

Panorama de exposição crônica ao Mercúrio na região Oeste do estado do Pará, Brasil

Overview of Chronic Mercury Exposure in Western Pará State, Brazil

Naelka dos Anjos Fernandes Meira¹, Rômulo Jorge Batista Pereira², Marina Vasconcelos Souza², Sabrina do Carmo Vieira Pereira³, Roberta Caldeira Mota³, Luana Cristina Albuquerque Andrade³, Heloísa do Nascimento de Moura Meneses⁴

¹ Universidade Federal do Oeste do Pará, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia – Rede BIONORTE, Santarém, Pará, Brasil

² Universidade Federal do Oeste do Pará, Laboratório de Epidemiologia Molecular, Santarém, Pará, Brasil

³ Universidade Federal do Oeste do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde (PPGSA), Santarém, Pará, Brasil

⁴ Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Saúde Coletiva, Laboratório de Epidemiologia Molecular, Santarém, Pará, Brasil



RESUMO

OBJETIVO: Descrever a prevalência de exposição crônica ao mercúrio em diferentes grupos populacionais da região Oeste do Pará. **MATERIAIS E MÉTODOS:** Pesquisa transversal com 1.901 moradores das áreas urbana e ribeirinhas dos rios Tapajós, Amazonas e Arapiuns, em Santarém, Pará (2015-2025). Foram quantificados níveis de HgT em sangue e aplicados questionários. **RESULTADOS:** A mediana de HgT foi 18,46 µg/L, com percentil 95 de 77,66 µg/L. A prevalência de exposição (≥ 10 µg/L) foi de 75,9%, variando de 37,1% (Arapiuns) a 81,0% (Tapajós). **CONCLUSÃO:** Alta prevalência de exposição crônica ao Hg foi observada, com fatores territoriais, alimentares e sociodemográficos associados. O cenário pode ser agravado pelas mudanças climáticas, reforçando a necessidade de vigilância ambiental e ações de saúde pública.

Palavras-chave: Metilmercúrio; Saúde Pública; Amazônia; Biomonitoramento.

ABSTRACT

OBJECTIVE: To describe the prevalence of chronic mercury exposure among different population groups in the western region of Pará, Brazil. **MATERIALS AND METHODS:** A cross-sectional study was conducted with 1,901 residents from urban and riverside communities along the Tapajós, Amazonas, and Arapiuns rivers in Santarém, Pará (2015-2025). Blood THg levels were quantified, and questionnaires were applied. **RESULTS:** The median THg level was 18.46 µg/L, with a 95th percentile of 77.66 µg/L. The prevalence of exposure (≥ 10 µg/L) was 75.9%, ranging from 37.1% (Arapiuns) to 81.0% (Tapajós). **CONCLUSION:** A high prevalence of chronic Hg exposure was observed, with territorial, dietary, and sociodemographic factors associated. This scenario may be aggravated by climate change, reinforcing the need for environmental surveillance and public health actions.

Keywords: Methylmercury; Public Health; Amazon; Biomonitoring.



INTRODUÇÃO

O mercúrio (Hg) é um elemento químico persistente, sem função biológica conhecida no organismo humano, associado a importantes riscos ambientais e sanitários. A preocupação global com o Hg intensificou-se após o desastre da Baía de Minamata, ocorrido no Japão entre as décadas de 1950 e 1960, marcando o início da conscientização internacional sobre os riscos da exposição ao mercúrio para a saúde pública e ao meio ambiente^{1,2}.

No contexto atual, a Amazônia constitui uma das principais fontes de emissão antrópica de Hg para o ambiente, devido principalmente ao uso intensivo desse metal na mineração de ouro artesanal e em pequena escala (MAPE). Além dessa atividade, queimadas, desmatamento e grandes empreendimentos, como hidrelétricas, também contribuem para o aumento da liberação e da disponibilidade do Hg no ambiente^{3,4}. Na mineração de ouro, o Hg é utilizado para amalgamar o ouro e, ao ser aquecido, libera

Correspondência / Correspondence:

Naelka dos Anjos Fernandes Meira
Universidade Federal do Oeste do Pará, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia – Rede BIONORTE
Santarém, Pará, Brasil
E-mail: naelkafernandes@gmail.com

vapores metálicos que se dispersam na atmosfera, retornando à superfície em sua forma inorgânica por meio das chuvas. Nos solos e corpos d'água, esse Hg inorgânico é metilado por bactérias anaeróbias, originando o metilmercúrio (MeHg), sua forma mais tóxica e bioacumulativa⁵. Essa dinâmica biogeoquímica complexa favorece o transporte e a transformação do Hg, podendo causar alterações nos ecossistemas aquáticos, nos solos e no equilíbrio climático da Amazônia⁶.

Nesse cenário, a contaminação ambiental por fontes antropogênicas na região Amazônica representa uma grave preocupação para a saúde pública⁷. As populações amazônidas podem ser expostas ao Hg por meio de suas diferentes formas químicas⁸. No entanto, a principal via de exposição ocorre por meio do consumo de peixes contaminados com MeHg, o que compromete a segurança alimentar e representa um risco significativo para a saúde, especialmente para comunidades tradicionais ribeirinhas⁹. O MeHg, forma orgânica do Hg, é a mais tóxica, apresentando alta biodisponibilidade e potente efeito neurotóxico, com capacidade de atravessar a barreira hematoencefálica e a placenta, afetando as funções neurológicas e o desenvolvimento fetal.

Considerando a importância nutricional e cultural do consumo de pescado na Amazônia, é fundamental fortalecer as ações de mitigação e prevenção voltadas à redução das atividades que aumentam a liberação de Hg no meio ambiente, especialmente na biota aquática¹⁰. A contaminação dos ecossistemas aquáticos representa uma importante fonte de preocupação, uma vez que contribui para a disseminação do metal ao longo das cadeias alimentares e amplia o risco de exposição crônica ao Hg em populações que dependem do pescado como principal fonte de proteína¹¹.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estabelece como o valor de referência concentrações de até 10 µg/L (microgramas por litro) de Hg no sangue¹². A exposição ao MeHg tem sido associada a problemas de saúde, como déficits motores, alterações cognitivas, distúrbios sensoriais e alterações na percepção do campo visual^{13,14}. Grupos como gestantes e crianças apresentam maior vulnerabilidade aos efeitos tóxicos da exposição ao mercúrio¹³. Os níveis de Hg variam conforme a frequência e a quantidade de alimentos contaminados consumidos, bem como em função da eficiência de eliminação do metal pelo organismo, que pode diferir entre indivíduos em função da idade, estado nutricional e fatores genéticos¹⁵. Além disso, a co-exposição com outros metais e agroquímicos também pode agravar os problemas de saúde decorrentes da exposição mercurial¹⁶.

Sendo assim, considerando a relevância da região Amazônica para o meio ambiente e para a saúde pública, torna-se essencial analisar as implicações da exposição ao Hg diante da intensificação dos eventos climáticos extremos. Compreender de que forma o cenário de exposição mercurial pode ser impactado

ou agravado pela crise climática é fundamental para a formulação de políticas públicas de saúde eficazes. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi descrever a prevalência da exposição crônica ao Hg em diferentes grupos populacionais das áreas urbana e ribeirinha situadas ao longo dos rios Tapajós, Amazonas e Arapiuns, no município de Santarém, região oeste do estado do Pará.

MATERIAIS E MÉTODOS

LOCAL E DESENHO DO ESTUDO

Trata-se de uma pesquisa transversal, quantitativa, analítica e exploratória, realizada no município de Santarém, mesorregião do Baixo Amazonas, Oeste do Pará, Amazônia Brasileira. A mesorregião do Baixo Amazonas corresponde a uma importante região geográfica no norte do Brasil, composta por 13 municípios do estado do Pará, dos quais Santarém se destaca como polo regional devido à sua localização estratégica na confluência dos rios Tapajós e Amazonas. A Bacia do rio Tapajós representa quase 6% do território brasileiro e abriga a Reserva Extrativista (RESEX) Tapajós-Arapiuns, uma importante unidade federal de conservação de uso sustentável no oeste do estado do Pará, Amazônia.

Para este estudo, os dados correspondem à consolidação de informações coletadas ao longo de dez anos (2015–2025), em diferentes campanhas de campo realizadas nas áreas urbana e ribeirinhas dos rios Tapajós, Amazonas e Arapiuns.

O cálculo do tamanho amostral foi realizado para populações infinitas, adotando-se a fórmula $n = Z^2 \times p \times (1-p) / e^2$, com $Z = 1,96$ (nível de confiança de 95%), $p = 0,50$ (prevalência estimada de exposição ao mercúrio) e $e = 0,05$ (erro amostral de 5%). Esse procedimento resultou em um tamanho amostral mínimo de 384 participantes, sendo a amostra final composta por 1.901 indivíduos, o que supera o tamanho mínimo estimado para a precisão descritiva proposta.

Apesar do dimensionamento amostral adequado, a seleção dos participantes ocorreu por amostragem não probabilística por conveniência, em razão de limitações operacionais inerentes ao contexto amazônico, tais como a dispersão geográfica das comunidades, a dependência de transporte fluvial, a sazonalidade dos rios e a necessidade de articulação com as lideranças locais para viabilizar o acesso e a adesão da população. Reconhece-se que esse delineamento não permite generalizações probabilísticas, mas acredita-se que a expressiva diversidade e abrangência territorial da amostra, contemplando quatro diferentes regiões (rios Tapajós, Amazonas, Arapiuns e área urbana de Santarém), atenua parcialmente o viés de seleção e confere relevância ecológica e social aos achados. O recrutamento foi realizado por meio de mobilização comunitária, garantindo-se a participação voluntária e a assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). A pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da

Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), sob o parecer nº 5.964.823 para populações ribeirinhas e urbanas, e para participantes indígenas o Comitê Nacional de Ética em Pesquisa foi aprovado sob o parecer nº 6.661.528. A seleção da amostra ocorreu por conveniência, seguindo os critérios de inclusão e exclusão, através do suporte das lideranças das comunidades para mobilização dos participantes do estudo. Como critérios de inclusão tem-se indivíduos que aceitaram participar de forma voluntária e assinaram o TCLE, além de realizar a doação de material biológico (sangue venoso). Como critérios de exclusão tem-se menores de 18 anos, tabagistas, etilistas, portadoras de doenças agudas e crônicas graves.

COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio de questionário semiestruturado, adaptado do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e da Organização Mundial da Saúde – OMS¹⁷ contendo informações sobre perfil sociodemográfico, hábitos alimentares e condições de saúde. Para o presente estudo, foram extraídas do questionário as seguintes variáveis: local de residência e consumo de pescado (frequência de consumo de peixe, posteriormente dicotomizada em consumo semanal - Sim/Não). O questionário foi submetido a um teste piloto com 10 participantes para avaliar a clareza das perguntas e a adequação da linguagem, sendo posteriormente aplicado por entrevistadores treinados. Reconhece-se como limitação do instrumento a ausência de dados sobre quantidade de peixe ingerida (g/dia), espécies consumidas e peso corporal dos participantes, o que impede a estimativa da dose de MeHg.

COLETA DE SANGUE E QUANTIFICAÇÃO DE MERCÚRIO (HG)

Foram coletados 5 mL de sangue venoso para a análise de mercúrio total (HgT). A quantificação do HgT foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica no equipamento DMA-80evo Direct Mercury Analyzer (Milestone). A precisão dos resultados foi garantida por meio de uma curva de calibração com materiais de referência certificados (CRM) (Seronorm™ Trace Elements Whole Blood, Billingstad, Noruega). O limite de detecção (LOD) do método foi de 0,2 µg/L, e o limite de quantificação (LOQ) foi de 0,6 µg/L. Todas as amostras apresentaram concentrações de HgT acima do LOD, variando de 1,03 a 296,45 µg/L, dessa forma, não houve necessidade de substituição de valores abaixo do LOD. As amostras foram analisadas em duplicata, e a reprodutibilidade foi assegurada por meio de análises de controle de qualidade a cada 10 amostras. O nível de exposição ao Hg foi avaliado segundo os limites de referência para HgT no sangue de até 10 µg/L (OMS) e de até 5,8 µg/L (US-EPA)¹⁸, sendo os participantes com valores iguais ou acima desses limites considerados expostos.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram realizadas com o software Stata (versão 18). Para a descrição das

concentrações de HgT, foram calculadas medidas de tendência central e dispersão: média (M), mediana (Md), desvio-padrão (DP), valores mínimos (Mín) e máximo (Máx), bem como os percentis (p25, p50, p75 e p95). Os intervalos de confiança de 95% (IC95%) para as medianas foram calculados pelo método de bootstrap não paramétrico com 1.000 reamostragens, utilizando o comando bootstrap do Stata com a rotina r(p50) para estimar a distribuição das medianas e os percentis 2,5 e 97,5 como limites do IC95%. As análises descritivas foram conduzidas para a amostra total e estratificadas conforme a região de residência (Tapajós, Amazonas, Arapiuns e Urbana) e o consumo semanal de peixe (Sim/Não).

A prevalência de exposição ao Hg foi estimada com base nos limites de referência estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS: 10 µg/L) e pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA: 5,8 µg/L), sendo os resultados apresentados em percentuais (%) de exposição segundo a região de residência e a frequência de consumo de pescado.

Para verificar diferenças nos níveis de HgT entre as regiões de residência, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste post-hoc de Dunn com correção de Bonferroni para comparações múltiplas entre pares de regiões. O mesmo teste foi utilizado para comparar os níveis de HgT entre os grupos com e sem consumo semanal de peixe. A associação entre a região de residência e a classificação de exposição (exposto/não exposto segundo a OMS) foi avaliada pelo teste Qui-quadrado de Pearson. O nível de significância adotado foi de 5% ($p < 0,05$) para todos os testes estatísticos.

RESULTADOS

Inicialmente, 1.901 participantes foram incluídos no estudo. Para as análises descritivas gerais dos níveis de HgT (Tabelas 1 e 2), considerou-se a amostra total. Para as análises que envolviam a variável "região de residência", 12 participantes (0,6%) foram excluídos por não terem informado essa informação, resultando em $n=1.889$ para as Tabelas 3 e 5. Para as análises de consumo semanal de peixe (Tabelas 4 e 6), 29 participantes (1,5%) não responderam à questão, sendo excluídos dessas análises, resultando em $n=1.872$. As perdas amostrais foram pequenas e distribuídas de forma aleatória, não comprometendo a representatividade das análises.

A partir dos resultados foi possível observar que os níveis de HgT apresentaram ampla variação entre os participantes (1,03 µg/L - 296,45 µg/L). A média de HgT foi de 27,18 µg/L ($\pm 32,51$), superior à mediana (18,46 µg/L), influenciada por níveis elevados de HgT nesta amostra (Tabela 1). O percentil 95 foi de 77,66 µg/L, evidenciando que uma parte da amostra estudada apresenta níveis de HgT muito acima dos valores de referência adotados. Independentemente da agência considerada (OMS ou EPA), a maioria da amostra estudada encontra-se acima dos limites de referência. De acordo com os limites da OMS, 75,5%

dos participantes apresentam níveis de Hg acima de 10 µg/L (Tabela 2).

Em relação à área de residência, os níveis de HgT apresentaram variações entre as diferentes regiões avaliadas (Tabela 3). Nas comunidades situadas ao longo do rio Tapajós, 75% dos participantes apresentaram concentrações iguais ou inferiores a 35,12 µg/L (percentil 75). Além disso, essa região apresentou o maior valor de exposição entre todas as áreas estudadas, com percentil 95 de 87,8 µg/L. Entre os participantes das regiões ribeirinhas do rio Amazonas, o percentil 95 foi de 71,64 µg/L, enquanto na região do rio Arapiuns o percentil 95 correspondeu a 28,27 µg/L. Na área urbana, também foram observadas concentrações elevadas de HgT, com percentil 95 de 80,05 µg/L. Esses resultados evidenciam maior intensidade de exposição nas comunidades do rio Tapajós, seguidas pela área urbana e pelas comunidades do rio Amazonas.

Os níveis de HgT foram descritos em função do consumo semanal de peixe (Tabela 4). Os indivíduos que relataram não consumir peixe semanalmente apresentaram mediana de 12,57 µg/L, com concentrações variando de 1,15 a 126,44 µg/L. Já entre

os participantes que relataram um consumo semanal de peixe, observou-se uma mediana de 19,96 µg/L, com valores variando até 296,45 µg/L. A diferença entre os grupos foi estatisticamente significativa ($\chi^2 = 70,504$; $p = 0,0001$), indicando que os níveis mais elevados de HgT foram encontrados entre os indivíduos com maior frequência de consumo de pescado durante a semana.

Observou-se elevada prevalência de exposição HgT em todas as regiões analisadas, com um gradiente territorial bem definido (Tabela 5). A maior prevalência foi identificada entre os moradores das comunidades ribeirinhas do rio Tapajós (81,0%), seguida pelas comunidades ribeirinhas do rio Amazonas (76,6%), pela área urbana (56,8%) e pelas comunidades ribeirinhas do rio Arapiuns (37,1%).

O consumo semanal de pescado mostrou-se prevalente em todas as regiões avaliadas, sendo mais elevado entre os moradores das comunidades ribeirinhas do rio Tapajós (95%) e do rio Arapiuns (85,5%). Na área urbana (65,3%) e na região ribeirinha do rio Amazonas (65,6%), o consumo semanal também foi expressivo, embora menor quando comparado às demais localidades (Tabela 6).

Tabela 1 – Estatísticas descritivas dos níveis de mercúrio total (HgT) no sangue dos participantes (n=1.901).

Variável	n	Média±DP	Mediana (IC95%)	Mín-Máx	p25%	p75%	p95%
HgT (µg/L)	1.901	27,18±32,51	18,46 (17,93 – 19,00)	1-296,5	10,09	31,3	77,66

Fonte: Autores, 2025.

DP: Desvio-padrão; IC95%: Intervalo de Confiança de 95% para a mediana.

LOD: limite de detecção (0,2 µg/L). Todas as amostras apresentaram concentrações acima do LOD.

Tabela 2 – Prevalência de exposição ao mercúrio total (HgT) segundo os limites de referência da EPA e da OMS (n=1.901).

Referência	Baixa Exposição	Expostos	Total
EPA (5,8 µg/L)	202 (10,6%)	1.699 (89,4%)	1.901
OMS (10 µg/L)	459 (24,1%)	1.442 (75,9%)	1.901

Fonte: Autores, 2025.

EPA - Expostos: 89,4% (IC95%: 87,9% – 90,7%)

OMS - Expostos: 75,9% (IC95%: 73,5% – 77,4%)

Tabela 3 – Estatísticas descritivas dos níveis de mercúrio total (HgT) no sangue ($\mu\text{g/L}$) segundo a região de residência dos participantes ($n = 1.901$).

Região	n	Média (DP)	Mediana (IC95%*)	Mín-Máx	p25%	p75%	p95%	p-valor vs. Tapajós	p-valor vs. Amazonas	p-valor vs. Urbana	p-valor vs. Arapiuns
Tapajós	1007	30,4 (35,1)	21,4 (20,2 – 22,8)	1,1 – 296,5	12,5	35,1	87,8	—	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Amazonas	621	25,6 (29,3)	18,7 (17,5 – 20,2)	1,4 – 271,9	10,3	30,1	71,7	< 0,001	—	0,189	< 0,001
Urbana	199	22,0 (31,3)	11,0 (9,3 – 13,1)	1,7 – 247,1	6,2	23,8	80,1	< 0,001	0,189	—	0,032
Arapiuns	62	10,7 (10,4)	8,5 (7,0 – 10,3)	1,0 – 70,9	4,9	12	28,3	< 0,001	< 0,001	0,032	—
Total	1901	27,3 (32,6)	18,5 (17,9 – 19,0)	1,0 – 296,5	10,1	31,4	77,7	—	—	—	—

Notas:*IC95% = Intervalo de Confiança de 95% para a mediana, calculado por bootstrap (1.000 reamostragens). Teste de Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 1.147,38$, gl = 3, $p < 0,0001$. As comparações múltiplas foram realizadas pelo teste post-hoc de Dunn com correção de Bonferroni (p-valores ajustados apresentados nas colunas). Valores de $p < 0,05$ indicam diferença estatisticamente significativa, com exceção da comparação entre Amazonas e Urbana ($p = 0,189$), que não foi significativa.

Tabela 4 – Níveis de mercúrio total (HgT) no sangue segundo o consumo semanal de peixe ($n=1.901$).

Consome peixe semanalmente	n	Média $\pm$ DP	Mediana (IC95%)	Mín-Máx	p25%	p75%	p95%
Não	254	17,9 $\pm$ 17,7	12,57 (10,9 – 14,9)	1,2-126,4	6,1	22,8	51,6
Sim	1.559	29,3 $\pm$ 34,7	19,96 (19,1 – 20,9)	1-296,5	11,2	33,4	84,7
Total	1.901	27,3 $\pm$ 32,6	18,46 (17,9 – 19,0)	1-296,5	10,1	31,4	77,7

Fonte: Autores, 2025.

DP: Desvio-padrão; IC95%: Intervalo de Confiança de 95% para a mediana.

O teste de Kruskal-Wallis confirmou diferença significativa entre os grupos ($\chi^2 = 70,504$; $p < 0,0001$), indicando que os níveis de HgT são significativamente mais elevados entre os indivíduos que consomem pescado.

Tabela 5 – Prevalência de exposição ao HgT segundo a região de residência, com base no limite de referência da OMS ($10 \mu\text{g/L}$) ($n=1.889$).

Região	Baixa Exposição (n)	Expostos (n)	Total (n)	Prevalência de Exposição (%)	IC95%
Amazonas	145	476	621	76,6%	73,1% – 79,9%
Arapiuns	39	23	62	37,1%	25,6% – 50,0%
Tapajós	191	816	1.007	81,0%	78,4% – 83,4%
Urbana	86	113	199	56,8%	49,7% – 63,6%
Total	461	1.428	1.889	75,6%	73,6% – 77,5%

Fonte: Autores, 2025.

Nota: Os dados regionais excluem 12 participantes sem informação de residência. O teste Qui-quadrado foi calculado com base nesse total.

IC95%: Intervalo de Confiança de 95% calculado pelo método de Wilson.

Nota: Teste Qui-quadrado de Pearson para associação entre região e exposição: $\chi^2 = 111,7$; gl = 3; $p < 0,0001$.

Tabela 6 – Prevalência do consumo semanal de peixe segundo a região de residência dos participantes (n=1.872).

Região	Não consome (n)	Consome (n)	Total (n)	Prevalência de Consumo (%)	IC95%
Amazonas	211	402	613	65,6%	61,8% – 69,2%
Arapuins	9	53	62	85,5%	74,4% – 92,3%
Tapajós	50	951	1.001	95,0%	93,4% – 96,3%
Urbana	68	128	196	65,3%	58,2% – 71,8%
Total	338	1.534	1.872	81,9%	80,0% – 83,6%

Nota: Os totais analisados variam entre as tabelas devido à exclusão de participantes com dados faltantes para as variáveis específicas de cada análise. Para esta tabela, foram excluídos 29 participantes que não informaram o consumo semanal de peixe. Além disso, 12 participantes sem informação sobre a região de residência também foram excluídos das análises comparativas por região (presentes nas Tabelas 3 e 5, mas não incluídos nesta). O total de 1.872 participantes reflete, portanto, a base de dados com informações completas para as variáveis analisadas nesta tabela (região e consumo de peixe). As diferenças nos denominadores entre as tabelas não representam inconsistências, mas sim critérios de exclusão distintos para cada análise.

DISCUSSÃO

A mesorregião do baixo Amazonas, localizada no oeste do estado do Pará, abrange uma extensa área da Amazônia brasileira, caracterizada pela presença de grandes rios, elevada biodiversidade e populações tradicionais. Nessa região, o município de Santarém exerce papel central como polo socioeconômico, situando-se na confluência dos rios Tapajós e Amazonas, além de abrigar importantes afluentes como o rio Arapiuns. Esses rios formam uma complexa rede hidrográfica que sustenta as atividades de pesca, transporte, abastecimento e subsistência das comunidades locais. Essa localização geográfica torna Santarém um local estratégico para estudos sobre contaminação mercurial, uma vez que o ciclo hidrológico e a dinâmica sedimentar desses rios influenciam diretamente a distribuição e a biomagnificação do Hg na região do Baixo Amazonas.

Nesta pesquisa, foram incluídas populações tradicionais residentes na RESEX Tapajós-Arapuins. A subsistência dessas comunidades baseia-se predominantemente no extrativismo, complementado pela agricultura e pela criação de pequenos animais, tendo como princípios a proteção dos modos de vida tradicionais, da cultura local e o uso sustentável dos recursos naturais. Ao longo das margens dos rios Amazonas, Arapiuns e Tapajós, predominam pequenas e médias comunidades, muitas delas centenárias, originadas de aldeias indígenas e formadas por grupos familiares interligados por laços de parentesco, que mantêm forte organização social e vínculos culturais com o território e os recursos naturais^{19,20}.

As populações tradicionais da Amazônia apresentam um perfil diferenciado em relação à quantidade de pescado consumido semanalmente, refletindo a forte dependência alimentar, cultural e econômica desse recurso. O peixe constitui a principal fonte de proteína e o elemento central da dieta regional, sendo consumido com elevada frequência, muitas vezes em todas as refeições do dia. Mesmo diante das mudanças socioeconômicas ocorridas nas últimas décadas, impulsionadas pela implantação de

programas governamentais como o *Bolsa Família* e pela ampliação do acesso a bens e serviços urbanos, o peixe continua sendo o alimento básico e o principal meio de exposição ao MeHg entre as comunidades ribeirinhas. Esse padrão alimentar, aliado à persistência da contaminação ambiental decorrente da atividade garimpeira e de outras fontes antrópicas, mantém essas populações em situação de vulnerabilidade contínua, reforçando a necessidade de ações intersetoriais de vigilância em saúde, segurança alimentar e proteção ambiental voltadas para essas comunidades^{21,22}.

O rio Tapajós está entre as áreas amazônicas intensamente impactadas por garimpo, resultando em grandes impactos para as populações locais, em especial as populações tradicionais que sofrem com a invasão de seus territórios. Uma parcela significativa da mineração de ouro na Amazônia é realizada de forma artesanal e em pequena escala, mediante o uso de Hg^{5,23}. De acordo com o MapBiomias, a área ocupada pelo garimpo na Amazônia, em 2020 alcançou aproximadamente 63.351 hectares. A expansão dessa atividade intensificou-se a partir da década de 2010, impulsionada pelo aumento expressivo do preço do ouro no mercado internacional após a crise financeira global de 2008. Nesse contexto, o garimpo tem provocado graves impactos socioambientais na região, afetando especialmente as populações tradicionais, que enfrentam a invasão de seus territórios, o desmatamento acelerado, a degradação dos recursos hídricos e a contaminação de peixes e outros animais silvestres — principais fontes de alimento dessas comunidades. Além disso, o avanço do garimpo aumenta a incidência de doenças infectocontagiosas e a exposição humana ao Hg, intensificando os riscos à saúde pública e ameaçando a segurança alimentar das populações tradicionais da Amazônia²⁰.

Vários estudos realizados ao longo dos anos²⁴⁻²⁷, confirmam que o consumo de peixe na bacia do rio Tapajós permanece elevado até os dias atuais pela marcante influência da culinária indígena e quilombola na região, que há muitos anos perpassa de geração a geração. Na presente pesquisa,

observou-se uma associação entre o consumo de peixe e a prevalência de exposição ao Hg na maioria das regiões avaliadas. Entretanto, o rio Arapiuns apresentou um comportamento distinto: apesar de o consumo semanal de pescado ser elevado nessa região (85,5%), a prevalência de exposição foi menor (37,1%) quando comparada às demais áreas, como o rio Tapajós (81,0%) e o rio Amazonas (76,6%). Uma possível explicação para esse resultado é o fato de o rio Arapiuns ser um sistema hidrológico menos impactado pelas atividades de mineração. Assim, ainda que o hábito alimentar seja semelhante, a menor contaminação ambiental resulta em níveis mais baixos de bioacumulação de Hg nos peixes e, consequentemente, em menor exposição humana. Esses achados reforçam que a intensidade da contaminação ambiental, e não apenas a frequência do consumo, é um fator determinante na magnitude da exposição mercurial em populações ribeirinhas amazônicas.

Considerando a vulnerabilidade nutricional e a insegurança alimentar decorrentes da exposição mercurial, recomenda-se a adoção de estratégias alimentares que reduzam o risco de exposição ao Hg, sem comprometer a consumo adequada de nutrientes. Sugere-se, portanto, a redução do consumo de espécies de peixes com hábitos piscívoros e carnívoros, que tendem a apresentar maiores concentrações de MeHg, devido à biomagnificação trófica, e o aumento da ingestão de espécies que acumulam menores concentrações do metal. Além disso, recomenda-se o consumo de frutas, legumes e verduras, preferencialmente de origem local e de acordo com a disponibilidade sazonal das comunidades, promovendo uma alimentação mais diversificada e equilibrada. Tais medidas são particularmente importantes para mulheres em idade fértil e crianças, grupos mais vulneráveis aos efeitos neurotóxicos do MeHg, uma vez que há evidências robustas na literatura científica que demonstram o impacto desse contaminante no desenvolvimento fetal e nas funções neurológicas infantis^{13,28-32}.

Os resultados da presente pesquisa corroboram os estudos de Malm³³, Arrifano et al.³⁴, Lino et al.³⁵, e outros autores, que destacam a relação entre as atividades mineradoras, uso de Hg e contaminação dos ecossistemas aquáticos. Essa contaminação exerce impacto direto na cadeia alimentar aquática, reforçando a necessidade de estratégias integradas que aliem segurança alimentar e redução dos riscos tóxicos associados ao consumo de pescado na Amazônia.

A presença de Hg no sangue de todos os participantes da pesquisa, em todas as regiões incluídas no estudo, reafirma a urgência da implementação de estratégias integradas de monitoramento, educação em saúde e políticas públicas que abordem a mitigação do uso de Hg na mineração artesanal e em pequena escala. Nesse contexto, a educação em saúde torna-se uma ferramenta fundamental para capacitar profissionais da educação, saúde e organizações não governamentais no que diz respeito às orientações à população sobre os efeitos do Hg na saúde humana e

quanto à necessidade de variação do cardápio sempre que possível, considerando fatores regionais, culturais, educacionais e socioeconômicos.

O cenário de exposição mercurial descrito para a mesorregião do Baixo Amazonas, e igualmente observado em outras partes da Amazônia brasileira, pode ser agravado pelos efeitos da crise climática global. O aumento da temperatura, a intensificação das secas, a redução do volume dos rios e a maior frequência de queimadas são fatores que podem mobilizar o mercúrio depositado e nos sedimentos, favorecendo sua reemissão para a atmosfera e reentrada nos ecossistemas aquáticos. Além disso, a mudança no regime hidrológico e a perda de cobertura vegetal afetam diretamente a biogeoquímica do Hg, potencializando sua metilação e a consequente bioacumulação na cadeia alimentar³⁶⁻³⁸.

Embora uma das limitações deste estudo tenha sido o foco na relação entre o consumo de pescado e a exposição ao Hg, é importante reconhecer que diversos fatores biológicos, ambientais e sociais também interferem nessa complexa interação entre ambiente e saúde, sendo necessários estudos mais específicos e multidisciplinares para elucidar essas relações. Os resultados apresentados contribuem de forma significativa para o debate sobre a contaminação por mercúrio na Amazônia, ao demonstrar que a exposição humana a esse metal não se restringe às populações ribeirinhas, mas também afeta outros grupos populacionais em razão da ampla dispersão do contaminante no ambiente. Embora o rio Tapajós seja amplamente reconhecido como uma das áreas mais impactadas, os achados reforçam que outros rios amazônicos também sofrem influência de diferentes atividades antrópicas, que favorecem a mobilização e o acúmulo de Hg.

Uma vez introduzido no ambiente, independentemente da fonte, o Hg desencadeia processos de degradação ambiental, intensifica sua circulação e sua bioacumulação ao longo da cadeia alimentar e afeta diferentes grupos populacionais, inclusive aqueles distantes das áreas de mineração. Diante desse cenário, os resultados reforçam a necessidade de estratégias integradas de monitoramento ambiental e biológico, educação em saúde e políticas públicas intersetoriais voltadas à mitigação dos efeitos do Hg sobre o meio ambiente e a saúde das populações amazônicas. Em conjunto, essas evidências ampliam a compreensão da complexidade da contaminação mercurial na Amazônia e oferecem subsídios científicos essenciais para o fortalecimento de políticas públicas mais eficazes e equitativas, voltadas à proteção ambiental, à promoção da saúde coletiva e à redução das desigualdades socioambientais na região.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados evidenciam um cenário preocupante de exposição crônica ao Hg entre os participantes do estudo, com níveis medianos de HgT que superam os valores de referência

internacionais. As diferenças regionais, especialmente as elevadas concentrações observadas nas comunidades do rio Tapajós e na área urbana, confirmam que a exposição ao Hg é um problema generalizado e crítico na região estudada, ultrapassando as fronteiras entre áreas ribeirinhas e urbanas.

Esse cenário torna-se mais crítico diante das mudanças climáticas, que tendem a aumentar a mobilização e a biodisponibilidade do Hg no ambiente amazônico. Os resultados reforçam a necessidade de vigilância ambiental e ações de saúde pública sensíveis ao contexto climático emergente.

Diante desse panorama, este estudo fornece evidências científicas sobre a magnitude e a gravidade da exposição humana ao Hg na mesorregião do Baixo Amazonas, região oeste do Pará. Ao integrar diferentes contextos territoriais (urbanos e ribeirinhos), a pesquisa amplia a compreensão sobre a dimensão intersetorial do problema mercurial, reafirmando a importância de estratégias de vigilância ambiental e epidemiológica contínuas, associadas à participação social e ao fortalecimento das redes locais de pesquisa e educação em saúde. Assim, o estudo contribui para o avanço do debate científico e das políticas públicas sobre o Hg na Amazônia, oferecendo subsídios concretos para ações de mitigação, voltadas à promoção da saúde das populações tradicionais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Secretaria Municipal de Saúde de Santarém/Pará – SEMSA, aos líderes comunitários, a todos os pesquisadores envolvidos na execução dessa

pesquisa e a todos os participantes das comunidades pelo acolhimento e pelo apoio essencial a este estudo.

APOIO FINANCEIRO

Esta pesquisa contou com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), The Nature Conservancy (TNC) Brasil, Ministério da Pesca e Aquicultura (MPA) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver nenhum conflito de interesse.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Naelka dos Anjos Fernandes Meira: Conceitualização, Investigação, Metodologia, Redação – rascunho original, Redação – revisão e edição, Validação, Visualização; Sabrina do Carmo Vieira Pereira: Investigação, Metodologia, Redação – revisão e edição; Rômulo Jorge Batista Pereira: Investigação, Redação – revisão e edição, Visualização; Marina Vasconcelos Souza: Investigação, Redação – revisão e edição, Visualização; Roberta Caldeira Mota: Investigação, Redação – revisão e edição, Visualização; Luana Cristina Albuquerque Andrade: Redação – revisão e edição; Heloísa do Nascimento de Moura Meneses: Análise formal, Aquisição de financiamento, Conceitualização, Coordenação do projeto, Metodologia, Redação – revisão e edição. Todos os autores aprovaram a versão final do manuscrito e são responsáveis por todos os seus aspectos.



REFERÊNCIAS

- 1 Crespo-Lopez ME, Arrifano GP, Augusto-Oliveira M, Macchi BM, Lima RR, Nascimento JLM, et al. Mercury in the Amazon: The danger of a single story. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2023 May;256:114895.
- 2 Basu N, Bastiansz A, Dórea JG, Fujimura M, Horvat M, Shroff E, et al. Our evolved understanding of the human health risks of mercury. *Ambio*. 2023 May;52(5):877-96.
- 3 Crespo-Lopez ME, Augusto-Oliveira M, Lopes-Araújo A, Santos-Sacramento L, Yuki Takeda P, Macchi BM, et al. Mercury: What can we learn from the Amazon? *Environ Int*. 2021 Jan;146:106223.
- 4 Berzas Nevado JJ, Rodríguez Martín-Doimeadios RC, Guzmán Bernardo FJ, Jiménez Moreno M, Herculano AM, Nascimento JLM, et al. Mercury in the Tapajós River basin, Brazilian Amazon: a review. *Environ Int*. 2010 Aug;36(6):593-608.
- 5 Crespo-Lopez ME, Lopes-Araújo A, Basta PC, Soares-Silva I, Souza CBA, Leal-Nazaré CG, et al. Environmental pollution challenges public health surveillance: the case of mercury exposure and intoxication in Brazil. *Lancet Reg Health Am*. 2024 Aug 30;39:100880.
- 6 Sonke JE, Angot H, Zhang Y, Poulain A, Björn E, Scharup A. Global change effects on biogeochemical mercury cycling. *Ambio*. 2023 May;52(5):853-76.
- 7 Martoredjo I, Calvão Santos LB, Vilhena JCE, Rodrigues ABL, Almeida A, Sousa Passos CJ, et al. Trends in Mercury Contamination Distribution among Human and Animal Populations in the Amazon Region. *Toxics*. 2024 Mar 7;12(3):204.
- 8 Maximiano-Alves G, Dantas ELS, Crespo-Lopez ME, Nascimento JLM. A Brazilian Minamata disease? Neurologists must be aware of mercury exposure and intoxication. *Arq Neuropsiquiatr*. 2025 Sep;83(9):s00451811622.

- 9 Hacon SS, Oliveira-da-Costa M, Gama CS, Ferreira R, Basta PC, Schramm A, et al. Mercury Exposure through Fish Consumption in Traditional Communities in the Brazilian Northern Amazon. *Int J Environ Res Public Health*. 2020 Jul 22;17(15):5269.
- 10 Paiva TC, Pestana IA, Miranda LNL, Carvalho GO, Bastos WR, Kasper D. Mercury Scenario in Fish from the Amazon Basin: Exploring the Interplay of Social Groups and Environmental Diversity. *Toxics*. 2025 Jul 10;13(7):580.
- 11 Costa Junior JMF, Silva CIM, Lima AAS, Rodrigues Júnior D, Silveira LCL, Souza GS, et al. Teores de mercúrio em cabelo e consumo de pescado de comunidades ribeirinhas na Amazônia brasileira, região do Tapajós. *Ciênc Saúde Coletiva*. 2018 Mar;23(3):805-12.
- 12 United Nations Environment Programme, World Health Organization. Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure [Internet]. Geneva: UNEP, WHO; 2008 Aug 15 [cited 2025 Oct 1]. Available from: <https://www.who.int/publications/m/item/guidance-for-identifying-populations-at-risk-from-mercury-exposure>.
- 13 Pinheiro MCN, Cardoso FC, Aviz LBN, Freitas Junior JAB, Silva MCF, Silva MT, et al. Mercury Exposure and Health Effects in Indigenous People from the Brazilian Amazon — Literature-Scoping Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2025 Jul 22;22(8):1159.
- 14 Passos CJS, Mergler D. Human mercury exposure and adverse health effects in the Amazon: a review. *Cad Saúde Pública*. 2008;24 Suppl 4:s503-20.
- 15 Santos-Sacramento L, Arrifano GP, Lopes-Araújo A, Augusto-Oliveira M, Albuquerque-Santos R, Takeda PY, et al. Human neurotoxicity of mercury in the Amazon: A scoping review with insights and critical considerations. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2021 Jan 15;208:111686.
- 16 Lucchini RG, Basta PC, Crespo-Lopez ME, Gastañaga MDC, O'Callaghan-Gordo C, Olivero-Verbel J, et al. Mercury Contamination and Co-exposures in the Amazon Basin: At the Center of the Planetary Environmental Crisis. *Ann Glob Health*. 2025 Jul 29;91(1):42.
- 17 World Health Organization. Methylmercury [Internet]. Geneva: WHO, 1990 [cited 2025 Oct 1]. 144 p. (Environmental health criteria, 101). Available from: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/9dda14b7-1b92-4448-a1b8-43b2a3647aec/content>.
- 18 Rice G, Swartout J, Mahaffey K, Schoeny R. Derivation of U.S. EPA's oral Reference Dose (RFD) for methylmercury. *Drug Chem Toxicol*. 2000 Feb 22;23(1):41-54.
- 19 Ministro do Meio Ambiente (BR). Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Plano de uso público da Reserva Extrativista Tapajós Arapiuns [Internet]. Santarém (PA): ICMBio; 2022 [citado 2025 out 4]. 36 p. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/amazonia/lista-de-ucs/resex-tapajos-arapiuns/1_Plano_de_Uso_Publico_RESEX_TA.pdf.
- 20 The Nature Conservancy. Análise das normativas e conhecimento dos ribeirinhos sobre o acesso à água doce, pesca e recursos associados na bacia do rio Tapajós [Internet]. [Local desconhecido]: TNC; 2021 [citado 2025 out 4]. Projeto Águas do Tapajós. Disponível em: <https://www.tnc.org.br/content/dam/tnc/nature/en/documents/brasil/tnc-sumarioribeirinhosatapajos.pdf>.
- 21 Mendes VA, Santos DAS, Farias ES, Carvalho DP, Bastos WR. Prevalence and factors associated with mercury exposure in riverside communities in the Brazilian Western Amazon. *Rev Bras Enferm*. 2020 Nov 16;73 Suppl 5:e20200100.
- 22 Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (BR). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. As comunidades ribeirinhas do baixo Tapajós (PA): infraestrutura, mobilidade, serviços sócio ambientais e conectividade [Internet]. São José dos Campos: INPE; 2016 [citado 2025 out 6]. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/08.02.12.48/doc/thisInformationItemHomePage.html>.
- 23 Gerson JR, Szponar N, Zambrano AA, Bergquist B, Broadbent E, Driscoll CT, et al. Amazon forests capture high levels of atmospheric mercury pollution from artisanal gold mining. *Nat Commun*. 2022 Jan 28;13(1):559.
- 24 Meneses HNM, Oliveira-da-Costa M, Basta PC, Morais CG, Pereira RJB, Souza SMS, et al. Mercury Contamination: A Growing Threat to Riverine and Urban Communities in the Brazilian Amazon. *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Feb 28;19(5):2816.
- 25 Oliveira RB, Silva DM, Franco TSBS, Vasconcelos CRS, Sousa DJA, Sarrazin SLF, et al. 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. *Arh Hig Rada Toksikol*. 2022 Jul 7;73(2):131-42.
- 26 Steckling N, Tobollik M, Plass D, Hornberg C, Ericson B, Fuller R, et al. Global Burden of Disease of Mercury Used in Artisanal Small-Scale Gold Mining. *Ann Glob Health*. 2017 Mar-Apr;83(2):234-47.

- 27 Rocha BC, Scoles R, Puga BP, Blaser A. Tapajós sob o sol: mergulho nas características ecológicas, socioculturais e econômicas da bacia hidrográfica [Internet]. [Local desconhecido]: International Rivers; 2022 fev [citado 2025 set 19]. Disponível em: <https://www.internationalrivers.org/wp-content/uploads/sites/86/2022/02/TAPAJO%CC%81S-SOB-O-SOL.pdf>.
- 28 Ha E, Basu N, Bose-O'Reilly S, Dórea JG, McSorley E, Sakamoto M, et al. Current progress on understanding the impact of mercury on human health. *Environ Res*. 2017 Jan;152:419-33.
- 29 Taylor CM, Emmett PM, Emond AM, Golding J. A review of guidance on fish consumption in pregnancy: is it fit for purpose? *Public Health Nutr*. 2018 Aug;21(11):2149-59.
- 30 Saavedra S, Fernández-Recamales Á, Sayago A, Cervera-Barajas A, González-Domínguez R, Gonzalez-Sanz JD. Impact of dietary mercury intake during pregnancy on the health of neonates and children: a systematic review. *Nutr Rev*. 2022 Jan 10;80(2):317-28.
- 31 Queiroz RAM, Miranda GCN, D'Alessandro WB, Herrera SDSC, Paiva MJM, Mendes SUR, et al. Exposição ao mercúrio e saúde reprodutiva: riscos e prevenção. *Cad Pedagóg*. 2025 Mar 19;22(5):e14874.
- 32 Razzaghi H, Tinker SC, Crider K. Blood mercury concentrations in pregnant and nonpregnant women in the United States: National Health and Nutrition Examination Survey 1999-2006. *Am J Obstet Gynecol*. 2014 Apr;210(4):357.e1-9.
- 33 Malm O. Gold Mining as a Source of Mercury Exposure in the Brazilian Amazon. *Environ Res*. 1998 May;77(2):73-8.
- 34 De Paula Fonseca Arrifano G, Del Carmen Rodriguez Martin-Doimeadios R, Jiménez-Moreno M, Augusto-Oliveira M, Rogério Souza-Monteiro J, Paraense R, et al. Assessing mercury intoxication in isolated/remote populations: Increased S100B mRNA in blood in exposed riverine inhabitants of the Amazon. *Neurotoxicology*. 2018 Sep;68:151-8.
- 35 Lino AS, Kasper D, Guida YS, Thomaz JR, Malm O. Total and methyl mercury distribution in water, sediment, plankton and fish along the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Chemosphere*. 2019 Nov;235:690-700.
- 36 Basta PC, Vasconcellos ACS, Hallwass G, Yokota D, Pinto DODR, Aguiar DS, et al. Risk Assessment of Mercury-Contaminated Fish Consumption in the Brazilian Amazon: An Ecological Study. *Toxics*. 2023 Sep 21;11(9):800.
- 37 Silva Filho EC, Loureiro SMS, Souza Filho CFM, Bertaso JM, organizadores. Impactos socioambientais da mineração sobre povos indígenas e comunidades ribeirinhas na Amazônia [Internet]. Manaus: UEA; 2021 [citado 2025 out 10]. Disponível em: <https://clinchadha.org/assets/img/publis/Impactos%20socioambientais%20da%20minera%C3%A7%C3%A3o%20vol.%201.pdf>.
- 38 Melnikova I, Hajima T, Shiogama H, Hayashi M, Ito A, Nishina K, et al. Amazon dieback beyond the 21st century under high-emission scenarios by Earth System models. *Commun Earth Environ*. 2025;6:670.

Recebido em / Received: 16/9/2025
Aceito em / Accepted: 17/12/2025

Editoria Responsável / Managing Editor:

Eliane Brabo de Sousa

Este artigo compõe a Seção Temática "Saúde e Meio Ambiente na Pan-Amazônia: Ciência, Território e Resistência em tempos de crise climática" em alusão à 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 30).

Como citar este artigo / How to cite this article:

Meira NAF, Pereira RJB, Souza MV, Pereira SCV, Mota RC, Andrade LCA, et al. Panorama de exposição crônica ao Mercúrio na região Oeste do estado do Pará, Brasil. *Rev Pan Amaz Saude*. 2026;17:e202601821. Doi: <https://doi.org/10.5123/S2176-6223202601821>