as palavras-chave presentes no título e no resumo dos  
134 estudos que foram aceitos para triagem. A área do estudo é a região ecológica amazônica  
135 internacional [49], uma vasta floresta tropical e bacia hidrográfica que se estende por nove  
136 países da América do Sul: Brasil, Peru, Colômbia, Venezuela, Equador, Suriname, Guiana,  
137 Bolívia, e Guiana Francesa.

138 O acrônimo PECO (Population, Exposure, Comparator, Outcome) é utilizado como  
139 um framework para delimitar a questão de pesquisa e estabelecer critérios de busca [50].  
140 Para o presente estudo, os critérios PECO foram definidos da seguinte maneira:

- 141 • Population: População humana e animais na região amazônica;
- 142 • Exposure: Exposição do Mercúrio (Hg);
- 143 • Comparator: Diferentes níveis de exposição ao mercúrio ou comparação entre  
144 diferentes espécies ou regiões e os valores permitidos pelas organizações de saúde;
- 145 • Outcome: Contaminação por Hg em tecidos animais em relação à dieta humana.

Cada um desses critérios desempenha um papel na estruturação e condução da pesquisa. Para apoiar esses critérios PECO, os artigos incluídos na revisão devem conter quantidades quantificáveis de mercúrio (Hg), com uma clara distinção entre amostras humanas e não humanas. Além disso, cada região de amostragem do estudo precisa permanecer dentro dos limites da região amazônica, conforme definido pela RAISG. Os estudos selecionados apresentam pesquisa original e não é uma revisão ou meta-análise. Isso garantirá que a pesquisa seja relevante e aplicável à população e ao ambiente em estudo. Tabela 1 mostra a estratégia de busca pelos parâmetros booleanos que são utilizados em forma inteira para opção avançada no tudo conteúdo dos itens nas bases de dados Web of Science e SCOPUS durante o período entre 2017 e 2023.

Tabela 1. Sintaxe de busca.

Argumentos	Sintaxe de busca
mercury in Amazon	amazon* AND (mercury* OR hg OR meh* OR methyl* OR "total mercury")
activity	AND (mining OR artisanal OR asgm OR "gold mining*" OR garimp* OR alluvial OR contamination OR "inorganic contaminant*" OR "trace mineral*" OR trophic)
specimen	AND (fish OR species OR population OR aquatic OR bioaccumulation OR community OR riverine OR "human hair" OR indigenous OR human OR nonhuman OR animal)
conditions	AND (exposure OR accumulation OR concentration OR content OR consumption)
biomarker	AND (tissue OR muscle OR protein OR hair OR blood)
exclui ex-situ	NOT (farm OR agriculture)

Todos os registros identificados foram avaliados quanto à relevância com base em seu título e resumo. Os textos completos de estudos potencialmente elegíveis foram recuperados e avaliados quanto à elegibilidade com base nos critérios predefinidos. Foram excluídos estudos que não mensurem Hg em tecidos animais e/ou seres humanos nem tenham coleta de tecidos realizada na região amazônica.

Os dados foram extraídos sistematicamente dos estudos selecionados usando um formulário padronizado. Cada artigo foi identificado por seu link DOI. As seguintes informações foram registradas para cada estudo:

- Características do Estudo: DOI, título e autor (es) do estudo;
- Características da População: Se o estudo se concentra em espécies humanas ou não humanas, a nomenclatura científica das espécies estudadas e sua guilda alimentar;
- Detalhes da Coleta: O local de coleta da amostra (em graus decimais) e o período durante o qual as amostras foram coletadas;
- Detalhes da Exposição ao Mercúrio: O tipo de tecido amostrado e a quantidade de mercúrio total encontrada nesses tecidos;
- Dados Adicionais: Quaisquer menções a regiões indígenas, barragens hidrelétricas ou Mineração de Ouro Artesanal e em Pequena Escala (ASGM), e detalhes da análise de mercúrio realizada;

Esta abordagem estruturada para a extração de dados garantiu consistência em todos os estudos incluídos na revisão.

A média mais alta de mercúrio total (THg) relatado para cada estudo é empregada para indicar o acúmulo na população humana ou espécies animais de alvo. Além disso, os dados de Hg em animais foram categorizados em suas respectivas guildas dietéticas

(hábitos alimentares). Neste estudo, os peixes piscívoros foram considerados no grupo carnívoros. Essa classificação foi feita para distinguir outras espécies animais piscívoras que se alimentam de peixes.

As concentrações de Hg relatadas foram avaliadas de acordo com as diretrizes a Organização das Nações Unidas (ONU) e a Organização Mundial da Saúde (OMS) em relação à alimentação humana, e estabeleceram níveis permitidos de mercúrio acumulado nos alimentos. O limite para peixes não predatórios é de 0,5 µg/g e para peixes predatórios é de 1,0 µg/g [51,52]. Esses limites também são reconhecidos pelo MERCOSUL, conforme a resolução - RDR nº 42, de 29 de agosto de 2013 [53].

Além disso, a OMS forneceu um valor orientativo para o mercúrio no cabelo, que é de 1,8 partes por milhão (ppm) ou 1,8 microgramas por grama (µg/g) [54]. Esse valor indica o nível de exposição ao mercúrio que pode estar associado a efeitos adversos para a saúde. No entanto, é importante notar que a tolerância básica humana ao mercúrio é fixada em apenas 6 µg/g [55]. Isso significa que mesmo níveis de mercúrio abaixo do limite considerado “perigoso” podem ainda representar um risco para a saúde humana. Porém, níveis de mercúrio acima de 10 µg/g no cabelo humano são considerados perigosos [56].

### 2.1. Geoprocessamento

A versão 3.20.3 do Quantum GIS [57] foi utilizada para registrar locais de amostragem significativos e projetados dentro do limite da ecorregião Amazônica (camada obtida do RAISG). Cada registro georreferenciado é ajustado, incluindo apenas locais de amostragem com valor médio distintivo de Hg ou valor médio combinado de Hg por artigo de pesquisa, mas de locais de amostragem com distância espacial significativa. Nesse sentido, amostras espaciais próximas com o mesmo valor de THg, mas dentro de 1 a 2 graus no Sistema de Referência de Coordenadas WGS84, foram representadas como uma só.

Para examinar as disparidades espaciais na área de estudo da Amazônia, a região foi categorizada com base nas distinções de ecorregiões definidas por Dinerstein et al. [58,59]. Essas distinções permitem o agrupamento de áreas em suas respectivas biorregiões, que incluem as regiões norte, central, ocidental e sul, bem como o Escudo das Guianas e o Estuário do Amazonas. Para analisar as atividades recentes de mineração, os polígonos de mineração delineados pela RAISG [49], que são categorizados como ativos e voltados para a extração de ouro, são integrados ao conjunto de dados da pegada de mineração global fornecido por Tang e Werner [60].

A distância dentre os pontos de amostra (pesquisas animais ou humanos) até a atividade de mineração é avaliada por 3 classes: < 20 km; 20 km a 50 km; e > 50 km, sendo respectivamente até 20 km à mineração influencia diretamente tanto o sedimento quanto a cadeia alimentar nas áreas circundantes [61,62], a uma distância de 50 km, observa-se uma contaminação significativa por mercúrio, impactando tanto o ecossistema local como a população humana que dele depende para seu sustento [63,64]. Para medir com precisão a proximidade de locais humanos ou animais a essas zonas de alto risco, convertemos os polígonos de área de mineração em pontos. Isso nos permitiu calcular a distância até a borda das áreas de mineração, fornecendo uma medida mais precisa do que usar o centróide dos polígonos de mineração.

### 2.2. Análise estatística

Os dados tabulados de mercúrio foram apresentados em médias e medianas. O uso do General linear model (GLM) é modelar o conjunto de dados para assumir uma regressão linear, e assume que os erros têm distribuições normais [65]. Portanto, o GLM foi utilizado para buscar relações estatísticas entre concentrações totais de Hg específicas de tecidos, crianças, idade fértil, ribeirinha, mineração, bem como para avaliar como as concentrações de metais variam entre grupos demográficos. Realizou-se uma análise de

regressão logística além do GLM, transformando a concentração total de mercúrio (Hg) em uma variável binomial. Esta transformação baseou-se em um limiar estabelecido de 6 µg/g. O Akaike Information Criteria (AIC) foi utilizado para selecionar o modelo com melhor ajuste [65]. Todas as análises foram feitas utilizando o software R versão 4.3.1 [66], e funções de GLM em R [65,67,68].

### 3. Resultados

A pesquisa bibliográfica realizada é apresentada na Figura 1 pelo fluxograma PRISMA 2020. Entre os 105 artigos aceitos após triagem, 66 são estudos sobre animais, 37 apenas estudos sobre humanos e 2 artigos continham amostras animais e humanas.

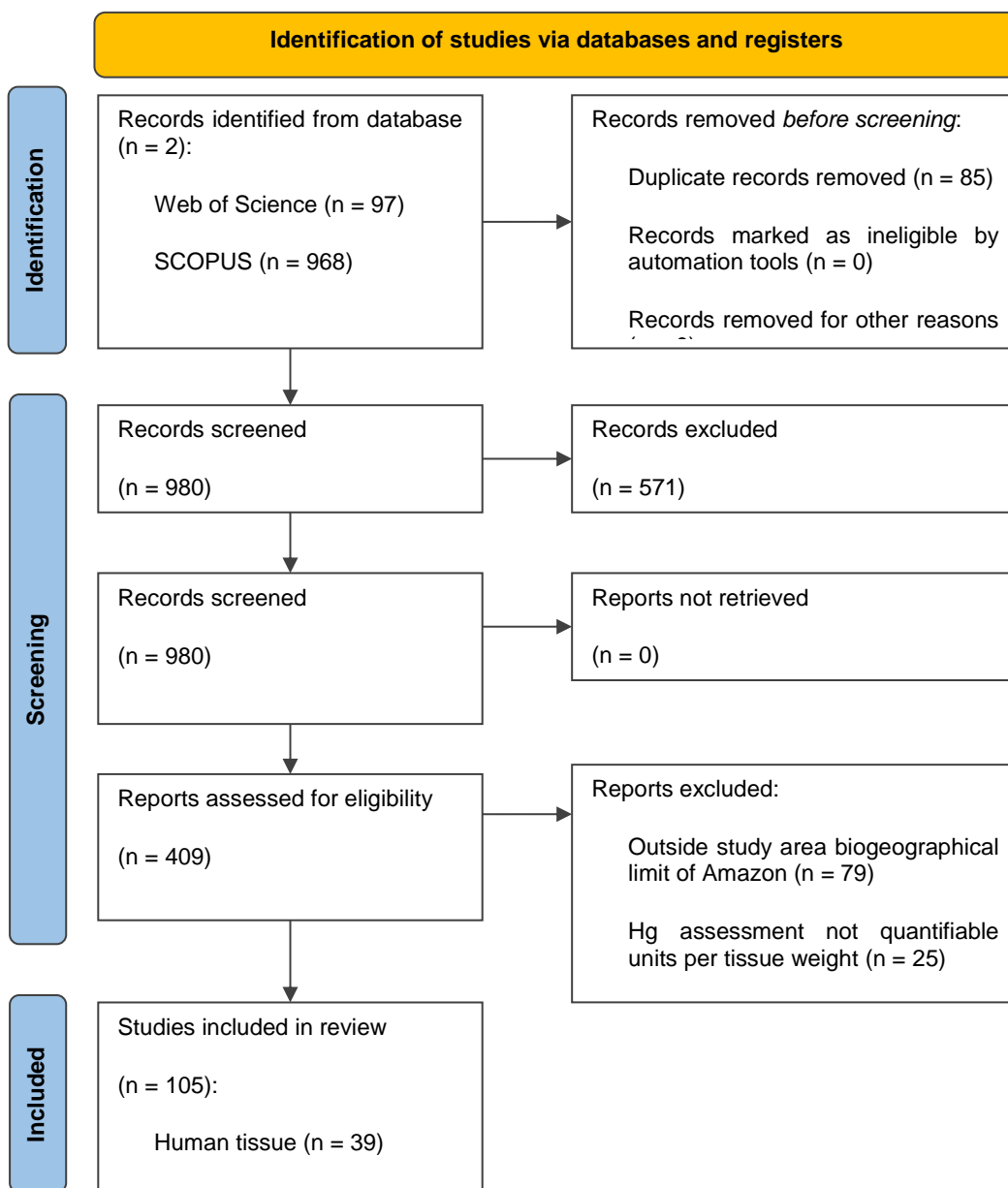


Figura 1. Diagrama de fluxograma de pesquisa de literatura de acordo com as diretrizes PRISMA 2020, apenas para pesquisa de bases de dados e registros.

#### 3.1. Study characteristics

Os 105 reports selecionados pela PRISMA foram processados pelo VosViewerTM para gerar 1.383 palavras-chave com base nos títulos e resumos dos artigos. Essa visualização bibliométrica é baseada na densidade de 8 ocorrências de palavras-chave relacionadas. A Figura 2 apresenta uma rede de co-ocorrência de palavras-chave nos artigos incluídos na revisão.

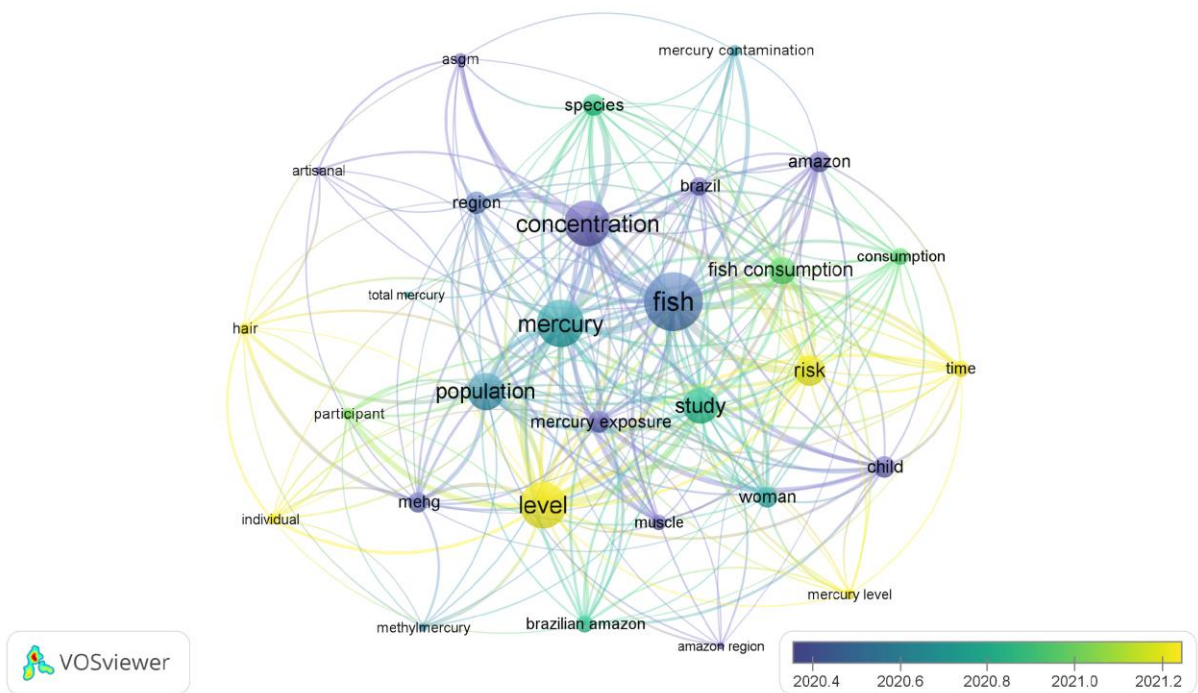


Figura 2. Análise de palavras-chave do VosViewer com relevância no ano de artigos aceitos por cores.

O resultado indica dominância em tecidos musculares de peixes com influência da ASGM, apresentando fatores de risco através do consumo de pescado, e estudos predominantemente realizados na região amazônica do Brasil. Adicionalmente, aponta que o Hg total e o metilmercúrio são formas medidas nos tecidos capilares e musculares, e na população fértil. Além disso, a classificação de cores na visualização VosViewer mostrou a maior ocorrência de palavras-chave relevantes nos estudos dentre 2020 a 2021, embora o maior volume de estudos tenha sido publicado em 2018 (Figura 3). Figura 3 mostra essa distribuição do número de artigos publicados sobre este tema, por ano e por país.



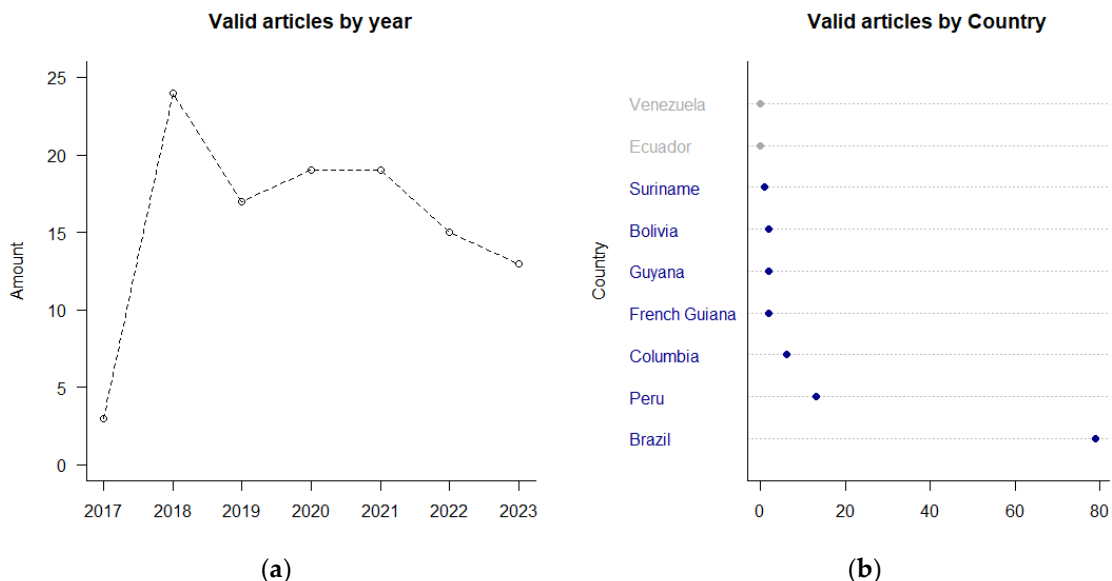


Figura 3. Ocorrências dos artigos: (a) validos por cada ano; (b) validos por país amazônico (aqueles sem estão acinzentados).

O Brasil é o país que mais publicou artigos sobre contaminação por mercúrio na Amazônia, com 25 artigos. Peru e Colômbia seguem com 13 e 6 artigos, respectivamente. A Guiana Francesa, Guiana e Bolívia publicaram 2 artigos cada, e o Suriname publicou 1 artigo. Equador e Venezuela não estão representados.

Na Figura 4, os gráficos de pizza mostram que entre os estudos analisados, o biomarcador mais utilizado foi músculo em tecidos animais, e nos estudos realizados com dados humanos o biomarcador mais utilizado foi cabelo.

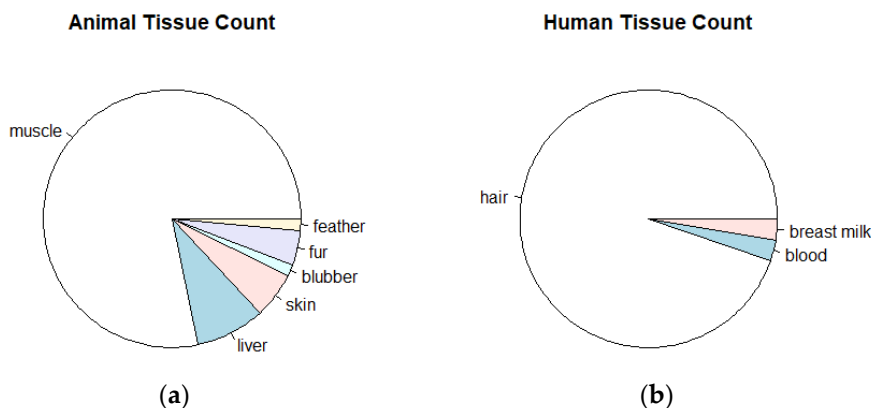


Figura 4. Amostras de tecido predominantes em conjuntos de dados: (a) não humanos; e (b) humanos após triagem.

Dentre os estudos que analisaram a presença de THg em animais, houve uma prevalência da análise de diferentes espécies de peixes, além disso houve uma categorização destes por guildas alimentares (Figura 5).

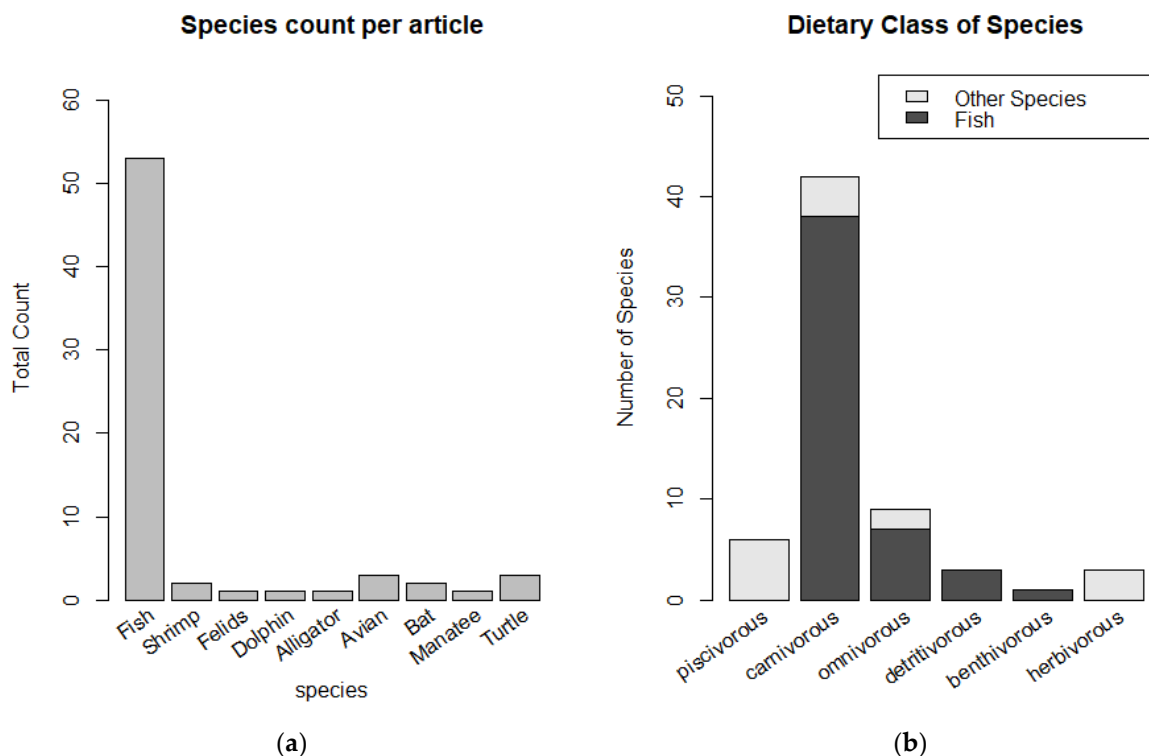


Figura 5. Principais fontes de dados obtidos: (a) das espécies e; (b) os níveis tróficos.

Além disso, com base nos resultados encontrados em estudos com animais, demonstrou-se que o tecido muscular pode ser categorizado em guildas alimentares predatórias e não predatórias. Os boxplots para estudos animais indicam a distribuição do THg nessas categorias seguintes: todas as espécies e seus tecidos (mediana 0.49 µg/g e IQR 1.17 µg/g), músculo de todos os peixes (mediana 0.417 µg/g e IQR 0.891 µg/g), músculo de peixes predadores (mediana 0.417 µg/g e IQR 1.02 µg/g) e músculo de não predadores (mediana 0.417 µg/g e IQR 0.266 µg/g). Peixes predadores, classificados como carnívoros é ligeiramente abaixo das diretrizes estabelecidas pela OMS (que indica um nível de 1 µg/g e 0.5 µg/g, respetivamente para peixes predadores e não predadores). Em contraste, o grupo não predatório, que inclui onívoros e outras espécies, exhibe níveis de THg que são geralmente mais baixos, sugerindo um nível médio mais seguro (Figura 6).

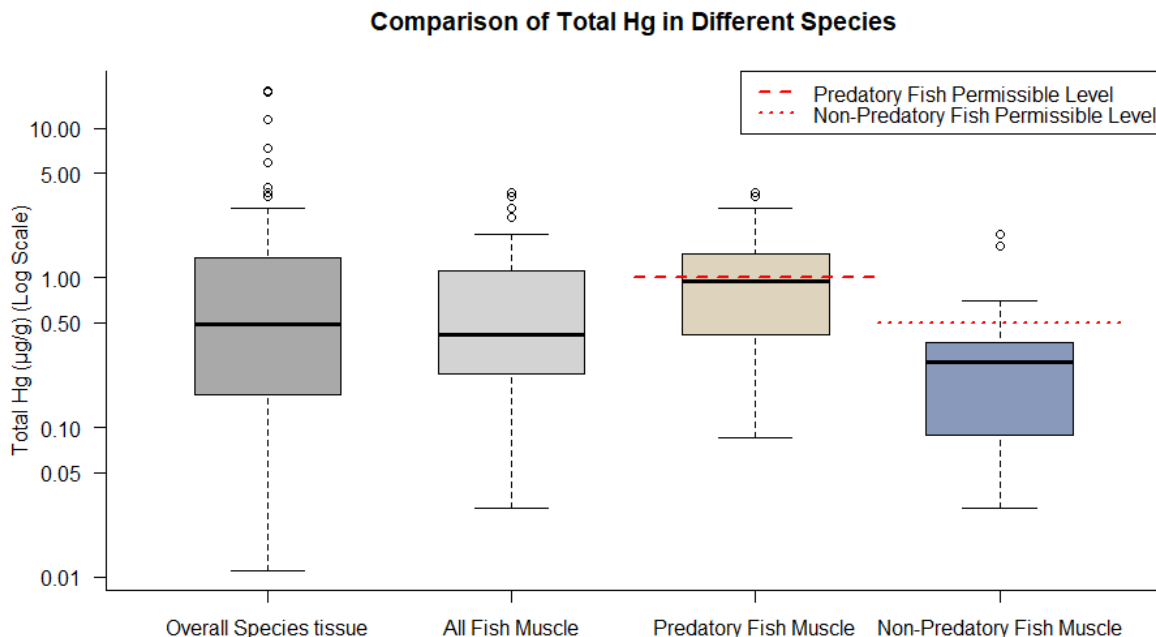


Figura 6. Representações das faixas de Hg (escala logarítmica) em amostras de animais em artigos de pesquisa aceitos. O tecido muscular é comparável às diretrizes da OMS.

Os resultados encontrados em estudos com humanos demonstraram uma comparação entre comunidades indígenas que vivem em aldeias ou áreas impactadas pela mineração. Portanto, os boxplots indicam a distribuição do THg nessas categorias de: todos os tecidos (mediana 8.5 µg/g e IQR 8.1 µg/g), cabelo humanos (mediana 9.15 µg/g e IQR 7.49 µg/g), estudos que menciona mineração (mediana 8.27 µg/g e IQR 10.65 µg/g), e estudos sobre a população indígenas (mediana 10.9 µg/g e IQR 4.9 µg/g). Cada categoria dos estudos ultrapassam a diretriz da OMS em cabelo, e ficam dentro a máxima tolerância para humanos e alarmante, de 6 µg/g e 10 µg/g respectivamente (Figura 7).

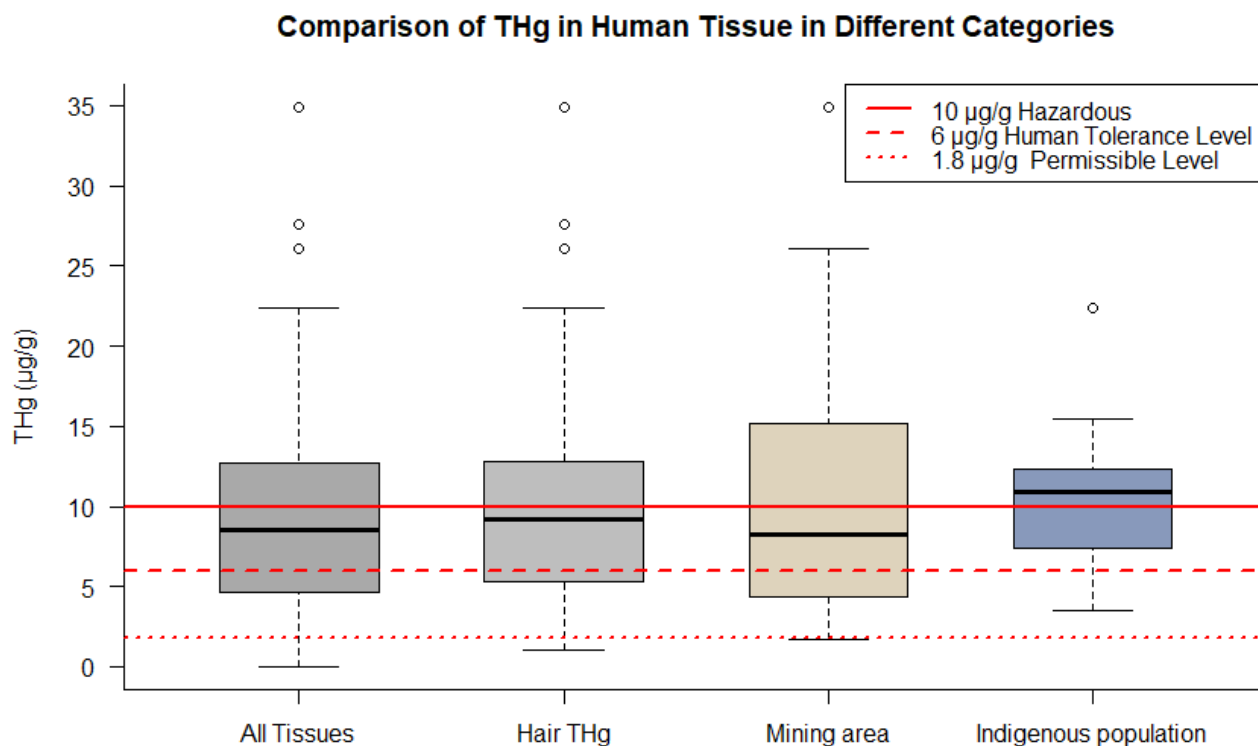


Figura 7. Comparação da concentração de THg em humanos por diferentes categorias.

Os resultados encontrados nos estudos demonstraram que as pesquisas ecotoxicológicas sobre Hg são predominantemente em ecossistemas aquáticos (predominantemente nos peixes), e com consideração a exposição nas comunidades indígenas e ribeirinhas nos principais rios e afluentes. A maior frequência de presença de THg nos principais tributários do rio Amazonas foram para *Plagioscion squamosissimus* (Pescada, Corvina), *Serrasalmus rhombeus* (Piranha preta) e *Cichla* spp. (Tucunarés). A guilda dos carnívoros foram as que apresentaram maiores valores de Hg variando de 0.086 a 5.920 µg/g e com a média de 1.058 µg/g, seguida pelos onívoros (0.029 µg/g a 0.700 µg/g) com uma média 0.316 µg/g, e detritívoros (0.064 µg/g a 0.370 µg/g) com média de 0.18 µg/g (Tabela 2).

Estudos que avaliaram peixes nos reservatórios hidrelétricos e regiões de represas mostraram o seguinte: Puruzinho e o Lago Catalão apresentaram maiores concentrações de mercúrio, em *S. rhombeus* (média 0.789 µg/g, e faixa 0.029 a 1.640) [69–71], por outro lado nos reservatórios das Usinas Hidrelétricas de Belo Monte e de Jirau destacam-se altas concentrações de mercúrios em *S. rhombeus* (0.480 µg/g) e menores em *Triportheus albus* (0.132 µg/g), respectivamente [72,73].

Tabela 2. Maior média de mercúrio no músculo dos registros pescados agrupados por localização de bacia.

Bacia hidrográfica*	mineração mencionada	País	Estudo	Espécie/ guilda de alimentação	THg (µg/g) em média/ medianat
A		Brasil	[74,75]**	<i>Hoplias malabaricus</i> , carnívoro	0.947†
A		Brasil	[76]	<i>Carcharhinus acronotus</i> , carnívoro	1.120
A, T	sim	Brasil	[77]	<i>Arapaima</i> sp., carnívoro	0.375
A,T		Brasil	[78]	<i>Plagioscion squamosissimus</i> , carnívoro	1.510
A	sim	Brasil	[79]	<i>Pseudoplatystoma tigrinum</i> , carnívoro	0.920

A		Brasil	[80]	<i>Ageneiosus inermis</i> , carnívoro	0.691
A		Brasil	[69]	<i>Acestrorhynchus falcirostris</i> , carnívoro	1.490
A		Brasil	[81]	<i>Colomesus asellus</i> , onívoro	0.350
T	sim	Brasil	[82]	Grupo Carnívoros: <i>Cichla monoculus</i> , <i>Plagioscion squamosissimus</i> , <i>Serrasalmus calmoni</i> .	0.668
T	sim	Brasil	[83]	<i>Plagioscion squamosissimus</i> , carnívoro	0.730
T	sim	Brasil	[84]	<i>Cichla pinima</i> , carnívoro	1.172
T		Brasil	[85]	<i>Serrasalmus rhombeus</i> , carnívoro	0.088
M		Brasil	[86]	Grupo carnívoros: <i>Plagioscion squamosissimus</i> , <i>Calophysus macropterus</i> , <i>Cichla pleiozona</i> e <i>Hoplias malabaricus</i> .	0.970
M		Brasil	[87]	<i>Prochilodus nigricans</i> , detritívoro	0.064
M		Brasil	[88]	<i>Serrasalmus rhombeus</i> , carnívoro	0.263
M	sim	Brasil	[89]	<i>Triportheus angulatus</i> , onívoro	0.290
M		Brasil	[70]	<i>Triportheus albus</i> , onívoro	0.029
M		Brasil	[90]	<i>Pinirampus pirinampu</i> , bentívoro	0.060
M		Brasil	[91]	<i>Arapaima gigas</i> , carnívoro	0.153
M		Brasil	[71]	<i>Serrasalmus rhombeus</i> , carnívoro	1.640
M		Brasil	[92]	<i>Plagioscion squamosissimus</i> , carnívoro e <i>Colossoma macropomum</i> , onívoro	0.086
M		Brasil	[93]	<i>Brachyplatystoma filamentosum</i> , carnívoro	0.402
M		Brasil	[94]	<i>Calophysus maropterus</i> , carnívoro	1.400
M		Peru/ Brasil (fronteira)	[95]	<i>Calophysus maropterus</i> , carnívoro	0.229
M		Brasil	[96]	<i>Cichla spp.</i> , carnívoro	0.128
M		Brasil	[72]	<i>Semaprochilodus spp.</i> (Jaraqui), detritívoro	0.132
M		Brasil	[97]	<i>Serrasalmus rhombeus</i> , carnívoro	0.268
M		Brasil	[98]	<i>Cichla spp.</i> (Tucunaré), carnívoro	0.435
M	sim	Brasil	[99]	<i>Serrasalmus rhombeus</i> , carnívoro	0.417
X		Brasil	[73]	<i>Hemiodus unimaculatus</i> , onívoro	0.480
Tp		Brasil	[100]	<i>Serrasalmus rhombeus</i> , carnívoro	0.304
Tp		Brasil	[101]	<i>Brycon falcatus</i> , onívoro	0.052
Ar	sim	Brasil	[13]	Grupo carnívoro: <i>Ageneiosus inermis</i> , <i>Boulengerella cuvieri</i> , <i>Cichla monoculus</i> , <i>Hoplias aimara</i>	0.580
Ar	sim	Brasil	[102]	<i>Curimata incompta</i> , detritívoro	0.370
Ar	sim	Brasil	[103]	<i>Plagioscion squamosissimus</i> , carnívoro	0.320†
J		Brasil	[104]	<i>Plagioscion squamosissimus</i> , carnívoro	1.090
MD	sim	Brasil	[105]	<i>Serrasalmus spp.</i> , carnívoro	0.280
MD	sim	Brasil	[106]	<i>Serrasalmus spp.</i> , carnívoros	3.720
B		Bolivia	[107]	<i>Brycon amazonicus</i> , onívoros	0.700

Br	sim	Brasil	[108]	<i>Pinirampus pinirampus</i> , carnívoro	0.869
Br	sim	Brasil	[32]	<i>Pygocentrus nattereri</i> , carnívoro	1.215
M	sim	Brasil	[109]	<i>Serrasalmus rhombeus</i> , carnívoro	0.283
Su	sim	Surina me	[110]	Vários, alto Hg no carnívoro: <i>acestorhynchus microlepsis</i> ; <i>hoplias malabaricus</i> ; <i>cichla ocellaris</i> ; <i>serrasalmus rhombeus</i> ; <i>Pristobrycon eigenmanni</i> .	2.528
C	sim	Giuania francesa	[111]	<i>Hoplias aimara</i> e <i>Boulengerella cuvieri</i> , carnívoro	2.900
Mz	sim	Guiana	[112]	<i>Ageneiosus ucayalensis</i> , carnívoro	5.920

\*Rio Amazonas principal: A, Rio Tapajós: T, Rio Madeira: M, Rio Xingu: X, Rio Teles Pirés: Tp, Rio Jiparaná: J, Rio Madre de Dios; MD, Rio Beni: B, Rio Branco: Br, Rio Suriname: Su, Rio Camopi: C, Rio Mazaruni: Mz.

\*\* Esses estudos tiveram a mesma coleta e a mesma média de THg.

A Tabela 3 mostra os registros restantes que mediram THg em tecidos de áreas amostrais na costa atlântica, de tecido hepático de peixes e de tecidos de outras espécies que não peixes. O valor THg nesses tecidos animais é em média 3,85 µg/g com uma faixa de 0,011 a 17,9 µg/g (fígado em *Arapaima gigas*).

Tabela 3. Mercúrio em peixes, aves, mamíferos e crustáceos oriundos dos rios da Amazônia Sul Americana.

Local	mineração mencionada	Estudo	Espécie	Tecido	THg (µg/g) em média
Rio Madeira, Rondônia, Brasil		[113]	<i>Arapaima gigas</i> , peixe carnívoro	hepático	17.420
Rio Araguari, Amapá, Brasil		[114]	<i>Anodus orinocensis</i> , peixe onívoro	hepático	0.500
Rio Madeira, Brasil		[115]	<i>Macrobrachium amazonicum</i> , camarão onívoro	músculo	0.610
Costa Atlântica, Ilha dos Caranguejos, Brasil		[116]	<i>Sciades herzbergii</i> , peixe onívoro	músculo	0.033
Mamirauá, Amazonas, Brasil		[117]	<i>Panthera onca</i> , mamífero carnívoro	pelagem	17.900
Rio Guaporé, Brasil		[118]	<i>Inia boliviensis</i> , golfinho piscívoro	gordura	1.323
Rio Beni, Bolívia		[119]	<i>Caiman yacare</i> , jacaré piscívoro	músculo	0.150
Rio Madeira, Brasil		[120]	<i>Ardea cocoi</i> , ave carnívoro	pena	4.046
Estação Biológica Cocha Cashu, Peru		[121]	Vários morcegos, alto Hg em <i>Rhynconycteris naso</i> , carnívoro	pelagem	7.440
Madre de Dios, Peru	sim	[122]	<i>Phyllostomus elongatus</i> , morcego carnívoro	pelagem	0.660
Figueiredo, Amazonas, Brasil		[123]	<i>Trichechus inunguis</i> , peixe-boi-da-amazônia, mamífero herbívoro	músculo	0.059
Rio Arauca e Rio Orinoco Colômbia	sim	[124]	<i>Inia sp.</i> e <i>Sotalia sp.</i> , mamífero, golfinhos piscívoros	músculo	0.870
Lagoa Itapuru mirim, Brasil		[125]	<i>Podocnemis unifilis</i> , réptil, carapaça, herbívoro	músculo	0.011

Rio Xingu e Teles Pires, Brasil	[126]	<i>Podocnemis unifilis</i> , réptil, carapaça, herbívoro	músculo	0.134
Rio Uatumã, Balbina Brasil	[127]	<i>Podocnemis expansa</i> , réptil, tartaruga-da-amazônia, onívoro	músculo	0.109
Teles pires, Brasil	[128]	<i>Chloroceryle amazona</i> , martim-pescador-verde, ave piscívora	Pena	11.570
Teles pires, Brasil	[129]	<i>Chloroceryle amazona</i> , martim-pescador-verde, ave piscívora	Pena	4.000
Rio Madeira, Brasil	[130]	<i>Macrobrachium depressimanum</i> , <i>Macrobrachium jelskii</i> , camarão onívoro	músculo	0.022

Pode-se observar uma variação de 0.01 a 17.9 µg/g de Hg ao longo das ecorregiões. A maioria dos pontos de amostragem está registrada nas florestas amazônicas do Sul, com uma média em mercúrio de 0.89 µg/g (0.016 a 11.57 µg/g), seguidas pelas florestas amazônicas ocidentais, com uma média em mercúrio 1.70 µg/g (0.15 a 17.42 µg/g), e, por fim, por os menores pontos na ecorregião das Guianas, com uma média em mercúrio 1.57 µg/g (0.165 a 5.92 µg/g).

O território brasileiro tem a maior concentração de reports científicos, os quais incluem o rio Amazonas e seus grandes tributários, com destaque para os rios Madeira e Tapajós. Assim a bacia do rio Madeira, que funciona como divisor entre as biorregiões, tem uma média de mercúrio de 0.47 µg/g (0.014 a 4.046 µg/g), Rondônia, próximo à região de Porto Velho, e rio Tapajós têm média 0.69 µg/g (0.074 a 1.51 µg/g), no Brasil. Além disso, a bacia do rio Madre de Dios, no Peru, tem uma média de 0,72 µg/g de mercúrio (variação de 0,20 a 3,72 µg/g), enquanto a média de mercúrio no rio Amazonas foi de 0,673 µg/g (variação de 0,05 a 1,49 µg/g) (Figura 8).

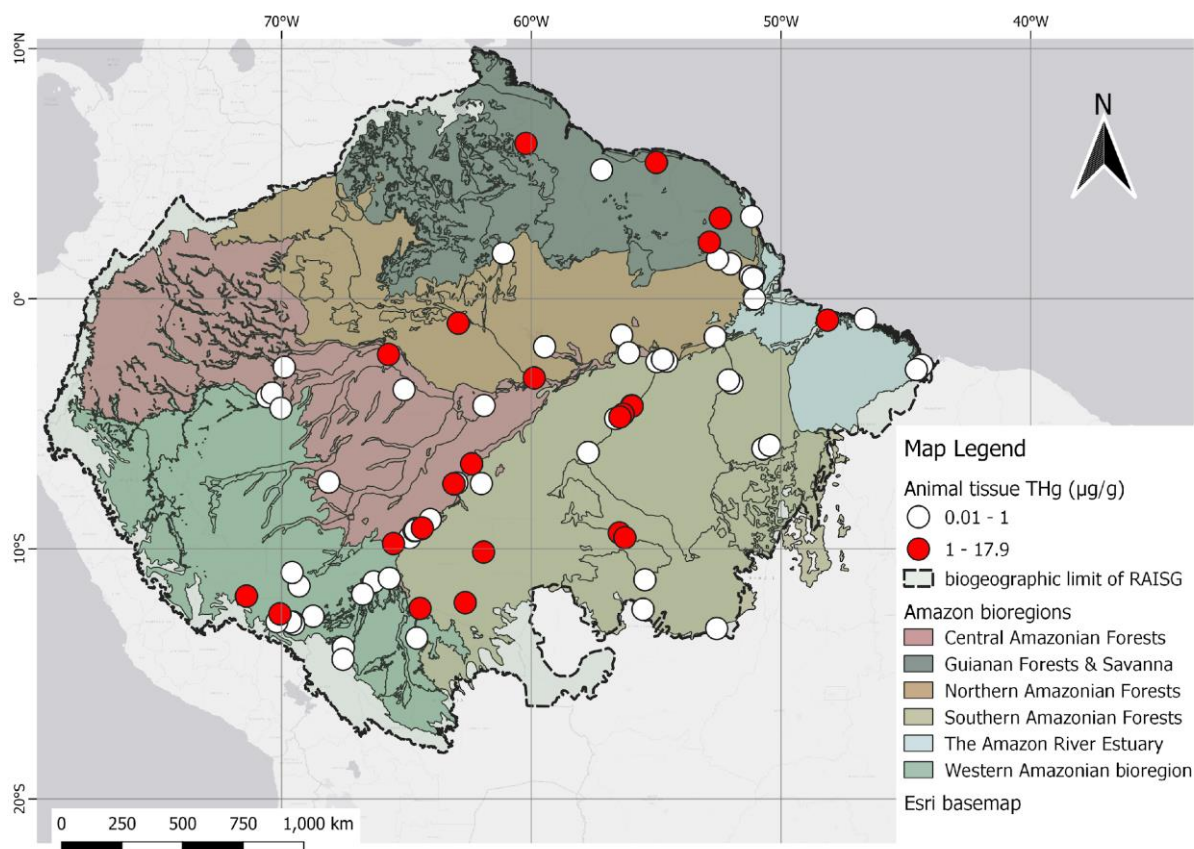


Figura 8. Distribuição espacial dos estudos animais categorizados por níveis de THg, em relação a 1,0 µg/g pela OMS como permitido na dieta humana.

Os maiores níveis de mercúrio relatados na Amazônia estão nos tecidos de pele de *Panthera onca* (17.9 µg/g) e no tecido hepático de *Arapaima gigas* (17,4 µg/g). O maior valor de mercúrio em peixes predadores foi encontrado na piranha preta (*S. rhombeus*), carnívoro com 1,64 µg/g [71]. As maiores concentrações musculares de mercúrio em países fora do Brasil foram encontradas em um estudo no lago Oxbow, no Peru, com 3,17 µg/g, e ao longo do rio Mazaruni, na Guiana, com 5,920 µg/g, ambos em áreas próximas a atividades de mineração [106,112].

O THg total do cabelo em seres humanos variou de 1.03 a 27.62 µg/g (Tabela 4). Destaca-se, as classificações de: crianças, que tem uma média de 8.81 µg/g (faixa 1.03 a 22.38 µg/g); população indígena com uma média de 13.19 µg/g (faixa 2.06 a 34.9 µg/g); As mulheres em idade reprodutiva, incluindo mães, grávidas e lactantes, com uma média de 7.71 µg/g (faixa 2.12 a 12.8 µg/g); Os ribeirinhos apresentaram concentrações com média de 10.61 µg/g (faixa 3.07 a 22.38 µg/g); e os indivíduos que vivem em áreas de mineração com uma média de 11.93 µg/g (faixa 1.74 a 34.9 µg/g). Além disso, a Tabela 4 mostra a lista de pesquisas em humanos com essas informações significativas em relação às concentrações de Hg em tecidos humanos.

Tabela 4. Total Hg em cabelos humanos na região Amazônica.

Bacia hidrográfica*	Mineração mencionada	País	Estudo	Comunidade/ População	THg (µg/g) em médio/ medianat
To	Sim	Brasil	[131]	Adultos (18-70), pescado como alimento básico, próximo ao reservatório da barragem de Tucuruí.	10.900



U	Sim	Brasil	[132]	Grupos de idade e comparação de várias aldeias. Reserva indígena do Yanomami, com alta dieta de peixe e atividade de mineração.	15.500†
M	Sim	Brasil	[133]	Grupos de idade de adultos variando de 17 a 92 anos.	26.030
To, Ta	Sim	Brasil	[134]	Somente ribeirinhos adultos (18 a 60 anos)	4.500
Ta	Sim	Brasil	[135]	Somente ribeirinhos, mulheres adultas (13 a 53 anos)	9.150
Ta	Sim	Brasil	[136]	Reserva indígena de Munduruku. Comparação entre as aldeias.	7.400
M, Ta	Não	Brasil	[83]	Mulheres grávidas (18 a 40 anos). Dieta de peixe.	6.070
MD	Sim	Peru	[64]	comparação demográfica urbana e rural com foco nas dietas de peixes.	1.740
A	Sim	Colômbia	[79]	Comunidade indígena no Puerto Nariño. Média idade ~ 35 anos. Dieta rica de peixe.	5.310
Ta	Não	Brasil	[12]	Reserva indígena de Munduruku. Comparação entre as aldeias e categorização etária com juvenil, idade fértil, e outro adultos	11.500
Ta	Não	Brasil	[137]	Reserva indígena de Munduruku. comparação entre as aldeias e a população exclusivamente juvenil.	11.800
Ta	Não	Brasil	[11]	Reserva indígena de Munduruku. comparação entre as aldeias. Idades > 12 anos.	7.400
A, Cg, Ta	Sim	Brasil	[138]	Juvenil e adultos nas comunidades ribeirinhas.	12.700
MD	Sim	Peru	[139]	Comunidade indígena Matsigenka (anos 1 a 65).	11.830
MD	Não	Peru	[140]	Comunidades ribeirinhas. Alto dieta de peixe.	4.800
MD	Não	Peru	[141]	Comparação de várias habitações na Reserva Amarakaeri, categorização etária (menor 5 anos, e 5 a 11 anos).	1.030†
MD	Sim	Peru	[142]	Comparação de várias habitações na Reserva Amarakaeri.	4.150
A	Sim	Brasil	[143]	População ribeirinhas. Exposição pré-natal, mulheres idade fértil (15 a 49 anos)	6.490
To, Ta	Não	Brasil	[144]	População ribeirinhas, comidades entre 19 e 70 anos (Hg alto)	15.900†
M, N	Sim	Brasil	[145]	Mulheres lactantes.	2.120
To	Não	Brasil	[146]	Populações ribeirinhas no reservatório da barragem de Tucuruí.	8.120†
CP	Sim	Colômbia	[26]	Comunidades indígenas da aldeia Tarapacá.	17.800†
MD	Sim	Peru	[147]	Mulheres em idade fértil.	5.500
Ta, To	Não	Brasil	[148]	Crianças de aldeias ribeirinhas, nascidas de mulheres com idades entre 25 e 40 anos. dieta rica em peixes e exposição primária ao Hg.	22.380
M	Não	Brasil	[149]	Crianças / adolescentes ribeirinhas no rio Madeira, 6 a 14 anos.	3.070
MD	Sim	Peru	[150]	Comparação de várias habitações na Reserva Amarakaeri. Crianças nativas indígenas (6 a 15 anos)	2.060

RK	Sim	Guiana Inglesa	[151]	Indígenas de região Rupununi (15 a 78 anos). Alto dieta de peixe. Comparação área de mineração e área de controle	27.620
Ta, To	Sim	Brasil	[152]	Homens ribeirinhos e garimpeiros e THg entre eles. Alto dieta de peixe. Itaituba e Serra Pelada	20.000
MD	Sim	Peru	[153]	Comparação de várias habitações na Reserva Amarakaeri. Mulheres em idade fértil (15 a 49 anos).	3.500†
M	Sim	Brasil	[154]	Comunidades ribeirinhas, rurais, mineiras e urbanas. Mulheres em idade fértil.	12.220†
To	Não	Brasil	[155]	Adultos (18–70 anos), Populações ribeirinhas no reservatório da barragem de Tucuruí.	7.900†
Ap	sim	Colômbia	[156]	População em diferentes localidades em regiões mineiras. Alto dieta peixe.	14.920
Ta	no	Brasil	[157]	Reserva indígena de Munduruku. Comparação entre as aldeias e categorização. Dieta rica em peixes. Idade maior de 12 anos.	8.500
Ap	sim	Colômbia	[16]	População Indígena do Parque Natural Nacional Yaigojé Apaporis.	34.900
Ta	Não	Brasil	[55]	Somente ribeirinhos adultos (18 a 60 anos). Alto consumo de peixe.	10.800
Co	Sim	Guiana Francesa	[158]	Somente mulheres grávidas, grupos étnicos considerados (15 a 41 anos), comunidade tribais e indígenas de Wayana.	12.800
M	Não	Brasil	[159]	mães e crianças no parto após a gravidez e 6, 24 e 59 meses	11.610

\*Rio Madre de Dios: MD, Rio Tapajós: Ta, Rio Cotuhe e Putumayo: CP, Rio Campina Grande: Cg, Rio Tocantins: To, Rio Apaporis: Ap, Rio Uaiacás: U, Rio Courantyne: Co, Rios Rupununi e Kuyuwini (Guiana): RK.

As únicas duas pesquisas que não avaliaram as concentrações de mercúrio total humano pelo cabelo foram aquelas no leite materno (média 0.010 µg/g THg) de mulheres lactantes para estimar a exposição a metais neurotóxicos influenciado pela mineração de pequena escala em bebês em Porto Velho, Rondônia, Brasil [160], e no conteúdo sanguíneo (média 0.021 µg/g THg) em populações juvenis amazônicas em Cuniã, Brasil [161].

Observa-se que a comunidade indígena é bem mencionada, especialmente na reserva/comunidade Munduruku na bacia do Tapajós e nos estudos na região de Madre de Dios no Peru, como parte de estudos de coorte [142,150,153], onde foram feitas comparações entre as demografias nativas, os pontos quentes de mineração e seus respectivos controles ao redor da Reserva Comunal Amarakaeri. Houve muita consideração pela população juvenil e pelas gestantes ou mulheres em idade fértil. Notavelmente, um estudo apontou que o Hg ocupacional dos garimpos ainda apresentou concentrações mais baixas em comparação com os ribeirinhos, como o caso dos ribeirinhos de Itaituba (20 µg/g THg) e da região de mineração de Serra Pelada (1 µg/g THg) [152].

Não foi encontrada diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) na concentração de THg entre os grupos analisados (Crianças, Indígenas, Maternidade, Ribeirinhas, e pessoas sobre influência direta da Mineração) pelos de modelos MLG. De acordo com o resumo da Tabela 5, não existem parâmetros fortemente influenciados pelas concentrações de THg no cabelo humano. A regressão logística mostrou melhor ajuste do modelo por critério de

informação de Akaike (AIC) menor, porém todos os valores de P são > 0,05 descartando qualquer influência.

Tabela 5. Modelo linear geral (MLG) e regressão logística da influência do THg nos parâmetros de mineração e classes demográficas relacionadas em estudos humanos.

		MLG	Regressão logística
AIC		257.26	53.867
Parâmetros		P valor	P valor
THg	Crianças	0.6055	0.416
	Indígenas	0.4201	0.273
	Maternidade	0.2364	0.661
	Ribeirinhas	0.6108	0.287
	Mineração	0.2413	0.774

A representação espacial da pesquisa humana é a mais alta na biorregião das florestas do Sul com 34 registros, com a maior densidade na bacia do Tapajós, seguida pelas ecorregiões da Amazônia Ocidental com 28 registros. O restante dos estudos está espalhado entre as três outras regiões.

Os dados humanos apresentam tendências quase idênticas, com estudos concentrados na bacia dos rios Tapajós e Madeira no Brasil, e Madre de Dios, no Peru. Observa-se a existência de três classes de gradiente de mercúrio, com a maioria dos pontos indicando uma tonalidade vermelha profunda dispersos pelo mapa. Essa característica também é observada nas áreas ao norte e oeste da floresta amazônica, incluindo estudos realizados no estado do Amazonas, Roraima, no Brasil, e Nariño, na Amazônia colombiana. Essas observações são ilustradas na Figura 9.

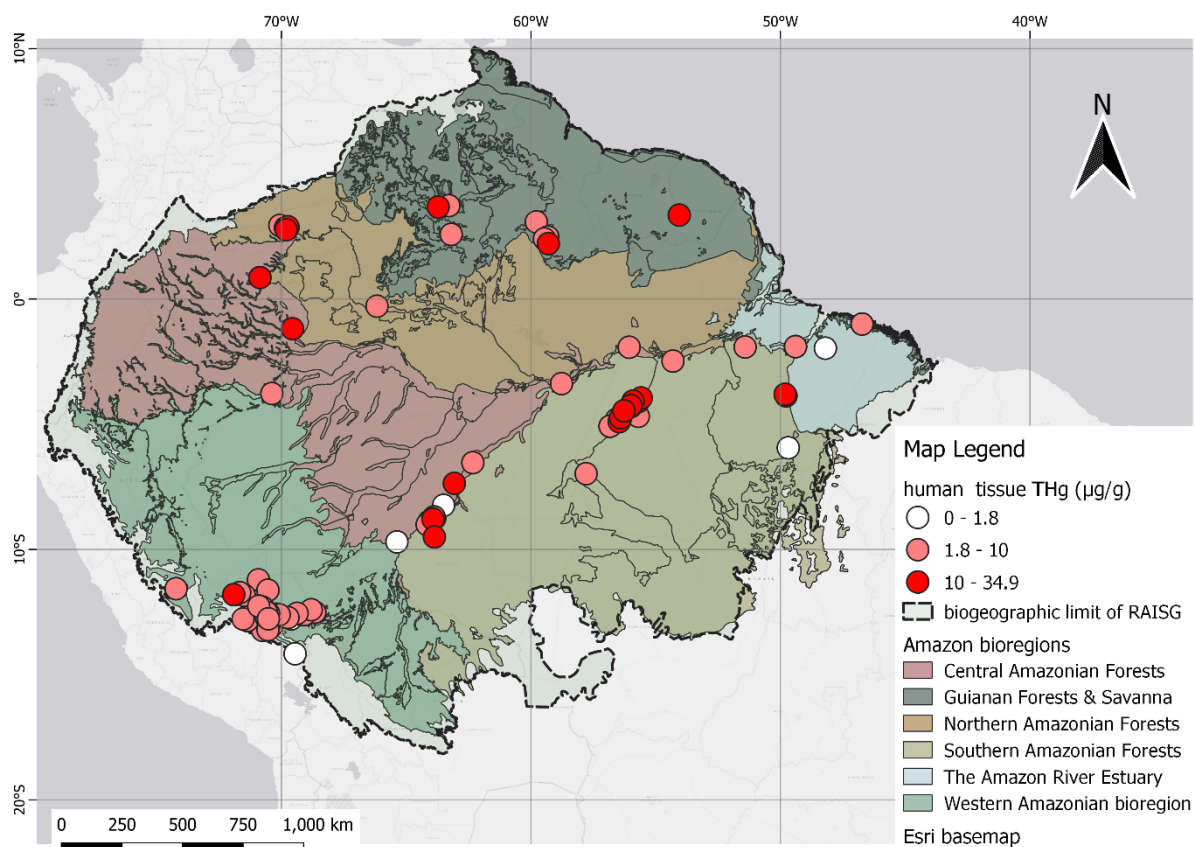


Figura 9. Distribuição espacial dos estudos humanos por níveis de THg, categorizados pelo permitido (1.8 µg/g), perigo (10 µg/g) e aqueles acima do nível de perigo (> 10 µg/g).

### 3.1. Mineração

As pesquisas com Hg em regiões com atividades de mineração foram relatadas em áreas de planícies de inundação dos rios, que incluem todas as classes de várzea amazônica agrupadas segundo Dinerstein et al [58]. É possível observar afluentes com intensa atividade de mineração nas proximidades dos pontos de amostra. Os pontos de pesquisa no mapa estão configurados para se agruparem por distância, baseados em classes de 0-20 km, 20-50 km e acima de 50 km em relação aos polígonos de mineração. Os polígonos de mineração (esquema de cores laranja) são uma combinação de conjuntos de dados: pegadas de mineração globais [60] com a camada de mineração ilegal adaptada da RAISG [49].

As áreas de várzea foram especificamente incluídas na análise para representar zonas de elevada retenção hídrica e acumulação de rejeitos de mineração, fatores que podem contribuir para a concentração de mercúrio (Hg) no ambiente [71,162]. Notavelmente, a extensão da mineração ilegal é mais amplamente reconhecida por iniciativas como a RAISG, cujos dados indicam uma sobreposição dessas atividades com as áreas estudadas. Em particular, essas operações ilegais são prevalentes nas regiões ocidentais do rio Napo — um importante afluente da bacia do rio Amazonas — afetando as áreas de coleta de amostras situadas nas zonas de fronteira entre Peru, Colômbia e Brasil. Além disso, a atividade de mineração ilegal é intensa ao longo da bacia do rio Madre de Dios, no Peru, com operações que se estendem até as proximidades das áreas designadas para coleta de amostras. Essa sobreposição entre locais de mineração ilegal e pontos de amostragem evidencia a complexidade e a gravidade da situação, exigindo atenção especial para a compreensão dos impactos ambientais e socioeconômicos associados.

Os destaques para os estudos em animais desses pontos estão localizados na região da bacia do rio Mazaruni na Guiana e na região do rio Suriname a jusante, apesar da baixa representação de artigos de estudo. As regiões com alta pesquisa que sobrepõe com mineração na parte interior são a bacia do Tapajós, perto da reserva Munduruku e Itaituba, e na bacia do rio Itacaiúnas, entre a bacia do rio Xingu e Tocantins no Brasil.

Com base na classificação de distância, as concentrações de mercúrio num raio de 20 km dos locais de mineração (mais próximos) georreferenciados tiveram média de 0.870  $\mu\text{g/g}$  (0.033 a 5.92  $\mu\text{g/g}$ ) para peixes, onde *Serrasalmus spp.* é mais mencionada. A categoria de aproximação dentre 20 a 50 quilômetros, tiveram média de 0.506  $\mu\text{g/g}$  (0.022 a 1.51  $\mu\text{g/g}$ ), onde *Plagioscion squamosissimus*, sendo o mais citado. Embora mais elevadas, as concentrações musculares de mercúrio nos peixes mais próximos da mineração estão ligeiramente abaixo do limite de 1  $\mu\text{g/g}$ , indicando um nível permissível para peixes predadores, mas excedem a referência alimentar permitida de Hg, fixada em 0,5  $\mu\text{g/g}$  para os seus homólogos não predadores. Os polígonos de mineração em contraste com os registros de animais estão mapeados na Figura 10.

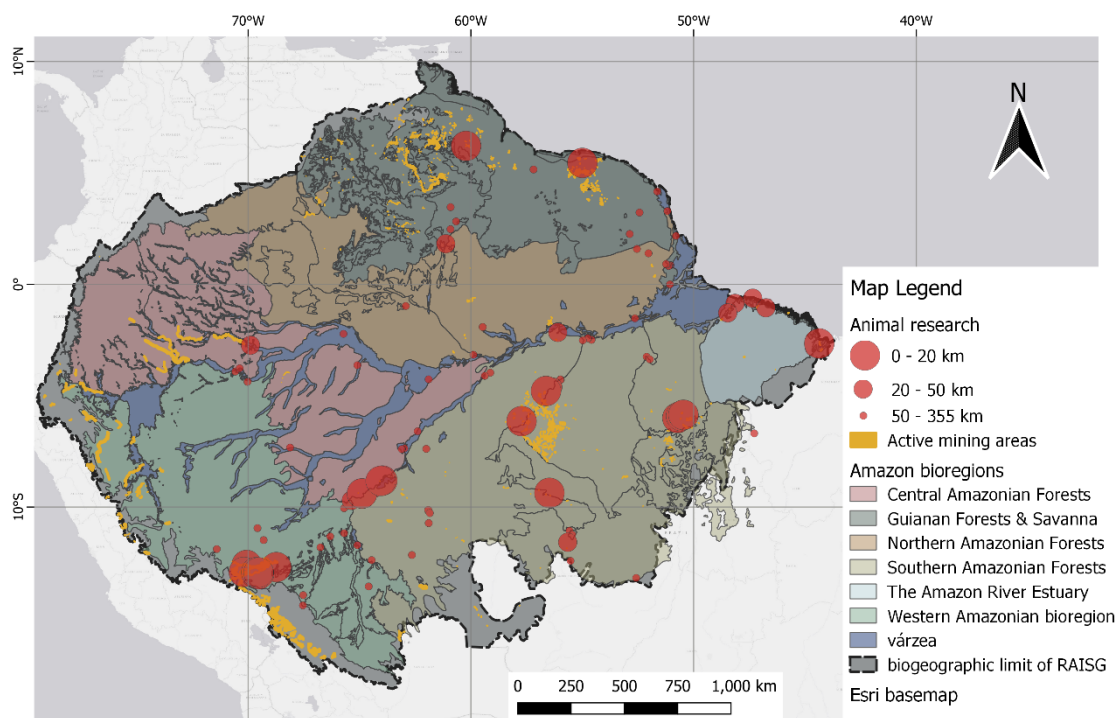


Figura 10. Distribuição espacial dos estudos animais relativos aos polígonos de mineração. As classes de distância, indicadas pelos marcadores de 20 km e 50 km, são definidas pela diferença de tamanho dos pontos.

A pesquisas em tecidos humanas também é mapeada ao lado das informações geoespaciais de mineração e territórios indígenas. Os resultados de estudos humanos mostram as concentrações mais altas de mercúrio em estudos humanos próximos aos polígonos de mineração ilegal da RAISG estão na bacia do Madre de Deus e na bacia do Tapajós. A bacia do rio Madeira também apresenta altos estudos, mas menor mineração ilegal. Isso ocorre porque a mineração ilegal segue o fluxo do rio, provavelmente devido a atividades mineiras aluviais. Subsequentemente, as cidades de Itaituba e Marabá, que estão ambos na bacia do Tapajós, estão entre as áreas mais frequentes de amostra próximas às atividades altas de mineração ilegais.

Apesar da representação espacial limitada no Norte, alguns estudos têm destacado a presença de atividades minerárias. Entre estes, destacam-se os relatos de mineração em

pequena escala na região montanhosa de Marudi, localizada na Guiana [151]. Outro ponto de interesse é a bacia do rio Lawa, situada na Guiana Francesa [132]. Além disso, a região indígena do Yanomami, em Roraima, Brasil, na bacia do rio Uraricoera, também é mencionada [158]. Estes estudos representam as poucas investigações realizadas, mas são significativos por estarem próximos às áreas de mineração no escudo das Guianas.

A localização das amostras humanas mais próximas até 20 km às áreas de mineração apresentou THg médio de 4.301 µg/g (1 a 11.61 µg/g); enquanto a distância de 20 km a 50 km teve uma média de 6.782 µg/g (0.01 a 12.80 µg/g). É notável que todos os estudos realizados dentro de um raio de 20 km das áreas de mineração também estavam dentro de um raio de 17 km dos territórios indígenas. A Figura 11 mostra os estudos humanos em relação aos polígonos de mineração.

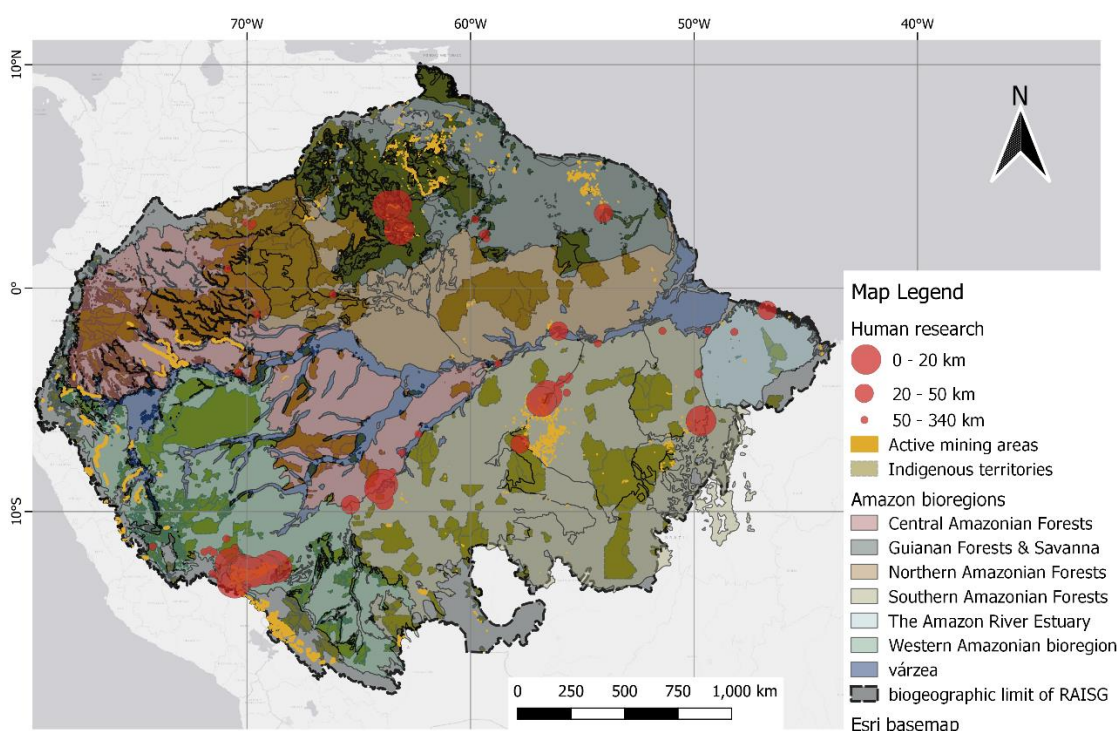


Figura 11. Distribuição espacial dos estudos humanos relativos aos polígonos de mineração. As classes de distância, indicadas pelos marcadores de 20km e 50km, são definidas pela diferença de tamanho dos pontos. Os territórios nativos/indígenas são incluídos como uma sobreposição mais escura.

#### 4. Discussão

Esta revisão fornece informações sobre o total de Hg acumulado em tecidos animais e humanos, conforme relatado em pesquisas ao longo dos anos recentes. A avaliação de Hg em humanos deste estudo se sobrepõe à revisão de escopo feita sobre neurotoxicidade por Santos-Sacramento et al [40], e confirmou a tendência mencionada de alta representação de estudos no Brasil.

A revisão de escopo revelou um maior foco na região Sudoeste, particularmente nas bacias do rio Madre de Dios, rio Madeira, rio Tapajós e seus afluentes. O Rio Madeira e suas planícies de inundação (zona várzea) servem como um divisor significativo na zonação geográfica de ecorregiões aplicada neste estudo. Os resultados referentes aos animais são predominantemente de ecossistemas aquáticos e foram avaliados dentro do contexto da teia alimentar dos peixes e da bioconcentração de Hg, levando como em conta as diferenças entre espécies pelágicas e demersais e seus distintos grupos alimentares

nessas zonas tropicais (feeding guilds) [42,86]. É necessário mais dados sobre biomarcadores em peixes, pois o teor de Hg pode variar na mesma espécie devido à posição trófica e fatores ambientais do habitat [45].

Embora esses estudos se sobreponham a regiões atualmente exploradas para mineração, existem inúmeras regiões que não são representadas ou estão sub-representadas em locais de amostragem tanto humanos quanto animais. A análise dos dados gerais em humanos mostrou uma mediana de níveis alarmantemente altos de Total-Hg (acima de 6 µg/g), que excedem a tolerância humana permitida. Isso ressalta a necessidade urgente de estudos ecotoxicológicos para preencher as lacunas espaciais em nosso entendimento. Os altos níveis de mercúrio representam uma preocupação ambiental e de saúde pública premente que precisa ser abordada prontamente.

O Hg, que pode persistir no sedimento, é transportado em ambientes aquáticos, como igapó de água preta e várzeas [35,163]. Esses ambientes carregam matéria suspensa, que foi relatada por ter altas concentrações de mercúrio nesses tributários. A floresta tropical, um assunto bem estudado, atua como um importante sumidouro terrestre, mitigando a liberação de mercúrio na atmosfera e aumentando as concentrações atmosféricas devido à sua volatilidade [164]. A degradação da floresta devido, à contaminação por mercúrio, pode estar localizada sob a folhagem das árvores.

A discrepância entre os dados humanos e animais mostrou uma avaliação espacial mais acentuada na pesquisa não humana. Os altos níveis de concentração de Hg na pesquisa humana instigam a necessidade de uma representação espacial igualmente distribuída, especialmente em comunidades indígenas onde o peixe é um alimento básico. Mesmo com dietas principalmente ricas em peixes, o mercúrio total na população indígena teve mais variação inferior [26].

A maioria dos estudos em humanos baseou-se no fato do cabelo ser a matriz não intrusiva e conveniente para detectar Hg de origem alimentar [56,165,166]. Dois estudos forneceram medição de Hg no sangue e no peso seco do leite materno, ambos inferior à média THg de todos tecidos humanos (10.25 µg/g). Curiosamente, os estudos observam que a proximidade com a mineração não está necessariamente associada ao risco de exposição [153]. No entanto, apesar de medianas mais baixas e maiores variações em populações próximas a áreas de mineração, a presença significativa de mercúrio nesses locais é inegável.

A extração do tecido muscular dorsal em peixes parece ser o método mais comum de quantificação do Hg total. A sobreposição com a várzea pode sugerir atividade de mineração aluvial e presença de dragas [15,18,167,168].

Os níveis elevados de água geralmente apresentam concentrações mais altas de Hg total, no entanto, deve-se notar que os níveis baixos nos afluentes de água preta têm sido contestados para um Hg presumivelmente mais alto, pois os fatores de baixa água podem bloquear a sintetização do Hg [86]. A exposição ocupacional dos garimpos mostrou-se inesperadamente menor em comparação ao grupo controle ribeirinho [152]. O comportamento migratório em peixes é fundamental para a análise espacial, uma vez que podem ser capturados por pescadores distantes desses pontos críticos de contaminação por mineração ou zonas de alto teor de Hg [75,153]. A venda desses peixes contaminados e o processamento de amálgama de ouro-mercúrio geralmente ocorrem em cidades ou vilas próximas [24]. Isso sugere que o impacto da contaminação por Hg se estende além das áreas imediatas de mineração florestal.

Houve baixa cobertura para pesquisas com animais e humanos, mas alta ocorrência de mineração em pequena escala nas regiões norte da Amazônia.

Para abordar o problema do mercúrio na região da Amazônia, algumas direções e recomendações podem ser consideradas para futuras pesquisas e ações políticas.

O desenvolvimento e implementação de uma rede e banco de dados regionais de monitoramento de mercúrio são fundamentais. Isso facilitaria a coleta, compartilhamento e disseminação de dados e informações de mercúrio entre diferentes partes interessadas

553 e atores. É importante que essa rede inclua todas as nações amazônicas, com especial  
554 atenção àquelas com menos publicações. A aplicação e melhoria de ferramentas e técnicas  
555 de análise espacial, como SIG, sensoriamento remoto e estatísticas espaciais, são essenciais  
556 para melhorar a compreensão e comunicação dos padrões e tendências espaciais da  
557 contaminação e exposição ao mercúrio na região. A integração de conjuntos de dados  
558 geoespaciais RAISG pode ser usada como blocos de construção fundamentais nesse  
559 processo.

560 A promoção e apoio a meios de subsistência e tecnologias alternativas e sustentáveis  
561 para o setor de mineração artesanal e de pequena escala são cruciais. Isso reduziria o uso  
562 e emissão de mercúrio e melhoraria as condições ambientais e sociais dos mineiros e suas  
563 comunidades. O estabelecimento e aplicação de padrões e regulamentos regionais e  
564 nacionais para a gestão e controle de mercúrio são necessários. Isso harmonizaria e  
565 coordenaria os esforços e ações de diferentes países e agências para enfrentar o problema  
566 do mercúrio na região.

567 Devido à alta cobertura dos ecossistemas aquáticos tanto como avaliação do músculo  
568 dos peixes quanto como consumo humano baseado em suas dietas ricas em peixes, uma  
569 meta-análise completa pode ser sugerida para analisar estatisticamente a correlação entre  
570 a contaminação do tecido de Hg na pesquisa e as concentrações de Hg aquoso na  
571 hidrologia amazônica em relação à pegada da mineração clandestina em pequena escala.  
572

#### 573 4.1. Limitações

574 Essa revisão apresenta várias limitações que precisam ser abordadas. Primeiramente,  
575 os tamanhos das amostras são inconsistentes entre os estudos, com o número de peixes  
576 por espécie variando significativamente. A concentração média de mercúrio é  
577 frequentemente estimada para toda a coleção, o que pode não representar com precisão  
578 as espécies individuais ou regiões. Nem todos os estudos distinguem cada região de  
579 amostra, e alguns consideram uma média de locais geograficamente distantes.

580 Em segundo lugar, para georreferenciamento, apenas os locais de amostragem que  
581 são geograficamente distinguíveis em uma escala regional são considerados. A sintaxe de  
582 pesquisa e o mecanismo de pesquisa usados podem ter limitações na inclusão de artigos  
583 relevantes. Mais espécies de peixes e seus vários grupos alimentares são acessados por  
584 estudo, o que pode introduzir variabilidade nos dados.

585 Em terceiro lugar, a unidade de medida não é intercambiável entre média e mediana,  
586 o que pode afetar a interpretação dos resultados. Os períodos de amostragem e coleta de  
587 tecidos podem variar drasticamente dentro do ano de publicação e às vezes não são  
588 indicados, levando a um possível viés temporal.

589 Em quarto lugar, há diferentes protocolos e materiais de referência Hg para avaliação  
590 de mercúrio no tecido, como Cold Vapor Atomic Absorption Spectroscopy (CVAAS),  
591 Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectroscopy (CVAFS), , versões de referência Dogfish  
592 Muscle Certified Reference Material (DORM). Além disso, o intervalo de períodos de  
593 amostragem, o uso de estudos de coorte versus estudos transversais, e a consideração do  
594 peso úmido versus peso seco, especialmente em tecidos de peixe, podem contribuir para  
595 variações nos resultados. Adicionalmente, enquanto alguns estudos fornecem detalhes  
596 espaciais dos pontos de amostra dentro de sua área de estudo local, outros não o fazem,  
597 resultando em um mapa que pode parecer obscuro devido à falta de informações  
598 detalhadas.

599 Por último, há uma falta de estudos para conduzir totalmente uma análise de dados  
600 especificada, necessitando da expansão do período de revisão e potencialmente uma  
601 revisão sistemática ou meta-análise. Além disso, o delineamento da mineração (conjunto  
602 de dados polígonos de geoprocessamento) aplica-se apenas a operações de mineração a  
603 céu aberto e não leva em conta a mineração aluvial, que pode ser recomendada ao  
604 expandir o tópico para pesquisas futuras.



605 Compreender a progressão da contaminação por mercúrio pela mineração e a  
606 distribuição/dispersão das concentrações de mercúrio a jusante é crucial para uma  
607 avaliação de impacto adequada. Essas limitações destacam a necessidade de pesquisas  
608 mais abrangentes e padronizadas neste campo.  
609

## 610 5. Conclusão

611 Embora existam uma gama enorme de estudos sobre a presença de mercúrio na  
612 Amazônia, nossos resultados demonstram uma concentração de publicações no Brasil e  
613 na Amazônia Ocidental. O que sugere uma carência de pesquisas de avaliação de Hg em  
614 outras regiões/países da Amazônia. Principalmente, Suriname, Equador, Venezuela,  
615 Guiana Francesa e Guiana Inglesa. As regiões mais destacadas por amostras  
616 georreferenciadas estão na região de Madre de Dios no Peru, e ao longo das bacias do rio  
617 Tapajós perto de Itaituba e no rio Madeira perto de Porto Velho, Brasil.

618 Muitas das pesquisas se concentraram em comparar as concentrações de Hg nas  
619 regiões de mineração conhecidas com uma área de controle, e que as regiões de mineração  
620 apresentaram níveis mais altos de Hg tanto em relação à proximidade espacial aos  
621 polígonos de mineração quanto aos relatos no artigo, mas com maiores variações, sendo  
622 os territórios indígenas os mais críticos que apresentaram a maior preocupação.

623 Nesse sentido, confirmamos nossa hipótese de que as maiores concentrações de  
624 mercúrio em amostras de tecido são encontradas próximas às áreas de mineração. Nossa  
625 revisão destaca que as atividades de mineração são uma fonte significativa de  
626 contaminação por mercúrio, exacerbada a jusante e bioacumulada nos ecossistemas  
627 aquáticos. É crucial destacar as elevadas concentrações de mercúrio em peixes  
628 predadores, bem como os potenciais riscos à saúde para as populações humanas que  
629 dependem fortemente de peixes como alimento básico em sua dieta. Esta descoberta  
630 ressalta a necessidade de regulamentações rigorosas e estratégias de mitigação eficazes  
631 nas práticas de mineração. Além disso, conforme previsto em alguns estudos, o  
632 comportamento migratório dos peixes, que são bioacumuladores de mercúrio, precisa ser  
633 considerado, pois eles podem alcançar áreas não conhecidas por atividades de mineração.

634 Esta revisão do escopo identificou lacunas na cobertura geográfica e um impacto  
635 significativo da contaminação por mercúrio na população humana e animal na região da  
636 Amazônia. Isso sugere que são necessários estudos mais abrangentes, particularmente em  
637 áreas que não foram adequadamente cobertas em pesquisas anteriores.  
638

639 **Supplementary Materials:** The following supporting information can be downloaded at:  
640 [www.mdpi.com/xxx/s1](http://www.mdpi.com/xxx/s1), Figure S1: title; Table S1: title; Video S1: title.

641 **Author Contributions:** Conceptualization, I.M. and A.F.; methodology, I.M.; software, I.M.;  
642 validation, L.C, A.F. and C.P.; formal analysis, I.M.; investigation, I.M.; resources, A.F. and C.P.;  
643 data curation, A.A.; writing—original draft preparation, I.M.; writing—review and editing, A.F.;  
644 visualization, I.M.; supervision, A.F. and C.P.. All authors have read and agreed to the published  
645 version of the manuscript.

646 **Funding:** Research was funded by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
647 (CAPES), grant number 88887.636729/2021-00, CAPES – PROCAD Amazônia (Process ) and  
648 CAPES/PDFG - Amazônia Legal (Process 88887.510191/2020-00).

649 **Data Availability Statement:** We encourage all authors of articles published in MDPI journals to  
650 share their research data. In this section, please provide details regarding where data supporting  
651 reported results can be found, including links to publicly archived datasets analyzed or generated  
652 during the study. Where no new data were created, or where data is unavailable due to privacy or  
653 ethical restrictions, a statement is still required. Suggested Data Availability Statements are available  
654 in section “MDPI Research Data Policies” at <https://www.mdpi.com/ethics>.

**Acknowledgments:** In this section, you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

## Referências

1. Paiva, P.F.P.R.; de Lourdes Pinheiro Ruivo, M.; da Silva Júnior, O.M.; de Nazaré Martins Maciel, M.; Braga, T.G.M.; de Andrade, M.M.N.; dos Santos Junior, P.C.; da Rocha, E.S.; de Freitas, T.P.M.; da Silva Leite, T.V.; et al. Deforestation in Protect Areas in the Amazon: A Threat to Biodiversity. *Biodiversity and Conservation* **2020**, *29*, 19–38, doi:10.1007/s10531-019-01867-9.
2. Garcia, B. *The Amazon from an International Law Perspective*; Cambridge University Press, 2011; ISBN 1-139-49668-9.
3. Antonelli, A.; Zizka, A.; Carvalho, F.A.; Scharn, R.; Bacon, C.D.; Silvestro, D.; Condamine, F.L. Amazonia Is the Primary Source of Neotropical Biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2018**, *115*, 6034–6039, doi:https://doi.org/10.1073/pnas.1713819115.
4. Nunes, C.A.; Berenguer, E.; França, F.; Ferreira, J.; Lees, A.C.; Louzada, J.; Sayer, E.J.; Solar, R.; Smith, C.C.; Aragão, L.E.O.C.; et al. Linking Land-Use and Land-Cover Transitions to Their Ecological Impact in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2022**, *119*, 1–9, doi:10.1073/pnas.2202310119/-DCSupplemental.Published.
5. Matricardi, E.A.T.; Skole, D.L.; Costa, O.B.; Pedlowski, M.A.; Samek, J.H.; Miguel, E.P. Long-Term Forest Degradation Surpasses Deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* **2020**, *369*, 1378–1382, doi:10.1126/SCIENCE.ABB3021.
6. Giljum, S.; Maus, V.; Kuschnig, N.; Luckeneder, S.; Tost, M.; Sonter, L.J.; Bebbington, A.J. A Pantropical Assessment of Deforestation Caused by Industrial Mining. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2022**, *119*, e2118273119, doi:10.1073/pnas.2118273119.
7. Albert, J.S.; Carnaval, A.C.; Flantua, S.G.A.; Lohmann, L.G.; Ribas, C.C.; Riff, D.; Carrillo, J.D.; Fan, Y.; Figueiredo, J.J.P.; Guayasamin, J.M.; et al. Human Impacts Outpace Natural Processes in the Amazon. *Science* **2023**, *379*, doi:10.1126/science.abo5003.
8. Junior, C.D.M.B.; Carvalho, L.G.D. Transformations in Artisanal and Small-Scale Gold Mining Work and Production Structures in the Tapajós Region of Brazil's Amazon. *Resources Policy* **2023**, *83*, 103597, doi:10.1016/j.resourpol.2023.103597.
9. Vega, C.; Orellana, J.; Oliveira, M.; Hacon, S.; Basta, P. Human Mercury Exposure in Yanomami Indigenous Villages from the Brazilian Amazon. *IJERPH* **2018**, *15*, 1051, doi:10.3390/ijerph15061051.
10. Siqueira-Gay, J.; Sánchez, L.E. The Outbreak of Illegal Gold Mining in the Brazilian Amazon Boosts Deforestation. *Regional Environmental Change* **2021**, *21*, 1–5, doi:10.1007/s10113-021-01761-7.
11. Achatz, R.W.; De Vasconcellos, A.C.S.; Pereira, L.; Viana, P.V.D.S.; Basta, P.C. Impacts of the Goldmining and Chronic Methylmercury Exposure on the Good-Living and Mental Health of Munduruku Native Communities in the Amazon Basin. *IJERPH* **2021**, *18*, 8994, doi:10.3390/ijerph18178994.
12. Basta, P.C.; De Sousa Viana, P.V.; De Vasconcellos, A.C.S.; Santos Périssé, A.R.; Hofer, C.B.; Paiva, N.S.; Kempton, J.W.; De Andrade, D.C.; De Oliveira, R.A.A.; Achatz, R.; et al. Mercury Exposure in Munduruku Indigenous Communities from Brazilian Amazon: Methodological Background and an Overview of the Principal Results. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2021**, *18*, doi:10.3390/ijerph18179222.
13. Hacon, S.D.S.; Oliveira-da-Costa, M.; Gama, C.D.S.; Ferreira, R.; Basta, P.C.; Schramm, A.; Yokota, D. Mercury Exposure through Fish Consumption in Traditional Communities in the Brazilian Northern Amazon. *IJERPH* **2020**, *17*, 5269, doi:10.3390/ijerph17155269.
14. Vasconcellos, A.C.S. de; Hallwass, G.; Bezerra, J.G.; Aciole, A.N.S.; Meneses, H.N. de M.; Lima, M. de O.; Jesus, I.M. de; Hacon, S. de S.; Basta, P.C. Health Risk Assessment of Mercury Exposure from Fish Consumption in Munduruku Indigenous Communities in the Brazilian Amazon. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2021**, *18*, 7940.

- 705 15. Pestana, I.A.; De Rezende, C.E.; Almeida, R.; De Lacerda, L.D.; Bastos, W.R. Let's Talk about Mercury  
706 Contamination in the Amazon (Again): The Case of the Floating Gold Miners' Village on the Madeira River. *The*  
707 *Extractive Industries and Society* **2022**, *11*, 101122, doi:10.1016/j.exis.2022.101122.
- 708 16. Valdelamar-Villegas, J.; Olivero-Verbel, J. High Mercury Levels in the Indigenous Population of the Yaigojé  
709 Apaporis National Natural Park, Colombian Amazon. *Biol Trace Elem Res* **2020**, *194*, 3–12, doi:10.1007/s12011-019-  
710 01760-0.
- 711 17. Calvimontes, J.; Massaro, L.; Araujo, C.H.X.; Moraes, R.R.; Mello, J.; Ferreira, L.C.; De Theije, M. Small-Scale Gold  
712 Mining and the COVID-19 Pandemic: Conflict and Cooperation in the Brazilian Amazon. *The Extractive Industries*  
713 *and Society* **2020**, *7*, 1347–1350, doi:10.1016/j.exis.2020.08.013.
- 714 18. Velásquez Ramírez, M.G.; Barrantes, J.A.G.; Thomas, E.; Gamarra Miranda, L.A.; Pillaca, M.; Tello Peramas, L.D.;  
715 Bazán Tapia, L.R. Heavy Metals in Alluvial Gold Mine Spoils in the Peruvian Amazon. *Catena* **2020**, *189*, 104454,  
716 doi:10.1016/j.catena.2020.104454.
- 717 19. Adler Miserendino, R.; Guimarães, J.R.D.; Schudel, G.; Ghosh, S.; Godoy, J.M.; Silbergeld, E.K.; Lees, P.S.J.;  
718 Bergquist, B.A. Mercury Pollution in Amapá, Brazil: Mercury Amalgamation in Artisanal and Small-Scale Gold  
719 Mining or Land-Cover and Land-Use Changes? *ACS Earth and Space Chemistry* **2018**, *2*, 441–450,  
720 doi:10.1021/acsearthspacechem.7b00089.
- 721 20. Bullock, E.L.; Woodcock, C.E.; Souza, C.; Olofsson, P. Satellite-based Estimates Reveal Widespread Forest  
722 Degradation in the Amazon. *Global Change Biology* **2020**, *26*, 2956–2969, doi:10.1111/gcb.15029.
- 723 21. Gallay, M.; Mora, A.; Martinez, J.; Gardel, A.; Laraque, A.; Sarrazin, M.; Beaucher, E.; Doudou, J.; Lagane, C.  
724 Dynamics and Fluxes of Organic Carbon and Nitrogen in Two Guiana Shield River Basins Impacted by  
725 Deforestation and Mining Activities. *Hydrological Processes* **2018**, *32*, 17–29, doi:10.1002/hyp.11394.
- 726 22. Mestanza-Ramón, C.; Mora-Silva, D.; D'Orío, G.; Tapia-Segarra, E.; Gaibor, I.D.; Esparza Parra, J.F.; Chávez  
727 Velásquez, C.R.; Straface, S. Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM): Management and  
728 Socioenvironmental Impacts in the Northern Amazon of Ecuador. *Sustainability* **2022**, *14*, 6854,  
729 doi:10.3390/su14116854.
- 730 23. Dethier, E.N.; Sartain, S.L.; Lutz, D.A. Heightened Levels and Seasonal Inversion of Riverine Suspended Sediment  
731 in a Tropical Biodiversity Hot Spot Due to Artisanal Gold Mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences of*  
732 *the United States of America* **2019**, *116*, 23936–23941, doi:10.1073/pnas.1907842116.
- 733 24. Esdaile, L.J.; Chalker, J.M. The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *Chemistry - A European*  
734 *Journal* **2018**, *24*, 6905–6916, doi:10.1002/chem.201704840.
- 735 25. Espejo, J.C.; Messinger, M.; Román-Dañobeytia, F.; Ascorra, C.; Fernandez, L.E.; Silman, M. Deforestation and  
736 Forest Degradation Due to Gold Mining in the Peruvian Amazon: A 34-Year Perspective. *Remote Sensing* **2018**, *10*,  
737 1–17, doi:10.3390/rs10121903.
- 738 26. Alcalá-Orozco, M.; Caballero-Gallardo, K.; Olivero-Verbel, J. Mercury Exposure Assessment in Indigenous  
739 Communities from Tarapaca Village, Cotuhe and Putumayo Rivers, Colombian Amazon. *Environ Sci Pollut Res*  
740 **2019**, *26*, 36458–36467, doi:10.1007/s11356-019-06620-x.
- 741 27. Teixeira, R.A.; Pereira, W.V.D.S.; Souza, E.S.D.; Ramos, S.J.; Dias, Y.N.; Lima, M.W.D.; De Souza Neto, H.F.;  
742 Oliveira, E.S.D.; Fernandes, A.R. Artisanal Gold Mining in the Eastern Amazon: Environmental and Human  
743 Health Risks of Mercury from Different Mining Methods. *Chemosphere* **2021**, *284*, 131220,  
744 doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131220.
- 745 28. Fujimura, M.; Usuki, F. Cellular Conditions Responsible for Methylmercury-Mediated Neurotoxicity. *International*  
746 *Journal of Molecular Sciences* **2022**, *23*, 7218.
- 747 29. Vasconcellos, A.C.S.D.; Hallwass, G.; Bezerra, J.G.; Acirole, A.N.S.; Meneses, H.N.D.M.; Lima, M.D.O.; Jesus,  
748 I.M.D.; Hacon, S.D.S.; Basta, P.C. Health Risk Assessment of Mercury Exposure from Fish Consumption in  
749 Munduruku Indigenous Communities in the Brazilian Amazon. *IJERPH* **2021**, *18*, 7940,  
750 doi:10.3390/ijerph18157940.
- 751 30. Crespo-Lopez, M.E.; Augusto-Oliveira, M.; Lopes-Araújo, A.; Santos-Sacramento, L.; Yuki Takeda, P.; Macchi, B.  
752 de M.; do Nascimento, J.L.M.; Maia, C.S.F.; Lima, R.R.; Arrifano, G.P. Mercury: What Can We Learn from the  
753 Amazon? *Environment International* **2021**, *146*, doi:10.1016/j.envint.2020.106223.

31. Crespo-López, M.E.; Augusto-Oliveira, M.; Santos-Sacramento, L.; Lopes-Araújo, A. Mercúrio Na Amazônia Uma Breve Contextualização Do Problema. **2021**.
32. De Oliveira, D.F.; De Castro, B.S.; Do Nascimento Recktenvald, M.C.N.; Da Costa Júnior, W.A.; Da Silva, F.X.; De Menezes Alves, C.L.; Froehlich, J.D.; Bastos, W.R.; Ott, A.M.T. Mercury in Wild Animals and Fish and Health Risk for Indigenous Amazonians. *Food Additives & Contaminants: Part B* **2021**, *14*, 161–169, doi:10.1080/19393210.2020.1849410.
33. Hacon, S. de S.; Oliveira-Da-costa, M.; Gama, C. de S.; Ferreira, R.; Basta, P.C.; Schramm, A.; Yokota, D. Mercury Exposure through Fish Consumption in Traditional Communities in the Brazilian Northern Amazon. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2020**, *17*, 1–15, doi:10.3390/ijerph17155269.
34. Baturin, G.; Gordeev, V. Geochemistry of Suspended Matter in the Amazon River Waters. *Geochemistry International* **2019**, *57*, 197–205.
35. Kasper, D.; Forsberg, B.R.; do Amaral Kehrig, H.; Amaral, J.H.F.; Bastos, W.R.; Malm, O. *Mercury in Black-Waters of the Amazon*; 2018; ISBN 978-3-319-90121-3.
36. Fisher, J.A.; Schneider, L.; Fostier, A.-H.; Guerrero, S.; Guimarães, J.R.D.; Labuschagne, C.; Leaner, J.J.; Martin, L.G.; Mason, R.P.; Somerset, V.; et al. A Synthesis of Mercury Research in the Southern Hemisphere, Part 2: Anthropogenic Perturbations. *Ambio* **2023**, *52*, 918–937, doi:10.1007/s13280-023-01840-5.
37. Brito, B.C.; Forsberg, B.R.; Kasper, D.; Amaral, J.H.F.; De Vasconcelos, M.R.R.; De Sousa, O.P.; Cunha, F.A.G.; Bastos, W.R. The Influence of Inundation and Lake Morphometry on the Dynamics of Mercury in the Water and Plankton in an Amazon Floodplain Lake. *Hydrobiologia* **2017**, *790*, 35–48, doi:10.1007/s10750-016-3017-y.
38. Salazar-Camacho, C.; Salas-Moreno, M.; Marrugo-Madrid, S.; Marrugo-Negrete, J.; Díez, S. Dietary Human Exposure to Mercury in Two Artisanal Small-Scale Gold Mining Communities of Northwestern Colombia. *Environment International* **2017**, *107*, 47–54, doi:10.1016/j.envint.2017.06.011.
39. Diringier, S.E.; Berky, A.J.; Marani, M.; Ortiz, E.J.; Karatum, O.; Plata, D.L.; Pan, W.K.; Hsu-Kim, H. Deforestation Due to Artisanal and Small-Scale Gold Mining Exacerbates Soil and Mercury Mobilization in Madre de Dios, Peru. *Environmental Science and Technology* **2019**, doi:10.1021/acs.est.9b06620.
40. Santos-Sacramento, L.; Arrifano, G.P.; Lopes-Araújo, A.; Augusto-Oliveira, M.; Albuquerque-Santos, R.; Takeda, P.Y.; Souza-Monteiro, J.R.; Macchi, B.M.; do Nascimento, J.L.M.; Lima, R.R.; et al. Human Neurotoxicity of Mercury in the Amazon: A Scoping Review with Insights and Critical Considerations. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **2021**, *208*, doi:10.1016/j.ecoenv.2020.111686.
41. Miguel V. M. Neto; Darlan Q. Brito Mercury (Hg) Researches in Brazilian Biomes: A Scientometric Analysis between the Years 1991 and 2018. *J Veterina Sci Res* **2021**, 01–13, doi:10.36811/jvsr.2021.110012.
42. Basta, P.C.; De Vasconcelos, A.C.S.; Hallwass, G.; Yokota, D.; Pinto, D.D.O. d’El R.; De Aguiar, D.S.; De Souza, C.C.; Oliveira-da-Costa, M. Risk Assessment of Mercury-Contaminated Fish Consumption in the Brazilian Amazon: An Ecological Study. *Toxics* **2023**, *11*, 800, doi:10.3390/toxics11090800.
43. Moulatlet, G.M.; Yacelga, N.; Rico, A.; Mora, A.; Hauser-Davis, R.A.; Cabrera, M.; Capparelli, M.V. A Systematic Review on Metal Contamination Due to Mining Activities in the Amazon Basin and Associated Environmental Hazards. *Chemosphere* **2023**, *339*, 139700, doi:10.1016/j.chemosphere.2023.139700.
44. Gimenes, T.C.; Penteado, J.O.; dos Santos, M.; da Silva Júnior, F.M.R. Methylmercury in Fish from the Amazon Region—a Review Focused on Eating Habits. *Water, Air, and Soil Pollution* **2021**, *232*, doi:10.1007/s11270-021-05151-x.
45. Basu, N.; Bastiansz, A.; Dórea, J.G.; Fujimura, M.; Horvat, M.; Shroff, E.; Weihe, P.; Zastenskaya, I. Our Evolved Understanding of the Human Health Risks of Mercury. *Ambio* **2023**, *52*, 877–896, doi:10.1007/s13280-023-01831-6.
46. Page, M.J.; McKenzie, J.E.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.C.; Mulrow, C.D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J.M.; Akl, E.A.; Brennan, S.E.; et al. The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. *Systematic Reviews* **2021**, *10*, 1–11, doi:10.1186/s13643-021-01626-4.
47. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*; Higgins, J., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M., Welch, V., Eds.; 2nd ed.; John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: Chichester (UK), 2019;
48. Kirby, A. Exploratory Bibliometrics: Using VOSviewer as a Preliminary Research Tool. *Publications* **2023**, *11*, 10, doi:10.3390/publications11010010.

- 804 49. RAISG Amazon in Numbers 2022.
- 805 50. Cohen Hubal, E.A.; Frank, J.J.; Nachman, R.; Angrish, M.; Deziel, N.C.; Fry, M.; Tornero-Velez, R.; Kraft, A.;  
806 Lavoie, E. Advancing Systematic-Review Methodology in Exposure Science for Environmental Health Decision  
807 Making. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* **2020**, *30*, 906–916, doi:10.1038/s41370-020-0236-  
808 0.
- 809 51. FAO/WHO GENERAL STANDARD FOR CONTAMINANTS AND TOXINS IN FOOD AND FEED. *CODEX*  
810 *ALIMENTARIUS* 2019, 1–13.
- 811 52. WHO Chapter 6.9 Mercury General Description. *Air Quality Guidelines* **2000**, 1–15.
- 812 53. Ministério da Saúde RESOLUÇÃO - RDC Nº 42, DE 29 DE AGOSTO DE 2013 2013.
- 813 54. Poulin, J.; Gibb, H.; Prüss-Üstün, A.; World Health Organization Mercury: Assessing the Environmental Burden  
814 of Disease at National and Local Levels. **2008**.
- 815 55. Costa Junior, J.M.F.; da Silva, C.I.M.; Lima, A.A. da S.; Rodrigues Júnior, D.; Silveira, L.C. de L.; Souza, G. da S.;  
816 Pinheiro, M. da C.N. Teores de Mercúrio Em Cabelo e Consumo de Pescado de Comunidades Ribeirinhas Na  
817 Amazônia Brasileira, Região Do Tapajós. *Ciencia e Saude Coletiva* **2018**, *23*, 805–812, doi:10.1590/1413-  
818 81232018233.09492016.
- 819 56. Wang, Y.; Li, L.; Yao, C.; Tian, X.; Wu, Y.; Xie, Q.; Wang, D. Mercury in Human Hair and Its Implications for  
820 Health Investigation. *Current Opinion in Environmental Science and Health* **2021**, *22*, 100271,  
821 doi:10.1016/j.coesh.2021.100271.
- 822 57. QGIS Association QGIS.Org 2023.
- 823 58. Dinerstein, E.; Olson, D.; Joshi, A.; Vynne, C.; Burgess, N.D.; Wikramanayake, E.; Hahn, N.; Palminteri, S.; Hedao,  
824 P.; Noss, R.; et al. An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm. *BioScience* **2017**, *67*, 534–  
825 545, doi:10.1093/biosci/bix014.
- 826 59. Southern America | Realm & Subrealms | One Earth Available online:  
827 <https://www.oneearth.org/realms/southern-america/> (accessed on 16 November 2023).
- 828 60. Tang, L.; Werner, T.T. Author Correction: Global Mining Footprint Mapped from High-Resolution Satellite  
829 Imagery. *Commun Earth Environ* **2023**, *4*, 163, doi:10.1038/s43247-023-00831-4.
- 830 61. Yevugah, L.L.; Darko, G.; Bak, J. Does Mercury Emission from Small-Scale Gold Mining Cause Widespread Soil  
831 Pollution in Ghana? *Environmental Pollution* **2021**, *284*, 116945, doi:10.1016/j.envpol.2021.116945.
- 832 62. Goix, S.; Maurice, L.; Laffont, L.; Rinaldo, R.; Lagane, C.; Chmeleff, J.; Menges, J.; Heimbürger, L.-E.; Maury-  
833 Brachet, R.; Sonke, J.E. Quantifying the Impacts of Artisanal Gold Mining on a Tropical River System Using  
834 Mercury Isotopes. *Chemosphere* **2019**, *219*, 684–694, doi:10.1016/j.chemosphere.2018.12.036.
- 835 63. Gerson, J.R.; Szponar, N.; Zambrano, A.A.; Bergquist, B.; Broadbent, E.; Driscoll, C.T.; Erkenwick, G.; Evers, D.C.;  
836 Fernandez, L.E.; Hsu-Kim, H. Amazon Forests Capture High Levels of Atmospheric Mercury Pollution from  
837 Artisanal Gold Mining. *Nature communications* **2022**, *13*, 559.
- 838 64. Feingold, B.J.; Berky, A.; Hsu-Kim, H.; Rojas Jurado, E.; Pan, W.K. Population-Based Dietary Exposure to Mercury  
839 through Fish Consumption in the Southern Peruvian Amazon. *Environmental Research* **2020**, *183*, 108720,  
840 doi:10.1016/j.envres.2019.108720.
- 841 65. Nelder, J.A.; Wedderburn, R.W. Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics*  
842 *in Society* **1972**, *135*, 370–384.
- 843 66. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing 2023.
- 844 67. Chambers, J.; Hastie, T. Linear Models. Chapter 4 of *Statistical Models in S. Wadsworth & Brooks/Cole* **1992**, 1992.
- 845 68. Wilkinson, G.N.; Rogers, C.E. Symbolic Description of Factorial Models for Analysis of Variance. *Applied Statistics*  
846 **1973**, *22*, 392, doi:10.2307/2346786.
- 847 69. De Castro Paiva, T.; Dary, E.P.; Pestana, I.A.; Amadio, S.A.; Malm, O.; Kasper, D. Flood-Pulse and Trophic Position  
848 Modulate Mercury Concentrations in Fishes from an Amazon Floodplain Lake. *Environmental Research* **2022**, *215*,  
849 114307, doi:10.1016/j.envres.2022.114307.
- 850 70. Azevedo, L.S.; Pestana, I.A.; Nery, A.F.D.C.; Bastos, W.R.; Souza, C.M.M. Influence of the Flood Pulse on Mercury  
851 Accumulation in Detritivorous, Herbivorous and Omnivorous Fish in Brazilian Amazonia. *Ecotoxicology* **2019**, *28*,  
852 478–485, doi:10.1007/s10646-019-02044-y.

71. Azevedo, L.S.; Pestana, I.A.; Almeida, M.G.; Ferreira Da Costa Nery, A.; Bastos, W.R.; Magalhães Souza, C.M. Mercury Biomagnification in an Ichthyic Food Chain of an Amazon Floodplain Lake (Puruzinho Lake): Influence of Seasonality and Food Chain Modeling. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **2021**, *207*, 111249, doi:10.1016/j.ecoenv.2020.111249.
72. Vieira, J.C.S.; Braga, C.P.; De Oliveira, G.; Padilha, C.D.C.F.; De Moraes, P.M.; Zara, L.F.; Leite, A.D.L.; Buzalaf, M.A.R.; Padilha, P.D.M. Mercury Exposure: Protein Biomarkers of Mercury Exposure in Jaraqui Fish from the Amazon Region. *Biol Trace Elem Res* **2018**, *183*, 164–171, doi:10.1007/s12011-017-1129-5.
73. Souza-Araujo, J.; Andrades, R.; Hauser-Davis, R.A.; Lima, M.O.; Giarrizzo, T. Before the Dam: A Fish-Mercury Contamination Baseline Survey at the Xingu River, Amazon Basin Before the Belo Monte Dam. *Bull Environ Contam Toxicol* **2022**, *108*, 861–866, doi:10.1007/s00128-021-03371-9.
74. Silva, S.F.D.; Oliveira, D.C.; Pereira, J.P.G.; Castro, S.P.; Costa, B.N.S.; Lima, M.D.O. Seasonal Variation of Mercury in Commercial Fishes of the Amazon Triple Frontier, Western Amazon Basin. *Ecological Indicators* **2019**, *106*, 105549, doi:10.1016/j.ecolind.2019.105549.
75. Ferreira Da Silva, S.; De Oliveira Lima, M. Mercury in Fish Marketed in the Amazon Triple Frontier and Health Risk Assessment. *Chemosphere* **2020**, *248*, 125989, doi:10.1016/j.chemosphere.2020.125989.
76. Souza-Araujo, J.; Souza-Junior, O.G.; Guimarães-Costa, A.; Hussey, N.E.; Lima, M.O.; Giarrizzo, T. The Consumption of Shark Meat in the Amazon Region and Its Implications for Human Health and the Marine Ecosystem. *Chemosphere* **2021**, *265*, 129132, doi:10.1016/j.chemosphere.2020.129132.
77. Albuquerque, F.E.A.; Minervino, A.H.H.; Miranda, M.; Herrero-Latorre, C.; Barrêto Júnior, R.A.; Oliveira, F.L.C.; Sucupira, M.C.A.; Ortolani, E.L.; López-Alonso, M. Toxic and Essential Trace Element Concentrations in Fish Species in the Lower Amazon, Brazil. *Science of The Total Environment* **2020**, *732*, 138983, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138983.
78. Lino, A.S.; Kasper, D.; Guida, Y.S.; Thomaz, J.R.; Malm, O. Mercury and Selenium in Fishes from the Tapajós River in the Brazilian Amazon: An Evaluation of Human Exposure. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* **2018**, *48*, 196–201, doi:10.1016/j.jtemb.2018.04.012.
79. Alcalá-Orozco, M.; Caballero-Gallardo, K.; Olivero-Verbel, J. Biomonitoring of Mercury, Cadmium and Selenium in Fish and the Population of Puerto Nariño, at the Southern Corner of the Colombian Amazon. *Arch Environ Contam Toxicol* **2020**, *79*, 354–370, doi:10.1007/s00244-020-00761-8.
80. Da Silva, S.F.; Pereira, J.P.G.; Oliveira, D.C.; Lima, M.D.O. Methylmercury in Predatory and Non-Predatory Fish Species Marketed in the Amazon Triple Frontier. *Bull Environ Contam Toxicol* **2020**, *104*, 733–737, doi:10.1007/s00128-020-02862-5.
81. Finoto Viana, L.; Damasceno De Souza, D.C.; Batista Da Silva, E.; Kummrow, F.; Lima Cardoso, C.A.; De Lima, N.A.; Crispim, B.D.A.; Barufatti, A.; Florentino, A.C. Bioaccumulation of Metals and Genotoxic Effects in Females of *Colomesus Asellus* Collected in an Amazon River Estuary, Amapá, Brazil. *Limnetica* **2023**, *42*, 1, doi:10.23818/limn.42.15.
82. Lino, A.S.; Kasper, D.; Guida, Y.S.; Thomaz, J.R.; Malm, O. Total and Methyl Mercury Distribution in Water, Sediment, Plankton and Fish along the Tapajós River Basin in the Brazilian Amazon. *Chemosphere* **2019**, *235*, 690–700, doi:10.1016/j.chemosphere.2019.06.212.
83. Oliveira, R.B.D.; Silva, D.M.D.; Franco, T.S.B.S.; Vasconcelos, C.R.S.; Sousa, D.J.D.A.D.; Sarrazin, S.L.F.; Sakamoto, M.; Bourdineaud, J.-P. Fish Consumption Habits of Pregnant Women in Itaituba, Tapajós River Basin, Brazil: Risks of Mercury Contamination as Assessed by Measuring Total Mercury in Highly Consumed Piscivore Fish Species and in Hair of Pregnant Women. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology* **2022**, *73*, 131–142, doi:10.2478/aiht-2022-73-3611.
84. De Souza Azevedo, J.; Hortellani, M.A.; De Souza Sarkis, J.E. Organotropism of Total Mercury (THg) in *Cichla Pinima*, Ecological Aspects and Human Consumption in Fish from Amazon Region, Brazil. *Environ Sci Pollut Res* **2019**, *26*, 21363–21370, doi:10.1007/s11356-019-05303-x.
85. Da Silva Montes, C.; Ferreira, M.A.P.; Giarrizzo, T.; Amado, L.L.; Rocha, R.M. The Legacy of Artisanal Gold Mining and Its Impact on Fish Health from Tapajós Amazonian Region: A Multi-Biomarker Approach. *Chemosphere* **2022**, *287*, 132263, doi:10.1016/j.chemosphere.2021.132263.

86. Azevedo, L.S.; Pestana, I.A.; Da Costa Nery, A.F.; Bastos, W.R.; Souza, C.M.M. Variation in Hg Accumulation between Demersal and Pelagic Fish from Puruzinho Lake, Brazilian Amazon. *Ecotoxicology* **2019**, *28*, 1143–1149, doi:10.1007/s10646-019-02118-x.
87. Cavecci-Mendonça, B.; Cavalcante de Souza Vieira, J.; Monteiro de Lima, P.; Leite, A.L.; Buzalaf, M.A.R.; Zara, L.F.; de Magalhães Padilha, P. Study of Proteins with Mercury in Fish from the Amazon Region. *Food Chemistry* **2020**, *309*, 125460, doi:10.1016/j.foodchem.2019.125460.
88. de Queiroz, J.V.; Cavecci-Mendonça, B.; Vieira, J.C.S.; Martins, R.A.; de Almeida Assunção, A.S.; Cavallini, N.G.; dos Santos, F.A.; de Magalhães Padilha, P. Metalloproteomic Strategies for Identifying Proteins as Biomarkers of Mercury Exposure in *Serrasalmus Rhombeus* from the Amazon Region. *Biological Trace Element Research* **2021**, *199*, 712–720, doi:10.1007/s12011-020-02178-9.
89. Soares, J.M.; Gomes, J.M.; Anjos, M.R.; Silveira, J.N.; Custódio, F.B.; Gloria, M.B.A. Mercury in Fish from the Madeira River and Health Risk to Amazonian and Riverine Populations. *Food Research International* **2018**, *109*, 537–543, doi:10.1016/j.foodres.2018.04.069.
90. Vieira, J.C.S.; De Oliveira, G.; Cavallini, N.G.; Braga, C.P.; Adamec, J.; Zara, L.F.; Buzalaf, M.A.R.; De Magalhães Padilha, P. Investigation of Protein Biomarkers and Oxidative Stress in *Pirirampus Pirinampu* Exposed to Mercury Species from the Madeira River, Amazon-Brazil. *Biol Trace Elem Res* **2022**, *200*, 1872–1882, doi:10.1007/s12011-021-02805-z.
91. Da Cunha Bataglioli, I.; De Queiroz, J.V.; Vieira, J.C.S.; Cavallini, N.G.; Braga, C.P.; Buzalaf, M.A.R.; Zara, L.F.; Adamec, J.; De Magalhães Padilha, P. Mercury Metalloproteomic Profile in Muscle Tissue of *Arapaima Gigas* from the Brazilian Amazon. *Environ Monit Assess* **2022**, *194*, 705, doi:10.1007/s10661-022-10357-5.
92. Bittarello, A.C.; Vieira, J.C.S.; Braga, C.P.; De Paula Araújo, W.L.; Da Cunha Bataglioli, I.; Da Silva, J.M.; Buzalaf, M.A.R.; Fleuri, L.F.; De Magalhães Padilha, P. Characterization of Molecular Biomarkers of Mercury Exposure to Muscle Tissue of *Plagioscion Squamosissimus* and *Colossoma Macropomum* from the Amazon Region. *Food Chemistry* **2019**, *276*, 247–254, doi:10.1016/j.foodchem.2018.10.002.
93. De Queiroz, J.V.; Vieira, J.C.S.; De Oliveira, G.; Braga, C.P.; Da Cunha Bataglioli, I.; Da Silva, J.M.; De Paula Araújo, W.L.; De Magalhães Padilha, P. Identification of Biomarkers of Mercury Contamination in *Brachyplatystoma Filamentosum* of the Madeira River, Brazil, Using Metalloproteomic Strategies. *Biol Trace Elem Res* **2019**, *187*, 291–300, doi:10.1007/s12011-018-1363-5.
94. Mussu, M.H.; De Almeida, R.; De Carvalho, D.P.; Lauthartte, L.C.; De Holanda, I.B.B.; Almeida, M.G.D.; De Sousa-Filho, I.F.; De Rezende, C.E.; Malm, O.; Bastos, W.R. Evaluating Total Mercury and Methylmercury Biomagnification Using Stable Isotopes of Carbon and Nitrogen in Fish from the Madeira River Basin, Brazilian Amazon. *Environ Sci Pollut Res* **2022**, *30*, 33543–33554, doi:10.1007/s11356-022-24235-7.
95. Reis, P.A.; Ozório, R.O.A.; Rodriguez, A.F.R.; Faria, F.S.E.D.V.; Furtado, C.M.; Ribeiro, R.A. Mercury Distribution in Two Commercial Fish Species (*Pimelodus Maculatus* and *Calophysus Macropterus*) - Case Study of River Acre (Acre State, Brazilian Amazon). *Human and Ecological Risk Assessment* **2020**, *26*, 1439–1448, doi:10.1080/10807039.2019.1599710.
96. Vieira, J.C.S.; Braga, C.P.; Queiroz, J.V.D.; Cavecci-Mendonça, B.; Oliveira, G.D.; Freitas, N.G.D.; Fernandes, A.A.H.; Fernandes, M.D.S.; Buzalaf, M.A.R.; Adamec, J.; et al. The Effects of Mercury Exposure on Amazonian Fishes: An Investigation of Potential Biomarkers. *Chemosphere* **2023**, *316*, 137779, doi:10.1016/j.chemosphere.2023.137779.
97. De Queiroz, J.V.; Vieira, J.C.S.; Da Cunha Bataglioli, I.; Bittarello, A.C.; Braga, C.P.; De Oliveira, G.; Do Carmo Federici Padilha, C.; De Magalhães Padilha, P. Total Mercury Determination in Muscle and Liver Tissue Samples from Brazilian Amazon Fish Using Slurry Sampling. *Biol Trace Elem Res* **2018**, *184*, 517–522, doi:10.1007/s12011-017-1212-y.
98. Vieira, J.C.S.; Cavecci, B.; Queiroz, J.V.; Braga, C.P.; Padilha, C.C.F.; Leite, A.L.; Figueiredo, W.S.; Buzalaf, M.A.R.; Zara, L.F.; Padilha, P.M. Determination of the Mercury Fraction Linked to Protein of Muscle and Liver Tissue of Tucunaré (*Cichla Spp.*) from the Amazon Region of Brazil. *Arch Environ Contam Toxicol* **2015**, *69*, 422–430, doi:10.1007/s00244-015-0160-9.

99. da Silva Montes, C.; Pantoja Ferreira, M.A.; Giarrizzo, T.; Amado, L.L.; Rocha, R.M. Evaluation of Metal Contamination Effects in Piranhas through Biomonitoring and Multi Biomarkers Approach. *Heliyon* **2020**, *6*, e04666, doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04666.
100. De Matos, L.S.; Silva Correa, A.S.A.; Da Silva, S.A.A.; Muniz, C.C.; Alves Ignacio, A.R. Mercury Concentrations in Fish and Human Health Assessment in Preflood Phase of a Hydro Dam in Teles Pires River, Southern Brazilian Amazon. *Elementa* **2021**, *9*, 1–13, doi:10.1525/elementa.2021.020.
101. Matos, L.S.D.; Silva, J.O.S.; Kasper, D.; Carvalho, L.N. Assessment of Mercury Contamination in Brycon Falcatus (Characiformes: Bryconidae) and Human Health Risk by Consumption of This Fish from the Teles Pires River, Southern Amazonia. *Neotrop. ichthyol.* **2018**, *16*, doi:10.1590/1982-0224-20160106.
102. Viana, L.F.; Kummrow, F.; Cardoso, C.A.L.; De Lima, N.A.; Do Amaral Crispim, B.; Barufatti, A.; Florentino, A.C. Metal Bioaccumulation in Fish from the Araguari River (Amazon Biome) and Human Health Risks from Fish Consumption. *Environ Sci Pollut Res* **2023**, *30*, 4111–4122, doi:10.1007/s11356-022-22457-3.
103. Da Silva Costa, M.; Viana, L.F.; Lima Cardoso, C.A.; Gonar Silva Isacksson, E.D.; Silva, J.C.; Florentino, A.C. Landscape Composition and Inorganic Contaminants in Water and Muscle Tissue of Plagioscion Squamosissimus in the Araguari River (Amazon, Brazil). *Environmental Research* **2022**, *208*, 112691, doi:10.1016/j.envres.2022.112691.
104. Costa, I.D.D.; Nascimento, E.L.D.; Facchetti, M.S.D.A.; Nunes, N.N.D.S.; Gomes, J.P.D.O.; Almeida, R.D.; Bastos, W.R. Mercury in Muscle and Liver of Plagioscion Squamosissimus (Acanthuriformes: Sciaenidae) from the Machado River, Brazilian Amazon. *Acta Amaz.* **2022**, *52*, 60–68, doi:10.1590/1809-4392202001032.
105. Martinez, G.; McCord, S.; Driscoll, C.; Todorova, S.; Wu, S.; Araújo, J.; Vega, C.; Fernandez, L. Mercury Contamination in Riverine Sediments and Fish Associated with Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Madre de Dios, Peru. *IJERPH* **2018**, *15*, 1584, doi:10.3390/ijerph15081584.
106. Barocas, A.; Vega, C.; Alarcon Pardo, A.; Araujo Flores, J.M.; Fernandez, L.; Groenendijk, J.; Pisconte, J.; Macdonald, D.W.; Swaisgood, R.R. Local Intensity of Artisanal Gold Mining Drives Mercury Accumulation in Neotropical Oxbow Lake Fishes. *Science of The Total Environment* **2023**, *886*, 164024, doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164024.
107. Rodriguez-Levy, I.E.; Van Damme, P.A.; Carvajal-Vallejos, F.M.; Bervoets, L. Trace Element Accumulation in Different Edible Fish Species from the Bolivian Amazon and the Risk for Human Consumption. *Heliyon* **2022**, *8*, e11649, doi:10.1016/j.heliyon.2022.e11649.
108. De Vasconcellos, A.C.S.; Ferreira, S.R.B.; De Sousa, C.C.; De Oliveira, M.W.; De Oliveira Lima, M.; Basta, P.C. Health Risk Assessment Attributed to Consumption of Fish Contaminated with Mercury in the Rio Branco Basin, Roraima, Amazon, Brazil. *Toxics* **2022**, *10*, 516, doi:10.3390/toxics10090516.
109. Borges, A.C.; Da Silva Montes, C.; Barbosa, L.A.; Ferreira, M.A.P.; Berrêdo, J.F.; Martins Rocha, R. Integrated Use of Histological and Ultrastructural Biomarkers for Assessing Mercury Pollution in Piranhas (*Serrasalmus Rhombeus*) from the Amazon Mining Region. *Chemosphere* **2018**, *202*, 788–796, doi:10.1016/j.chemosphere.2018.02.169.
110. Vreedzaam, A.; Ouboter, P.; Hindori-Mohangoo, A.D.; Lepak, R.; Rumschlag, S.; Janssen, S.; Landburg, G.; Shankar, A.; Zijlmans, W.; Lichtveld, M.Y.; et al. Contrasting Mercury Contamination Scenarios and Site Susceptibilities Confound Fish Mercury Burdens in Suriname, South America. *Environmental Pollution* **2023**, *336*, 122447, doi:10.1016/j.envpol.2023.122447.
111. Laffont, L.; Menges, J.; Goix, S.; Gentès, S.; Maury-Brachet, R.; Sonke, J.E.; Legeay, A.; Gonzalez, P.; Rinaldo, R.; Maurice, L. Hg Concentrations and Stable Isotope Variations in Tropical Fish Species of a Gold-Mining-Impacted Watershed in French Guiana. *Environ Sci Pollut Res* **2021**, *28*, 60609–60621, doi:10.1007/s11356-021-14858-7.
112. Montaña, C.G.; Liverpool, E.; Taphorn, D.C.; Schalk, C.M. The Cost of Gold: Mercury Contamination of Fishes in a Neotropical River Food Web. *Neotrop. ichthyol.* **2021**, *19*, e200155, doi:10.1590/1982-0224-2020-0155.
113. Cunha Bataglioli, I.D.; Souza Vieira, J.C.; Vitor De Queiroz, J.; Da Silva Fernandes, M.; Bittarello, A.C.; Braga, C.P.; Rabelo Buzalaf, M.A.; Adamec, J.; Zara, L.F.; Magalhães Padilha, P.D. Physiological and Functional Aspects of Metal-Binding Protein Associated with Mercury in the Liver Tissue of Pirarucu (*Arapaima Gigas*) from the Brazilian Amazon. *Chemosphere* **2019**, *236*, 124320, doi:10.1016/j.chemosphere.2019.07.051.



114. Viana, L.F.; Cardoso, C.A.L.; Lima-Junior, S.E.; Suárez, Y.R.; Florentino, A.C. Bioaccumulation of Metal in Liver Tissue of Fish in Response to Water Toxicity of the Araguari-Amazon River, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment* **2020**, *192*, doi:10.1007/s10661-020-08696-2.
115. Albuquerque, F.E.A.; Minervino, A.H.H.; Miranda, M.; Herrero-Latorre, C.; Barrêto Júnior, R.A.; Oliveira, F.L.C.; Dias, S.R.; Ortolani, E.L.; López-Alonso, M. Toxic and Essential Trace Element Concentrations in the Freshwater Shrimp *Macrobrachium Amazonicum* in the Lower Amazon, Brazil. *Journal of Food Composition and Analysis* **2020**, *86*, 103361, doi:10.1016/j.jfca.2019.103361.
116. Pinheiro-Sousa, D.B.; da Costa Soares, S.H.; Torres, H.S.; de Jesus, W.B.; de Oliveira, S.R.S.; Bastos, W.R.; de Oliveira Ribeiro, C.A.; Carvalho-Neta, R.N.F. Sediment Contaminant Levels and Multibiomarker Approach to Assess the Health of Catfish *Sciades Herzbergii* in a Harbor from the Northern Brazilian Amazon. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **2021**, *208*, doi:10.1016/j.ecoenv.2020.111540.
117. Lopes, M.C.B.; de CARVALHO, G.O.; Bernardo, R.R.; Macedo, J.; Lino, A.S.; Ramalho, E.E.; Kasper, D.; Meire, R.O.; Torres, J.P.M.; Malm, O. Total Mercury in Wild Felids Occurring in Protected Areas in the Central Brazilian Amazon. *Acta Amazonica* **2020**, *50*, 142–148, doi:10.1590/1809-4392201903331.
118. Barbosa, M.S.; Carvalho, D.P.; Gravena, W.; De Almeida, R.; Mussy, M.H.; Sousa, E.A.; Holanda, I.B.B.; De Sousa-Filho, I.F.; Bastos, W.R. Total Mercury and Methylmercury in River Dolphins (Cetacea: Iniidae: *Inia* Spp.) in the Madeira River Basin, Western Amazon. *Environ Sci Pollut Res* **2021**, *28*, 45121–45133, doi:10.1007/s11356-021-13953-z.
119. Salazar-Pammo, A.C.; Achá, D.; Miranda-Chumacero, G. Preferential Liver Accumulation of Mercury Explains Low Concentrations in Muscle of Caiman Yacare (Alligatoridae) in Upper Amazon. *Bull Environ Contam Toxicol* **2021**, *106*, 264–269, doi:10.1007/s00128-020-03081-8.
120. Dias Dos Santos, A.N.; Recktenvald, M.C.N. do N.; De Carvalho, D.P.; Bortoleto Puerta, E.L.; De Sousa-Filho, I.F.; Dórea, J.G.; Bastos, W.R. Mercury in Birds (Aquatic and Scavenger) from the Western Amazon. *Environmental Research* **2021**, *201*, 111574, doi:10.1016/j.envres.2021.111574.
121. Kumar, A.; Divoll, T.J.; Ganguli, P.M.; Trama, F.A.; Lamborg, C.H. Presence of Artisanal Gold Mining Predicts Mercury Bioaccumulation in Five Genera of Bats (Chiroptera). *Environmental Pollution* **2018**, *236*, 862–870, doi:10.1016/j.envpol.2018.01.109.
122. Moreno-Brush, M.; Portillo, A.; Brändel, S.D.; Storch, I.; Tschapka, M.; Biester, H. Mercury Concentrations in Bats (Chiroptera) from a Gold Mining Area in the Peruvian Amazon. *Ecotoxicology* **2018**, *27*, 45–54, doi:10.1007/s10646-017-1869-1.
123. Da Silva Júnior, F.J.T.M.; Ribeiro, J.D.N.; Da Silva, H.L.A.; Da Silva Carneiro, C.; De Jesus, E.F.O.; De Araújo, U.B.; Lazzarini, S.M.; Souza, A.R.; Simões, J.S.; Lopes, R.T.; et al. Study of Inorganic Elements in Different Organs and Tissues of Amazonian Manatee (*Trichechus Inunguis*) from Brazil. *Environ Sci Pollut Res* **2022**, *29*, 30486–30495, doi:10.1007/s11356-021-17748-0.
124. Mosquera-Guerra, F.; Trujillo, F.; Parks, D.; Oliveira-da-Costa, M.; Van Damme, P.A.; Echeverría, A.; Franco, N.; Carvajal-Castro, J.D.; Mantilla-Meluk, H.; Marmontel, M.; et al. Mercury in Populations of River Dolphins of the Amazon and Orinoco Basins. *EcoHealth* **2019**, *16*, 743–758, doi:10.1007/s10393-019-01451-1.
125. Borges, Â.O.; Erickson, J.; Silva, L.A.D.; Fantin, C.; Domingos-Moreira, F.X.V. Mercury Bioaccumulation, Genotoxic and Biochemical Biomarkers Reveal the Health Status of Yellow-Spotted Amazon River Turtles (*Podocnemis unifilis*) in an Environmental Protection Area in the Amazon. *Acta Amaz.* **2022**, *52*, 254–263, doi:10.1590/1809-4392202201230.
126. Pignati, M.; Pezzuti, J.; Souza, L.; Lima, M.; Pignati, W.; Mendes, R. Assessment of Mercury Concentration in Turtles (*Podocnemis unifilis*) in the Xingu River Basin, Brazil. *IJERPH* **2018**, *15*, 1185, doi:10.3390/ijerph15061185.
127. Targino, F.J.; Ribeiro, J.D.D.N.; Simões, J.S.; Carneiro, C.S.; Lazzarini, S.M.; Souza, A.R.; Ferreira, M.D.S.; Mano, S.B.; Mársico, E.T. Total Mercury Content in the Tissues of Freshwater Cheloniid (*Podocnemis expansa*) and a Human Health Risk Assessment for the Amazon Population in Brazil. *IJERPH* **2023**, *20*, 6489, doi:10.3390/ijerph20156489.
128. Oliveira, E.; Ignácio, A.R.A.; Lázaro, W.L.; Díez, S.; Guimarães, J.R.D.; Santos-Filho, M. Green Kingfishers as Sentinel Species for Mercury Contamination in Amazon. *Arch Environ Contam Toxicol* **2023**, *85*, 34–45, doi:10.1007/s00244-023-01009-x.

129. Hurtado, T.C.; De Medeiros Costa, G.; De Carvalho, G.S.; Brum, B.R.; Ignácio, Á.R.A. Mercury and Methylmercury Concentration in the Feathers of Two Species of Kingfishers *Megaceryle Torquata* and *Chloroceryle Amazona* in the Upper Paraguay Basin and Amazon Basin. *Ecotoxicology* **2023**, doi:10.1007/s10646-023-02680-5.
130. Galvão, R.C.F.; Holanda, I.B.B.; De Carvalho, D.P.; Almeida, R.; Souza, C.M.M.; Lacerda, L.D.; Bastos, W.R. Freshwater Shrimps (*Macrobrachium Depressimanum* and *Macrobrachium Jelskii*) as Biomonitors of Hg Availability in the Madeira River Basin, Western Amazon. *Environ Monit Assess* **2018**, *190*, 77, doi:10.1007/s10661-018-6460-6.
131. Arrifano, G.P.F.; Martín-Doimeadios, R.C.R.; Jiménez-Moreno, M.; Ramírez-Mateos, V.; Da Silva, N.F.S.; Souza-Monteiro, J.R.; Augusto-Oliveira, M.; Paraense, R.S.O.; Macchi, B.M.; Do Nascimento, J.L.M.; et al. Large-Scale Projects in the Amazon and Human Exposure to Mercury: The Case-Study of the Tucuruí Dam. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **2018**, *147*, 299–305, doi:10.1016/j.ecoenv.2017.08.048.
132. Vega, C.; Orellana, J.; Oliveira, M.; Hacon, S.; Basta, P. Human Mercury Exposure in Yanomami Indigenous Villages from the Brazilian Amazon. *IJERPH* **2018**, *15*, 1051, doi:10.3390/ijerph15061051.
133. Feitosa-Santana, C.; Souza, G.D.S.; Sirius, E.V.P.; Rodrigues, A.R.; Cortes, M.I.T.; Silveira, L.C.D.L.; Ventura, D.F. Color Vision Impairment with Low-Level Methylmercury Exposure of an Amazonian Population – Brazil. *NeuroToxicology* **2018**, *66*, 179–184, doi:10.1016/j.neuro.2018.01.010.
134. Dos Santos Freitas, J.; Da Costa Brito Lacerda, E.M.; Da Silva Martins, I.C.V.; Rodrigues, D.; Bonci, D.M.O.; Cortes, M.I.T.; Corvelo, T.C.O.; Ventura, D.F.; De Lima Silveira, L.C.; Da Conceição Nascimento Pinheiro, M.; et al. Cross-Sectional Study to Assess the Association of Color Vision with Mercury Hair Concentration in Children from Brazilian Amazonian Riverine Communities. *NeuroToxicology* **2018**, *65*, 60–67, doi:10.1016/j.neuro.2018.02.006.
135. Costa Junior, J.M.F.; Lima, A.A.D.S.; Rodrigues Junior, D.; Khoury, E.D.T.; Souza, G.D.S.; Silveira, L.C.D.L.; Pinheiro, M.D.C.N. Manifestações Emocionais e Motoras de Ribeirinhos Expostos Ao Mercúrio Na Amazônia. *Rev. bras. epidemiol.* **2017**, *20*, 212–224, doi:10.1590/1980-5497201700020003.
136. Oliveira, R.A.A.D.; Pinto, B.D.; Rebouças, B.H.; Ciampi De Andrade, D.; Vasconcellos, A.C.S.D.; Basta, P.C. Neurological Impacts of Chronic Methylmercury Exposure in Mundurucu Indigenous Adults: Somatosensory, Motor, and Cognitive Abnormalities. *IJERPH* **2021**, *18*, 10270, doi:10.3390/ijerph181910270.
137. Perini, J.A.; Silva, M.C.; Vasconcellos, A.C.S.D.; Viana, P.V.S.; Lima, M.O.; Jesus, I.M.; Kempton, J.W.; Oliveira, R.A.A.; Hacon, S.S.; Basta, P.C. Genetic Polymorphism of Delta Aminolevulinic Acid Dehydratase (ALAD) Gene and Symptoms of Chronic Mercury Exposure in Mundurucu Indigenous Children within the Brazilian Amazon. *IJERPH* **2021**, *18*, 8746, doi:10.3390/ijerph18168746.
138. Vianna, A.D.S.; Câmara, V.D.M.; Barbosa, M.C.D.M.; Santos, A.D.S.E.; Asmus, C.I.R.F.; Luiz, R.R.; Jesus, I.M.D. Exposição Ao Mercúrio e Anemia Em Crianças e Adolescentes de Seis Comunidades Da Amazônia Brasileira. *Ciênc. saúde coletiva* **2022**, *27*, 1859–1871, doi:10.1590/1413-81232022275.08842021.
139. Silman, A.K.; Chhabria, R.; Hafzalla, G.W.; Giffin, L.; Kucharski, K.; Myers, K.; Culquichicón, C.; Montero, S.; Lescano, A.G.; Vega, C.M.; et al. Impairment in Working Memory and Executive Function Associated with Mercury Exposure in Indigenous Populations in Upper Amazonian Peru. *IJERPH* **2022**, *19*, 10989, doi:10.3390/ijerph191710989.
140. Wyatt, L.; Ortiz, E.; Feingold, B.; Berky, A.; Diringler, S.; Morales, A.; Jurado, E.; Hsu-Kim, H.; Pan, W. Spatial, Temporal, and Dietary Variables Associated with Elevated Mercury Exposure in Peruvian Riverine Communities Upstream and Downstream of Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *IJERPH* **2017**, *14*, 1582, doi:10.3390/ijerph14121582.
141. Weinhouse, C.; Ortiz, E.J.; Berky, A.J.; Bullins, P.; Hare-Grogg, J.; Rogers, L.; Morales, A.-M.; Hsu-Kim, H.; Pan, W.K. Hair Mercury Level Is Associated with Anemia and Micronutrient Status in Children Living Near Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Peruvian Amazon. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* **2017**, *97*, 1886–1897, doi:10.4269/ajtmh.17-0269.
142. Koenigsmark, F.; Weinhouse, C.; Berky, A.; Morales, A.; Ortiz, E.; Pierce, E.; Pan, W.; Hsu-Kim, H. Efficacy of Hair Total Mercury Content as a Biomarker of Methylmercury Exposure to Communities in the Area of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Madre de Dios, Peru. *IJERPH* **2021**, *18*, 13350, doi:10.3390/ijerph182413350.

143. Vasconcellos, A.C.S.D.; Barrocas, P.R.G.; Ruiz, C.M.V.; Mourão, D.D.S.; Hacon, S.D.S. Burden of Mild Mental Retardation Attributed to Prenatal Methylmercury Exposure in Amazon: Local and Regional Estimates. *Ciênc. saúde coletiva* **2018**, *23*, 3535–3545, doi:10.1590/1413-812320182311.15812016.
144. De Paula Fonseca Arrifano, G.; Del Carmen Rodriguez Martin-Doimeadios, R.; Jiménez-Moreno, M.; Augusto-Oliveira, M.; Rogério Souza-Monteiro, J.; Paraense, R.; Rodrigues Machado, C.; Farina, M.; Macchi, B.; Do Nascimento, J.L.M.; et al. Assessing Mercury Intoxication in Isolated/Remote Populations: Increased S100B mRNA in Blood in Exposed Riverine Inhabitants of the Amazon. *NeuroToxicology* **2018**, *68*, 151–158, doi:10.1016/j.neuro.2018.07.018.
145. Cerbino, M.R.; Vieira, J.C.S.; Braga, C.P.; Oliveira, G.; Padilha, I.F.; Silva, T.M.; Zara, L.F.; Silva, N.J.; Padilha, P.M. Metalloproteomics Approach to Analyze Mercury in Breast Milk and Hair Samples of Lactating Women in Communities of the Amazon Basin, Brazil. *Biol Trace Elem Res* **2018**, *181*, 216–226, doi:10.1007/s12011-017-1057-4.
146. Arrifano, G.P.F.; Martín-Doimeadios, R.C.R.; Jiménez-Moreno, M.; Fernández-Trujillo, S.; Augusto-Oliveira, M.; Souza-Monteiro, J.R.; Macchi, B.M.; Alvarez-Leite, J.I.; Do Nascimento, J.L.M.; Amador, M.T.; et al. Genetic Susceptibility to Neurodegeneration in Amazon: Apolipoprotein E Genotyping in Vulnerable Populations Exposed to Mercury. *Front. Genet.* **2018**, *9*, 285, doi:10.3389/fgene.2018.00285.
147. Gonzalez, D.J.X.; Arain, A.; Fernandez, L.E. Mercury Exposure, Risk Factors, and Perceptions among Women of Childbearing Age in an Artisanal Gold Mining Region of the Peruvian Amazon. *Environmental Research* **2019**, *179*, 108786, doi:10.1016/j.envres.2019.108786.
148. Freitas, J.S.; Lacerda, E.M.C.B.; Rodrigues Júnior, D.; Corvelo, T.C.O.; Silveira, L.C.L.; Pinheiro, M.D.C.N.; Souza, G.S. Mercury Exposure of Children Living in Amazonian Villages: Influence of Geographical Location Where They Lived during Prenatal and Postnatal Development. *An. Acad. Bras. Ciênc.* **2019**, *91*, e20180097, doi:10.1590/0001-3765201920180097.
149. Santos-Lima, C.D.; Mourão, D.D.S.; Carvalho, C.F.D.; Souza-Marques, B.; Vega, C.M.; Gonçalves, R.A.; Argollo, N.; Menezes-Filho, J.A.; Abreu, N.; Hacon, S.D.S. Neuropsychological Effects of Mercury Exposure in Children and Adolescents of the Amazon Region, Brazil. *NeuroToxicology* **2020**, *79*, 48–57, doi:10.1016/j.neuro.2020.04.004.
150. Reuben, A.; Frischtak, H.; Berky, A.; Ortiz, E.J.; Morales, A.M.; Hsu-Kim, H.; Pendergast, L.L.; Pan, W.K. Elevated Hair Mercury Levels Are Associated With Neurodevelopmental Deficits in Children Living Near Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Peru. *GeoHealth* **2020**, *4*, e2019GH000222, doi:10.1029/2019GH000222.
151. Watson, L.C.; Hurtado-Gonzales, J.L.; Chin, C.J.; Persaud, J. Survey of Methylmercury Exposures and Risk Factors Among Indigenous Communities in Guyana, South America. *Journal of Health and Pollution* **2020**, *10*, 200604, doi:10.5696/2156-9614-10.26.200604.
152. Lacerda, E.M.D.C.B.; Souza, G.D.S.; Cortes, M.I.T.; Rodrigues, A.R.; Pinheiro, M.C.N.; Silveira, L.C.D.L.; Ventura, D.F. Comparison of Visual Functions of Two Amazonian Populations: Possible Consequences of Different Mercury Exposure. *Front. Neurosci.* **2020**, *13*, 1428, doi:10.3389/fnins.2019.01428.
153. Weinhouse, C.; Gallis, J.A.; Ortiz, E.; Berky, A.J.; Morales, A.M.; Diringer, S.E.; Harrington, J.; Bullins, P.; Rogers, L.; Hare-Grogg, J.; et al. A Population-Based Mercury Exposure Assessment near an Artisanal and Small-Scale Gold Mining Site in the Peruvian Amazon. *J Expo Sci Environ Epidemiol* **2021**, *31*, 126–136, doi:10.1038/s41370-020-0234-2.
154. Bello, T.C.S.; Buralli, R.J.; Cunha, M.P.L.; Dórea, J.G.; Diaz-Quijano, F.A.; Guimaraes, J.R.D.; Marques, R.C. Mercury Exposure in Women of Reproductive Age in Rondônia State, Amazon Region, Brazil. *IJERPH* **2023**, *20*, 5225, doi:10.3390/ijerph20065225.
155. Lopes-Araújo, A.; Arrifano, G.P.; Macchi, B.M.; Augusto-Oliveira, M.; Santos-Sacramento, L.; Rodríguez Martín-Doimeadios, R.C.; Jiménez-Moreno, M.; Martins Filho, A.J.; Alvarez-Leite, J.I.; Oriá, R.B.; et al. Hair Mercury Is Associated with Dyslipidemia and Cardiovascular Risk: An Anthropometric, Biochemical and Genetic Cross-Sectional Study of Amazonian Vulnerable Populations. *Environmental Research* **2023**, *229*, 115971, doi:10.1016/j.envres.2023.115971.
156. Suárez-Criado, L.; Rodríguez-González, P.; Marrugo-Negrete, J.; García Alonso, J.I.; Díez, S. Determination of Methylmercury and Inorganic Mercury in Human Hair Samples of Individuals from Colombian Gold Mining Regions by Double Spiking Isotope Dilution and GC-ICP-MS. *Environmental Research* **2023**, *231*, 115970, doi:10.1016/j.envres.2023.115970.

- 1146 157. Silva, M.C.D.; Oliveira, R.A.A.D.; Vasconcellos, A.C.S.D.; Rebouças, B.H.; Pinto, B.D.; Lima, M.D.O.; Jesus, I.M.D.;  
1147 Machado, D.E.; Hacon, S.S.; Basta, P.C.; et al. Chronic Mercury Exposure and GSTP1 Polymorphism in  
1148 Mundurucu Indigenous from Brazilian Amazon. *Toxics* **2023**, *11*, 138, doi:10.3390/toxics11020138.
- 1149 158. Pignoux, R.; Gourves, P.-Y.; Sow, M.; Maury-Brachet, R. Imprégnation mercurielle des femmes enceintes de  
1150 Guyane (Haut Maroni): étude et prévention. *Toxicologie Analytique et Clinique* **2019**, *31*, 37–48,  
1151 doi:10.1016/j.toxac.2018.12.002.
- 1152 159. Cunha, M.; Marques, R.; Dórea, J. Influence of Maternal Fish Intake on the Anthropometric Indices of Children in  
1153 the Western Amazon. *Nutrients* **2018**, *10*, 1146, doi:10.3390/nu10091146.
- 1154 160. Bastos, W.R.; Vieira, S.M.; Manzatto, Â.G.; Dórea, J.G.; Rubira, M.C.; De Souza, V.F.P.; Da Costa Junior, W.A.;  
1155 Souza Bastos, M.T. Heterogeneity of Multimedia Exposures to Neurotoxic Elements (Al, As, Cd, Pb, Mn, and Hg)  
1156 in Breastfed Infants from Porto Velho, Brazil. *Biol Trace Elem Res* **2018**, *184*, 7–15, doi:10.1007/s12011-017-1165-1.
- 1157 161. Carvalho, L.V.B.; Hacon, S.S.; Vega, C.M.; Vieira, J.A.; Larentis, A.L.; Mattos, R.C.O.C.; Valente, D.; Costa-Amaral,  
1158 I.C.; Mourão, D.S.; Silva, G.P.; et al. Oxidative Stress Levels Induced by Mercury Exposure in Amazon Juvenile  
1159 Populations in Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2019**, *16*,  
1160 doi:10.3390/ijerph16152682.
- 1161 162. Oliveira, A.T. de; Rodrigues, P. de A.; Ramos Filho, A.M.; Gomes, M.F. da S.; Liebl, A.R. da S.; de Pinho, J.V.;  
1162 Aride, P.H.R.; Conte-Junior, C.A. Levels of Total Mercury and Health Risk Assessment of Consuming Freshwater  
1163 Stingrays (Chondrichthyes: Potamotrygoninae) of the Brazilian Amazon. *International Journal of Environmental  
1164 Research and Public Health* **2023**, *20*, 6990.
- 1165 163. Junk, W.J.; Wittmann, F.; Schöngart, J.; Piedade, M.T.F. A Classification of the Major Habitats of Amazonian Black-  
1166 Water River Floodplains and a Comparison with Their White-Water Counterparts. *Wetlands Ecology and  
1167 Management* **2015**, *23*, 677–693, doi:10.1007/s11273-015-9412-8.
- 1168 164. Casagrande, G.C.R.; Dambros, J.; de Andrade, E.A.; Martello, F.; Sobral-Souza, T.; Moreno, M.I.C.; Battirola, L.D.;  
1169 de Andrade, R.L.T. Atmospheric Mercury in Forests: Accumulation Analysis in a Gold Mining Area in the  
1170 Southern Amazon, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment* **2023**, *195*, 477.
- 1171 165. Esteban-López, M.; Arrebola, J.P.; Juliá, M.; Pärt, P.; Soto, E.; Cañas, A.; Pedraza-Díaz, S.; González-Rubio, J.;  
1172 Castaño, A. Selecting the Best Non-Invasive Matrix to Measure Mercury Exposure in Human Biomonitoring  
1173 Surveys. *Environmental Research* **2022**, *204*, 112394.
- 1174 166. Santos Serrão De Castro, N.; De Oliveira Lima, M. Hair as a Biomarker of Long Term Mercury Exposure in  
1175 Brazilian Amazon: A Systematic Review. *IJERPH* **2018**, *15*, 500, doi:10.3390/ijerph15030500.
- 1176 167. Torres, C.; Verschoor, G. Re-Imagining Environmental Governance: Gold Dredge Mining vs Territorial Health in  
1177 the Colombian Amazon. *Geoforum* **2020**, *117*, 124–133, doi:10.1016/j.geoforum.2020.09.013.
- 1178 168. Queiroz, J.; Gasparinetti, P.; Bakker, L.B.; Lobo, F.; Nagel, G. Socioeconomic Cost of Dredge Boat Gold Mining in  
1179 the Tapajós Basin, Eastern Amazon. *Resources Policy* **2022**, *79*, 103102, doi:10.1016/j.resourpol.2022.103102.
- 1180

1181 **Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual  
1182 author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury  
1183 to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

1184