REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

ASSOCIAÇÃO ENTRE EXPOSIÇÃO AO MERCÚRIO E PARÂMETROS HEMATOLÓGICOS EM POPULAÇÕES DA AMAZÔNIA BRASILEIRA: REVISÃO SISTEMÁTICA

MERCURY EXPOSURE AND HEMATOLOGICAL PARAMETERS IN POPULATIONS OF THE BRAZILIAN AMAZON: A SYSTEMATIC REVIEW

Ciências da Saúde • 05/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/793587377

Thiago Gomes Veloso[1]

Jhonatan Calel de Moura[2]

RESUMO

Esta revisão sistemática teve como objetivo analisar as evidências científicas sobre a associação entre a exposição ao mercúrio e alterações nos parâmetros hematológicos em populações da Amazônia brasileira. A busca bibliográfica abrangeu as bases PubMed, BVS/LILACS e SciELO, com combinações de descritores relacionados ao mercúrio, aos parâmetros hematológicos e à região amazônica. Após a remoção das duplicatas, a triagem dos títulos e resumos e a avaliação dos textos completos, seis estudos atenderam aos critérios de elegibilidade e integraram a síntese. Os resultados apresentaram divergências: alguns estudos identificaram associação entre concentrações elevadas de mercúrio e anemia, principalmente em crianças e adolescentes de comunidades sob influência do garimpo de ouro, enquanto outros apontaram resultados sem significância estatística. Dois estudos associaram o consumo de castanha-do-pará à menor ocorrência de anemia, embora esse achado seja insuficiente para estabelecer um efeito protetor. A exposição ao mercúrio e as alterações hematológicas podem sofrer influência de fatores nutricionais, infecciosos e ambientais. Conclui-se que as evidências disponíveis ainda são limitadas e insuficientes para estabelecer uma relação causal, sendo necessários estudos longitudinais que considerem fatores de confusão e características individuais das populações avaliadas.

Palavras-chave: Mercúrio; Parâmetros hematológicos; Anemia; Amazônia brasileira; Exposição ambiental.

ABSTRACT

This systematic review aimed to analyze the scientific evidence on the association between mercury exposure and changes in hematological parameters among populations in the Brazilian Amazon. The literature search covered the PubMed, BVS/LILACS, and

SciELO databases, using combinations of descriptors related to mercury, hematological parameters, and the Amazon region. After duplicate removal, title and abstract screening, and full-text assessment, six studies met the eligibility criteria and were included in the synthesis. The findings were inconsistent: some studies identified an association between higher mercury concentrations and anemia, particularly among children and adolescents from communities affected by gold mining, whereas others reported results without statistical significance. Two studies linked Brazil nut consumption to a lower occurrence of anemia, although this finding is insufficient to establish a protective effect. Mercury exposure and hematological changes may be influenced by nutritional, infectious, and environmental factors. The available evidence remains limited and insufficient to support causal conclusions, and further longitudinal studies are needed to account for confounding factors and individual characteristics of the populations investigated.
Keywords: Mercury; Hematological parameters; Anemia; Brazilian Amazon; Environmental exposure.

1. INTRODUÇÃO

O mercúrio é um metal pesado que ocorre nas formas metálica, inorgânica e orgânica, sendo o metilmercúrio de maior preocupação devido à sua capacidade de bioacumulação e biomagnificação na cadeia trófica aquática, o que torna o consumo de peixes um importante via de exposição humana (Fonseca *et al.*, 2014; Passos; Mergler, 2008).

O mercúrio está entre as substâncias químicas de maior preocupação para a saúde pública mundial (Hacon *et al.*, 2008) e suas emissões permanecem relevantes em diferentes regiões,

incluindo a América do Sul (UNEP, 2019). Na Amazônia, queimadas, desmatamento, mineração e grandes empreendimentos favorecem a mobilização do metal, enquanto, na Amazônia brasileira, o garimpo de ouro constitui importante fonte antropogênica de exposição (Crespo-Lopez *et al.*, 2021; Basta *et al.*, 2023; Vianna *et al.*, 2024). Nas populações ribeirinhas e indígenas, a exposição ocorre em um cenário marcado por condições de saneamento inadequadas, acesso limitado aos serviços de saúde e ocorrência de doenças infectoparasitárias (Vianna *et al.*, 2022; Vianna *et al.*, 2024).

Embora os efeitos neurológicos sejam os mais conhecidos, o sistema hematopoiético também pode ser afetado. Entretanto, os efeitos hematotóxicos do mercúrio ainda são pouco investigados em seres humanos e os estudos disponíveis apresentam resultados divergentes (Vianna *et al.*, 2022).

Crianças e adolescentes apresentam maior vulnerabilidade aos toxicantes ambientais em razão do desenvolvimento e de diferenças metabólicas em relação aos adultos (Vianna *et al.*, 2024). A ocorrência de anemia nessa população, entretanto, pode estar relacionada a diferentes fatores, como deficiência de ferro, insegurança alimentar, parasitoses, malária e condições inadequadas de saneamento (Kassebaum *et al.*, 2014; WHO, 2011; Vianna *et al.*, 2024). A relação entre mercúrio e parâmetros hematológicos também pode ser influenciada por fatores nutricionais e individuais.

Apesar da relevância da exposição ao mercúrio na Amazônia, ainda são poucos os estudos que investigam diretamente sua associação com alterações hematológicas, quando comparados à extensa literatura sobre seus efeitos neurológicos. Diante dessa lacuna,

definiu-se a seguinte questão norteadora: qual é a associação entre a exposição ao mercúrio e alterações nos parâmetros hematológicos em populações da Amazônia brasileira?

A realização desta revisão sistemática justifica-se pela necessidade de reunir e analisar as evidências disponíveis, ainda dispersas entre diferentes populações e métodos de avaliação da exposição e dos desfechos hematológicos. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar as evidências científicas sobre a associação entre a exposição ao mercúrio e alterações nos parâmetros hematológicos em populações da Amazônia brasileira, buscando identificar as alterações descritas, verificar sua relação com diferentes níveis de exposição e reconhecer os principais fatores que podem interferir nessa associação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Mercúrio: Um Problema Global com Epicentro na Amazônia

O mercúrio ocorre na natureza sob três formas químicas, a metálica, a inorgânica e a orgânica, cada uma delas com toxicocinética própria: a absorção, a distribuição, o metabolismo e a via de eliminação do mercúrio metálico diferem substancialmente daquelas observadas para as formas orgânicas, sendo o metilmercúrio a variante que mais preocupa a saúde pública, por sua capacidade de bioacumulação nos tecidos vivos e de biomagnificação ao longo da cadeia trófica aquática (Fonseca *et al.*, 2014).

Tanto a forma metálica quanto a orgânica são capazes de atravessar barreiras biológicas relevantes, como a barreira hematoencefálica e a placentária, sendo eliminadas principalmente pela urina, no caso

das formas metálica e inorgânica, e pelas fezes, no caso do metilmercúrio. A gravidade dos efeitos tóxicos depende da forma química envolvida, da dose absorvida, da idade do indivíduo exposto, da duração da exposição e da via de absorção predominante, sendo a inalação de vapores de mercúrio metálico, proveniente de amálgamas dentárias e do próprio garimpo, e a dieta, representada sobretudo pelo consumo de peixes contaminados, as duas vias mais estudadas em populações humanas (Vianna *et al.*, 2022).

O mercúrio figura entre as dez substâncias químicas de maior preocupação para a saúde pública mundial, sendo prioridade para os 128 países signatários da Convenção de Minamata, e suas emissões atmosféricas globais cresceram 20% entre 2010 e 2015, tendo a América do Sul, a África Subsaariana e o Sudeste Asiático como principais contribuintes. Cerca de 80% de toda a emissão de mercúrio da América do Sul é originária da Amazônia, região em que a presença do metal é descrita como ubíqua e altamente dinâmica, favorecida por eventos como queimadas, desmatamento, atividades de mineração e a construção de grandes empreendimentos, como usinas hidrelétricas (Crespo-Lopez *et al.*, 2021).

Populações amazônicas apresentam, de forma recorrente, concentrações de mercúrio no cabelo acima de 6 ppm e, segundo a proporção de referência entre ingestão de metilmercúrio, mercúrio no cabelo, no cérebro e no sangue, chegam a consumir de duas a seis vezes as doses de referência reconhecidas internacionalmente, exposição consideravelmente mais alta do que a de outras populações no mundo (Crespo-Lopez *et al.*, 2021).

O garimpo artesanal e de pequena escala é apontado como a principal fonte antropogênica dessa contaminação, respondendo por cerca de 37% das emissões globais do metal para o ar e a água, o equivalente a uma faixa estimada entre 410 e 1.400 toneladas por ano, atividade da qual dependem entre 10 e 19 milhões de pessoas em todo o mundo, incluindo cerca de cinco milhões de mulheres e crianças (Vianna *et al.*, 2024), sendo descrito ainda como a maior fonte de exposição humana ao mercúrio em toda a América Latina (Basta *et al.*, 2023).

Na Amazônia, o garimpo ilegal cresce de forma continuada desde a década de 1980, com consequências ambientais e sanitárias já bem documentadas (Vianna *et al.*, 2024), sobretudo na bacia do Rio Tapajós, considerada a maior área de garimpo de ouro do mundo, com cerca de 100.000 km² historicamente explorados. Nessa região, a atividade chegou a responder por 50% do ouro produzido no Brasil, atingindo o pico de quatro toneladas mensais em 1989; somente entre 1987 e 1994, mais de três mil toneladas de mercúrio foram liberadas na biosfera. A partir de 1995, a oscilação do preço do ouro reduziu progressivamente a produção, de onze toneladas anuais em 1991 para 3,6 toneladas em 2000, mas o passivo ambiental acumulado ao longo de mais de uma década permanece detectável no solo, nos sedimentos e na cadeia alimentar até os dias atuais (Vianna *et al.*, 2022).

Esse passivo se explica pelo ciclo biogeoquímico do próprio metal. O vapor de mercúrio presente na atmosfera é convertido em formas solúveis que se depositam na superfície por meio das chuvas, sofrendo posterior conversão à forma orgânica por mecanismos abióticos ou bióticos; seguem-se então os processos de bioacumulação na cadeia aquática e de biomagnificação ao longo

da cadeia trófica, até atingir seu ápice nos peixes predadores e nos mamíferos que deles se alimentam (Vianna *et al.*, 2022). É por essa via alimentar, e não pela inalação direta, que a maior parte das populações ribeirinhas e indígenas amazônicas acaba se expondo ao metal, uma vez que a inalação de vapor de mercúrio metálico afeta predominantemente garimpeiros e donos de casas de compra de ouro, atividades pouco frequentes entre a população em geral (Vianna *et al.*, 2022).

2.2. Consumo de Peixe, Populações Ribeirinhas e Indígenas: O Paradoxo Nutricional da Exposição Amazônica

O peixe ocupa, nesse cenário, um lugar contraditório. É reconhecido como a principal fonte natural de metilmercúrio para populações humanas e, ao mesmo tempo, como uma importante fonte de ferro e de outros nutrientes essenciais, o que confere ao pescado uma dupla função nutricional e toxicológica difícil de equacionar em termos de recomendação de saúde pública (Fonseca *et al.*, 2014).

Restringir seu consumo comprometeria a segurança alimentar de comunidades inteiras que dependem dele como principal fonte proteica; mantê-lo sem qualquer orientação, por sua vez, perpetua a exposição crônica ao metilmercúrio. Essa ambivalência é particularmente sensível entre as populações ribeirinhas, habitantes de áreas rurais às margens dos rios, espalhadas por todo o território nacional, mas com predomínio na região Norte, que compartilham características sociodemográficas semelhantes, saneamento ambiental inadequado e serviços de saúde insuficientes, condições que se traduzem em elevada prevalência de doenças infectoparasitárias, como a malária e a parasitose intestinal (Vianna *et al.*, 2022).

Estudos conduzidos em diferentes pontos da Amazônia brasileira ilustram a extensão desse problema. No estado de Roraima, a avaliação de 75 espécimes de peixe coletados na bacia do Rio Branco, distribuídos entre quatro níveis tróficos, revelou concentração média de mercúrio de 0,545 µg/g, com valores expressivamente mais altos entre as espécies carnívoras (0,869 µg/g) do que entre as não carnívoras (0,116 µg/g), o que já configura risco à saúde segundo a metodologia da Organização Mundial da Saúde para diferentes cenários de consumo (Vasconcellos *et al.*, 2022).

Entre comunidades indígenas Munduruku do Médio Tapajós, por sua vez, a análise de 88 espécimes de 17 espécies mostrou que a ingestão diária estimada de metilmercúrio superava a dose de referência da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos entre três e vinte e cinco vezes, chegando a onze vezes a recomendação da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação em conjunto com a Organização Mundial da Saúde, evidenciando que o consumo de peixe já não é seguro para essa população (Vasconcellos *et al.*, 2021).

Mesmo fora do contexto rural, um estudo ecológico com 1.010 peixes comercializados em feiras e mercados de seis capitais e onze outras cidades amazônicas constatou que 21,3% das amostras ultrapassavam o limite de segurança de 0,5 µg/g estabelecido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária, com prevalência de contaminação cerca de quatorze vezes maior entre espécies carnívoras, e ingestão diária estimada que chegava a superar em até 31 vezes a dose de referência entre crianças de dois a quatro anos, o que estende o problema também às populações urbanas amazônicas (Basta *et al.*, 2023).

Entre as populações indígenas amazônicas, essa vulnerabilidade assume contornos ainda mais específicos. O Brasil abriga 305 etnias indígenas distintas, das quais 38,2% estão concentradas na região Norte. Comunidades como a dos Munduruku, que residem em relativo isolamento ao redor da bacia central do Rio Tapajós, uma das principais áreas de garimpo de ouro da Amazônia, mantêm economia baseada na monocultura de mandioca, na pesca, na caça, no próprio garimpo e em pequeno comércio de madeira, castanha-do-pará e látex. O peixe constitui sua principal fonte proteica, e, embora a farinha de mandioca e a castanha-do-pará sejam alimentos comuns na dieta, o consumo de vegetais é considerado insuficiente. A maioria dessas comunidades enfrenta saneamento precário e acesso limitado ou inexistente a serviços de saúde, o que resulta em elevada prevalência de desnutrição e de doenças infectoparasitárias, características típicas de regiões subdesenvolvidas com renda média muito baixa (Vianna *et al.*, 2024).

É justamente essa sobreposição entre fonte alimentar e fonte de exposição que sustenta, na literatura, a hipótese do chamado confundimento negativo. Segundo essa hipótese, discutida a partir de estudos sobre exposição intrauterina ao metilmercúrio e desenvolvimento infantil, o mesmo peixe que expõe a mãe e o feto ao mercúrio também fornece ferro e outros micronutrientes essenciais ao neurodesenvolvimento, de modo que a ausência de ajuste estatístico para o estado nutricional materno poderia mascarar, ou até subestimar, o real efeito tóxico do metilmercúrio sobre desfechos cognitivos (Fonseca *et al.*, 2014).

Reforça essa preocupação o fato de que baixas reservas corporais de ferro aumentam a absorção gastrointestinal de outros elementos-traço presentes na dieta, e de que já foi descrita, em populações

humanas, correlação positiva entre o estado de ferro e as concentrações séricas de mercúrio, sugerindo uma possível interação biológica entre os dois elementos que a maioria dos estudos clínicos ainda não incorpora em seus modelos de ajuste (Fonseca *et al.*, 2014). Some-se a isso a imprecisão que costuma acompanhar a avaliação da exposição ao metilmercúrio, apontada como fonte relevante de viés capaz de subestimar significativamente a real toxicidade relacionada à dose em estudos epidemiológicos (Fonseca *et al.*, 2014).

A mensuração dessa exposição costuma recorrer ao mercúrio total no cabelo, biomarcador de exposição ao metal, sobretudo ao metilmercúrio, que corresponde a pelo menos 80% do mercúrio total analisado nesse tecido (Vianna *et al.*, 2022), e cuja coleta pode ser realizada em campanhas de campo em comunidades de difícil acesso (Hofer *et al.*, 2025). Com base nesse biomarcador, a Organização Mundial da Saúde estabelece o valor de referência de 6,0 µg/g para populações consumidoras regulares de peixe (Vianna *et al.*, 2022; Vianna *et al.*, 2024), considerando concentrações iguais ou superiores a 10 µg/g como indicativas de risco aumentado de efeitos neurológicos (Vianna *et al.*, 2024), parâmetros adotados na maior parte dos estudos conduzidos na Amazônia brasileira.

2.3. O Que os Estudos Já Documentaram em Populações Indígenas e Ribeirinhas Amazônicas

Uma revisão de escopo que analisou 15 estudos epidemiológicos publicados entre 1995 e 2024, com amostras que variaram de 31 a 910 participantes, encontrou concentrações de mercúrio no cabelo de populações indígenas da Amazônia brasileira entre 0,8 e 83,89 µg/g, com a maior média registrada entre os Kayabi. Quatro desses

estudos envolveram mães e crianças, quatro associaram a exposição a desfechos clínicos e três investigaram polimorfismos genéticos; entre os efeitos relatados, destacam-se hipertensão arterial, transtornos cognitivos, piores indicadores de saúde mental e alterações neurológicas centrais e periféricas (Pinheiro *et al.*, 2025). Esse panorama é consistente com o observado em investigações mais aprofundadas conduzidas com os próprios Munduruku, cujas aldeias ao longo do Rio Tapajós, como Sawré Muybu, Sawré Aboy e Poxo Muybu, servem de cenário para diferentes frentes de pesquisa desde 2019.

Em um levantamento metodológico e clínico realizado nessas três aldeias, a concentração mediana de mercúrio no cabelo foi de 6,6 µg/g, variando significativamente entre elas, de 5,2 µg/g em Sawré Muybu a 11,5 µg/g em Sawré Aboy, e também entre adultos e crianças; em média, 57,9% da população apresentava exposição acima do limite de referência. Adultos com hipertensão arterial apresentaram prevalência 1,6 vez maior de exposição elevada ao mercúrio, e mulheres em idade fértil hipertensas, 1,9 vez maior, achados compatíveis com estudos anteriores realizados com ribeirinhos do próprio Rio Tapajós (Basta *et al.*, 2021). O mesmo estudo investigou polimorfismos em genes associados à resposta inflamatória e à toxicocinética de metais, como TNF-α, IL6, ALAD, GSTP1, VDR e MMP2, encontrando distribuição genotípica significativamente distinta entre as três aldeias para diversos desses marcadores, o que reforça a hipótese de que populações geneticamente distintas, mesmo vivendo sob exposição ambiental semelhante, possam apresentar diferentes graus de susceptibilidade biológica ao mercúrio (Basta *et al.*, 2021).

Entre mulheres em idade fértil e crianças pequenas dessas mesmas comunidades, um estudo transversal alinhado à iniciativa dos mil dias e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável constatou que 62% das mulheres ultrapassavam o limite de referência de mercúrio no cabelo, com média de 12,67 µg/g na aldeia mais afetada, e que metade das crianças com menos de 24 meses apresentava anemia. A criança com o maior nível de mercúrio registrado no estudo, de apenas 11 meses de idade, apresentava simultaneamente atraso motor grosseiro e anemia, achado citado pelos próprios autores como preocupante evidência da coexistência entre desnutrição e exposição crônica ao metilmercúrio nessa população (Kempton *et al.*, 2021). Um cenário semelhante de exposição, com menor frequência de anemia, foi descrito por Hofer *et al.* (2025) em uma amostra maior de 83 crianças indígenas menores de 12 anos das mesmas três aldeias, das quais 45,1% apresentavam mercúrio no cabelo igual ou superior ao limite de referência de 6,0 µg/g e 13,9% apresentavam anemia, com prevalência de contaminação quase quatro vezes maior entre as crianças de Sawré Aboy, a aldeia mais exposta, do que entre as de Sawré Muybu (razão de prevalência = 3,66; IC95% 2,17-6,18) e quase duas vezes maior entre meninas do que entre meninos (razão de prevalência = 1,67; IC95% 1,07-2,62).

2.4. Da Neurotoxicidade Ao Sangue: Mecanismos e Evidências Sobre o Mercúrio e a Hematopoiese

O cérebro e os rins seguem sendo os órgãos-alvo classicamente reconhecidos da intoxicação mercurial, podendo ocorrer ainda comprometimento pulmonar em casos de exposição aguda a altas concentrações de vapor e lesão da mucosa gastrointestinal diante da ingestão de sais mercuriais. A medula óssea, entretanto, órgão do sistema hematopoiético responsável pela produção das células

sanguíneas, começa a ganhar atenção nessa literatura justamente por sua elevada taxa de proliferação celular e por sua intensa vascularização, características que a tornam, em tese, particularmente vulnerável aos efeitos deletérios de agentes tóxicos (Vianna *et al.*, 2022).

Ainda assim, é interessante notar que, em comparação com outras substâncias, como o chumbo, cuja relação com a anemia já está bem estabelecida na literatura, os efeitos hematotóxicos do mercúrio permanecem pouco explorados, havendo até o momento poucas pesquisas sobre o tema conduzidas especificamente em seres humanos, restritas a uma revisão narrativa e a uma revisão sistemática que apontaram baixa prevalência desses efeitos, além de um número reduzido de estudos transversais, um deles na Amazônia peruana, que relatou associação com anemia, e outros três com correlações divergentes com índices hematimétricos, conduzidos na Amazônia brasileira, na Colômbia Caribenha e no Canadá (Vianna *et al.*, 2022).

Do ponto de vista mecanístico, o mercúrio pode interferir na função de qualquer órgão ao se ligar aos grupos sulfidrilas e selenohidrilas presentes em proteínas celulares, prejudicando o controle da homeostase redox intracelular e outras regulações celulares essenciais à produção e à maturação das células sanguíneas (Vianna *et al.*, 2022). De forma mais ampla, o metal é capaz de induzir estresse oxidativo, dano mitocondrial, peroxidação lipídica, degradação proteica e apoptose celular, mecanismos que, embora descritos principalmente em modelos experimentais, sustentam a plausibilidade biológica de um efeito sobre as células precursoras da linhagem sanguínea (Vianna *et al.*, 2024).

Relatos de hipoplasia da medula óssea, descritos na análise patológica de casos da doença de Minamata, reforçam essa hipótese, assim como propriedades químicas do mercúrio capazes de induzir eriptose por estresse oxidativo, de provocar disfunção da hemoglobina por competição pelo sítio de ligação do ferro e de exacerbar quadros de deficiência de folato e de vitamina B12 por inibição da enzima metionina sintase (Vianna *et al.*, 2022; Vianna *et al.*, 2024).

Some-se a isso o fato de que crianças e adolescentes, população central nos estudos sobre exposição ambiental na Amazônia, ocupam posição de particular vulnerabilidade em razão de suas janelas críticas de exposição a toxicantes. Comparadas aos adultos, apresentam maior potencial de sofrer efeitos adversos à saúde, por ainda estarem em desenvolvimento, por possuírem mecanismos de detoxificação imaturos e por estarem expostas, em função de diferenças de metabolismo e de comportamento alimentar, a níveis proporcionalmente mais elevados de toxicantes do que os adultos (Vianna *et al.*, 2024). Essa vulnerabilidade etária ajuda a explicar por que boa parte da literatura mais recente sobre mercúrio e desfechos hematológicos tem se concentrado justamente em populações infantojuvenis, como demonstram os próprios achados de anemia relatados entre crianças Munduruku menores de dois anos (Kempton *et al.*, 2021) e menores de 12 anos (Hofer *et al.*, 2025).

2.5. Ferro, Selênio, Genética e Chumbo: Fatores Que Modulam o Efeito Hematotóxico do Mercúrio

A anemia, independentemente do mercúrio, já responde por cerca de 8% a 9% da carga global de doenças, sendo a deficiência de ferro sua causa nutricional mais comum, responsável por

aproximadamente metade dos casos em todo o mundo, sobretudo entre crianças. Em países em desenvolvimento, as taxas elevadas de anemia infantil são impulsionadas majoritariamente por fatores socioeconômicos relacionados à insegurança alimentar e por infecções associadas a saneamento precário e à falta de acesso à água potável, entre as quais se destacam a parasitose intestinal e a malária, doenças que impõem pesada carga sobre crianças de populações socialmente vulneráveis, como as comunidades indígenas (Vianna *et al.*, 2024).

A avaliação do estado de ferro nessas populações, contudo, reveste-se de particular complexidade: a ferritina sérica, considerada o biomarcador mais específico das reservas corporais de ferro, comporta-se como uma proteína de fase aguda e pode apresentar-se artificialmente elevada em quadros infecciosos e inflamatórios, mascarando casos reais de deficiência. Por esse motivo, estudos de campo costumam excluir participantes com proteína C reativa elevada, artrite reumatoide autorrelatada, histerectomia ou uso de suplementação de ferro, e parte da literatura chega a recomendar a elevação do ponto de corte da ferritina, de 15 para valores entre 30 e 50 µg/L, de modo a compensar a influência da inflamação sobre sua interpretação em populações com alta carga infecciosa (Fonseca *et al.*, 2014). Causas adicionais de ferritina elevada sem sobrecarga real de ferro incluem doença hepática, doenças inflamatórias crônicas, neoplasias, infecções bacterianas subclínicas, alcoolismo e tireotoxicose, o que reforça a necessidade de cautela na interpretação isolada desse biomarcador (Fonseca *et al.*, 2014).

Nesse conjunto de fatores nutricionais, um nutriente aparece de forma recorrente na literatura como possível fator de proteção contra a toxicidade mercurial: o selênio. Esse elemento atua como

cofator essencial de selenoproteínas envolvidas na regulação do potencial redox celular, entre elas a tiorredoxina redutase e a glutationa peroxidase, ao passo que o mercúrio, ao se ligar justamente ao sítio de selênio dessas proteínas, rompe a homeostase redox intracelular, o que constitui um dos principais mecanismos de sua toxicidade.

O papel protetor do selênio, nesse sentido, é multifacetado, podendo incluir a demetilação do mercúrio orgânico para sua forma inorgânica, menos tóxica, a formação de um complexo mercurial insolúvel e inerte, a redução da absorção gastrointestinal do metal, sua redistribuição para órgãos-alvo menos sensíveis e a reposição das próprias reservas de selênio consumidas nesse processo (Vianna *et al.*, 2024).

A castanha-do-pará é considerada a maior fonte natural desse elemento, sendo as castanhas originárias da Amazônia central aquelas com os maiores níveis de concentração e biodisponibilidade de selênio, o que justifica o uso do consumo dessa oleaginosa como indicador indireto do status de selênio em estudos populacionais amazônicos (Vianna *et al.*, 2022; Vianna *et al.*, 2024).

A susceptibilidade individual à toxicidade do mercúrio também parece ter componente genético. Estudos de interação gene-ambiente têm investigado como polimorfismos em genes da via metabólica da glutationa, sobretudo da família glutationa S-transferase, envolvida tanto na eliminação do mercúrio quanto na detoxificação de radicais livres, podem modificar seus níveis corporais e a resposta antioxidante do organismo. A frequência desses polimorfismos varia consideravelmente entre populações amazônicas, tendo sido relatada ausência do genótipo nulo GSTM1

entre indígenas Munduruku, frente a 37,1% entre ribeirinhos e 55% entre indígenas Kayabi, o que sugere que a mesma exposição ambiental possa resultar em graus distintos de dano biológico conforme o perfil genético de cada população (Vianna *et al.*, 2022). Discute-se, ainda, que a exposição crônica ao mercúrio possa induzir processos epigenéticos de longo prazo, permitindo, ao longo do tempo, a transição de um quadro de susceptibilidade individual para um estado patológico crônico.

Por fim, nenhuma discussão sobre metais pesados na Amazônia estaria completa sem mencionar o chumbo, contaminante que coexiste com o mercúrio em diversas comunidades ribeirinhas, tendo sido encontrado em concentrações elevadas tanto no sangue dessas populações quanto na farinha de mandioca por elas consumida (Vianna *et al.*, 2022), achado atribuído principalmente a fatores geológicos e à composição do solo local, e não ao processo de torrefação com chapas metálicas, hipótese inicialmente aventada mas considerada menos provável (Vianna *et al.*, 2024).

Como o chumbo é classicamente associado à anemia por interferir na cinética do ferro, sua presença concomitante poderia potencializar o risco de anemia em cenários de exposição já elevada ao mercúrio, hipótese ainda pouco explorada de forma combinada nos estudos disponíveis (Vianna *et al.*, 2022; Vianna *et al.*, 2024). É esse conjunto de fatores nutricionais, genéticos, infecciosos e etários, articulados entre si e não isoladamente, que fornece o substrato conceitual necessário para interpretar os achados empíricos reunidos na seção seguinte.

3. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de reunir e analisar evidências científicas sobre a associação entre a exposição ao mercúrio e parâmetros hematológicos em populações da Amazônia brasileira. A revisão foi conduzida de forma sistematizada, contemplando as etapas de identificação dos estudos, remoção de registros duplicados, triagem por título e resumo, avaliação dos textos completos e seleção dos estudos que atenderam aos critérios de elegibilidade previamente estabelecidos.

A revisão foi desenvolvida a partir da definição do tema e da questão de investigação, estabelecimento dos critérios de elegibilidade, definição das bases de dados e das estratégias de busca, seleção e organização dos estudos, extração das informações relevantes, avaliação da qualidade metodológica e análise dos resultados. O processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos foi organizado conforme as recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), conforme Page *et al.* (2021). A definição da questão de investigação e dos critérios de elegibilidade seguiu ainda as orientações metodológicas de Galvão e Pereira (2014), enquanto as etapas de busca e seleção dos estudos nas bases bibliográficas basearam-se nas recomendações de Pereira e Galvão (2014).

As buscas bibliográficas foram realizadas nas bases PubMed, Biblioteca Virtual em Saúde/Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (BVS/LILACS) e Scientific Electronic Library Online (SciELO). Foram utilizadas cinco combinações de descritores: (1) mercury AND hematological parameters AND Amazon; (2) mercury AND (“blood parameters” OR “hematological parameters”) AND Amazon; (3) mercury AND (hemoglobin OR hematocrit) AND Amazon; (4) mercury AND (anemia OR anaemia) AND Amazon; e (5)

(“mercury” OR methylmercury) AND (hemoglobin OR hematocrit OR anemia OR “hematological parameters” OR “blood parameters”) AND (Amazon OR Amazonia OR “Brazilian Amazon”).

Foram considerados elegíveis estudos realizados com seres humanos residentes na Amazônia brasileira, incluindo populações indígenas, ribeirinhas e urbanas. Os estudos deveriam avaliar a exposição ao mercúrio ou ao metilmercúrio, identificada por meio de biomarcadores ou de estimativas relacionadas ao consumo de pescado, e apresentar pelo menos um parâmetro hematológico ou relacionado ao sangue, como hemoglobina, anemia, hematócrito, eritrócitos, leucócitos, plaquetas ou índices hematimétricos.

Foram considerados estudos originais, incluindo estudos observacionais e análises secundárias de estudos transversais, desde que permitissem avaliar a associação entre a exposição ao mercúrio ou metilmercúrio e alterações hematológicas. Hemoglobina e anemia foram consideradas correspondências ao desfecho hematológico, mesmo quando outros parâmetros não estavam presentes.

Foram excluídos estudos experimentais realizados em animais ou peixes; estudos exclusivamente ambientais ou laboratoriais sem avaliação de participantes humanos; revisões, revisões sistemáticas, metanálises, editoriais, cartas, relatos de caso e outros documentos sem dados originais; estudos realizados fora da Amazônia brasileira; pesquisas que avaliassem somente a presença ou concentração de mercúrio sem investigar parâmetros hematológicos; estudos em que sangue ou eritrócitos fossem utilizados apenas como matriz para mensuração da exposição; e estudos que não apresentassem

informações suficientes para estabelecer a relação entre a exposição ao mercúrio ou metilmercúrio e os parâmetros hematológicos.

Após a realização das buscas nas três bases bibliográficas, os registros foram reunidos para identificação e remoção das duplicatas. A deduplicação considerou PMID, DOI, título, autores e equivalência entre registros. Os registros únicos foram submetidos à leitura de títulos e resumos e, na sequência, os estudos potencialmente elegíveis foram avaliados na íntegra, com registro dos motivos de exclusão.

Após a definição dos estudos elegíveis, os artigos selecionados foram organizados para extração e comparação das informações relevantes para a revisão. Foram considerados dados referentes à autoria e ao ano de publicação, características da população estudada, local de realização da pesquisa, tamanho da amostra, forma de avaliação da exposição ao mercúrio ou metilmercúrio, parâmetros hematológicos investigados e principais resultados relacionados à associação entre exposição e alterações hematológicas.

A síntese dos resultados foi realizada de forma descritiva e comparativa, considerando as características metodológicas dos estudos, as populações avaliadas, as formas de exposição ao mercúrio e os parâmetros hematológicos analisados. Em razão do número reduzido de estudos incluídos, os resultados foram organizados de maneira a possibilitar a comparação entre as evidências disponíveis, sem extrapolar os achados para populações ou contextos diferentes daqueles investigados nos estudos selecionados.

A avaliação da qualidade metodológica dos estudos incluídos foi realizada por uma única revisora, utilizando o *checklist* do Joanna Briggs Institute (JBI) para estudos transversais analíticos, composto por oito questões (Moola *et al.*, 2020). Cada estudo foi examinado individualmente, considerando os critérios estabelecidos pelo instrumento para avaliar aspectos relacionados à definição dos critérios de inclusão, à caracterização dos participantes e do cenário, à mensuração da exposição e dos desfechos, à identificação e ao controle dos fatores de confusão e à adequação da análise estatística. As respostas foram classificadas como “sim”, “não” ou “incerto”, conforme as informações disponíveis em cada publicação.

Os resultados foram organizados no Quadro 2, com a apresentação do número de critérios atendidos por estudo. Não foi estabelecido ponto de corte para exclusão com base nessa avaliação, que foi utilizada para identificar aspectos metodológicos relevantes e limitações dos estudos incluídos. Considerando que a avaliação foi realizada por uma única revisora, não houve avaliação independente por um segundo avaliador.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca bibliográfica foi realizada a partir de cinco combinações de termos, definidas de acordo com os principais eixos relacionados à exposição ao mercúrio, aos parâmetros hematológicos e à Amazônia. A distribuição dos registros identificados em cada estratégia de busca e nas respectivas bases de dados encontra-se apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição dos estudos identificados segundo as combinações de descritores e bases de dados

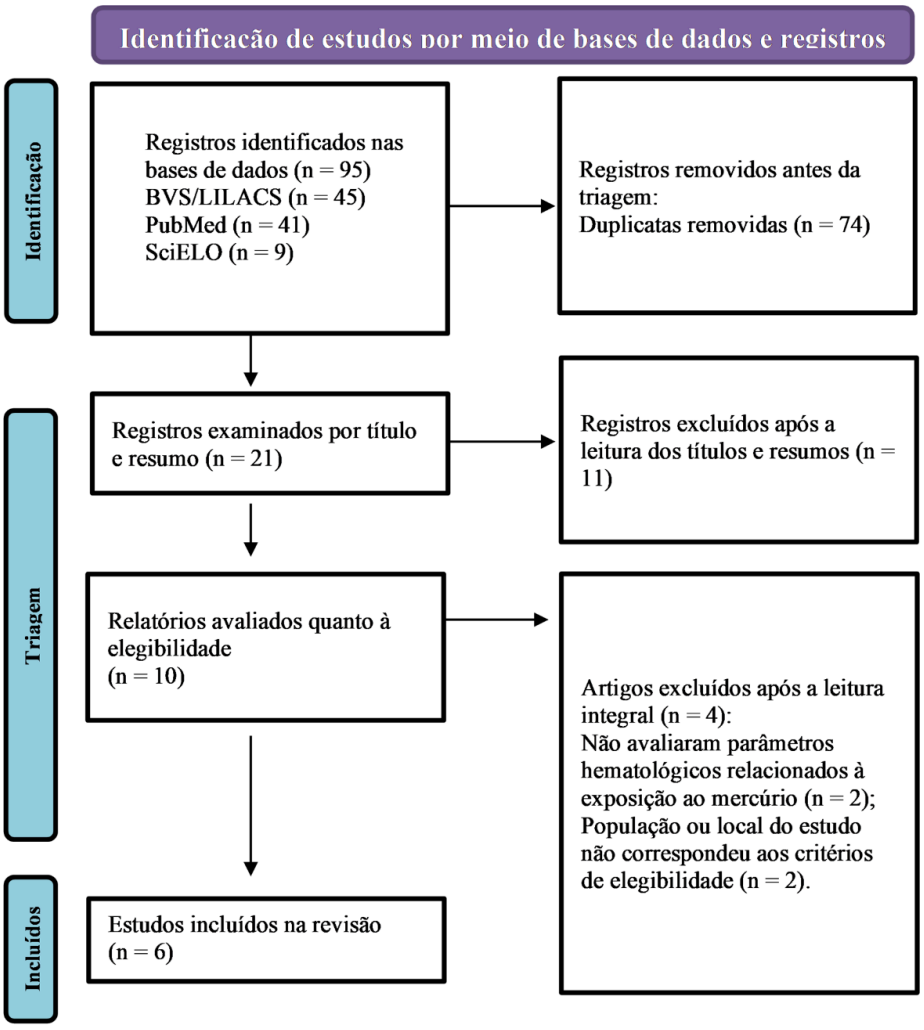
Combinações de descritores	PubMed	BVS/LILACS	SciELO	Total
mercury AND hematological parameters AND Amazon	2	2	0	4
mercury AND ("blood parameters" OR "hematological parameters") AND Amazon	1	1	0	2
mercury AND (hemoglobin OR hematocrit) AND Amazon	12	12	2	26
mercury AND (anemia OR anaemia) AND Amazon	9	11	2	22
(mercury OR methylmercury) AND (hemoglobin OR hematocrit OR anemia OR "hematological parameters" OR "blood parameters") AND (Amazon OR Amazonia OR "Brazilian Amazon")	17	19	5	41
Total	**41**	**45**	**9**	**95**

Fonte: Autoria Própria (2026).

A busca nas três bases de dados, realizada com as cinco combinações de descritores, resultou em 95 registros: 41 na PubMed, 45 na BVS/LILACS e 9 na SciELO (Tabela 1). A distribuição dos registros entre as bases evidencia a contribuição de diferentes fontes bibliográficas para a identificação dos estudos potencialmente relevantes ao tema.

Após a remoção de 74 duplicatas, restaram 21 registros únicos, todos submetidos à triagem por título e resumo. Desses, 11 foram excluídos, e 10 relatórios seguiram para a avaliação do texto completo quanto à elegibilidade. Quatro foram excluídos nessa etapa, dois por não avaliarem parâmetros hematológicos relacionados à exposição ao mercúrio e dois por não corresponderem, quanto à população ou ao local do estudo, aos critérios de elegibilidade, de modo que seis estudos foram incluídos na síntese. Essa seleção permitiu restringir a análise às publicações que atendiam aos critérios previamente definidos, mantendo o foco na relação entre exposição ao mercúrio e parâmetros hematológicos em populações da Amazônia brasileira. O processo de seleção está sintetizado no fluxograma PRISMA (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma PRISMA.



Fonte: Dados da Pesquisa (2026).

Após a aplicação dos critérios de elegibilidade e a conclusão das etapas de seleção, os estudos incluídos foram organizados para análise e síntese descritiva dos resultados. Foram considerados autoria, população, local, delineamento, forma de avaliação da exposição, parâmetros hematológicos e principais resultados. A caracterização dos seis estudos incluídos está apresentada no Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização dos estudos incluídos na revisão sistemática

Autor/Ano	População e método	Principais achados
Fonseca *et al.* (2014)	274 mulheres (12-49 anos), bacia do Rio Madeira, Porto Velho (RO); estudo	Mediana de Hg no cabelo de 3,8 ppm; ausência de associação entre Hg e

	transversal censitário; correlação bivariada, regressão linear, agrupamento hierárquico e análise fatorial.	ferritina, hemoglobina ou ferro sérico; fraca correlação com VCM e HCM; Hg e ferro carregaram componentes distintos.
Vianna *et al.* (2022)	1.318 crianças e adolescentes (0-19 anos), seis comunidades ribeirinhas do Pará (três na região central da bacia do Rio Tapajós e três a jusante da foz); análise secundária transversal; grupo A sob influência do garimpo e grupo B controle; regressão logística uni e multivariada.	Mediana de Hg de 12,8 µg/g no grupo A e 4,3 µg/g no grupo B; associação entre Hg ≥ 6,0 µg/g e anemia no total (aOR = 1,38; IC95% 1,02-1,87) e no grupo A (aOR = 2,23; IC95% 1,28-3,90), sem associação no grupo B; consumo de castanha-do-pará associado a menor chance de anemia (aOR = 0,46; IC95% 0,31-0,67).
Vianna *et al.* (2024)	95 indígenas Munduruku (7-19 anos), comunidade Sai Cinza (PA), área historicamente impactada pelo garimpo; análise secundária transversal; regressão logística ajustada.	Mediana de Hg de 14,6 µg/g, com mínimo de 6,8 µg/g em toda a amostra; 48,4% com anemia; associação de significância limítrofe entre Hg ≥ 10 µg/g e anemia (OR ajustado = 1,22; IC95% 0,99-1,97; referência: 6,0-9,9 µg/g); castanha-do-pará associada a menor chance de anemia (OR = 0,27).
Basta *et al.* (2021)	200 participantes Munduruku de Sawré Muybu, Poxo Muybu e Sawré Aboy (PA); estudo transversal censitário.	Participantes com 12 anos ou mais (n = 115): 6/38 com anemia em <6 µg/g e 17/77 em ≥6 µg/g (p=0,428); hemoglobina média de 13,8 g/dL nos dois grupos.
Hofer *et al.* (2025)	83 crianças Munduruku menores de 12 anos; três aldeias do Tapajós (PA); estudo transversal.	Hg total no cabelo em 82 crianças e anemia em 79 (13,9%; 11/79). No subgrupo de 78 crianças com registro simultâneo de mercúrio e anemia: 6/41 anêmicas no

		grupo <6 µg/g e 4/37 no grupo ≥6 µg/g; p=0,61.
Marques *et al.* (2020)	937 crianças de 1–59 meses em Itapuã e Bom Futuro (RO), com hemoglobina mensurada em 756; estudo transversal.	Hg total no cabelo (marcador de consumo de peixe) e hemoglobina; correlação de Spearman entre Hg e hemoglobina: Itapuã, r=0,2318 (p=0,0005); Bom Futuro, r=0,0663 (p=0,1258).

Fonte: Autoria própria 2026.

A avaliação da qualidade metodológica, sintetizada no Quadro 2, indicou que Fonseca *et al.* (2014) e Vianna *et al.* (2022) atenderam aos oito itens da lista do JBI, ao passo que Vianna *et al.* (2024) e Marques *et al.* (2020) atenderam a seis, Hofer *et al.* (2025) a cinco e Basta *et al.* (2021) a quatro. Todos os estudos têm delineamento transversal e mensuraram o mercúrio total no cabelo em laboratório, biomarcador objetivo de exposição, e quatro deles partiram de censos ou do convite a todos os residentes elegíveis (Fonseca *et al.*, 2014; Basta *et al.*, 2021; Hofer *et al.*, 2025; Marques *et al.*, 2020), o que reduz o risco de viés de seleção. As fragilidades concentraram-se no controle de fatores de confusão e na adequação da análise estatística. Em Basta *et al.* (2021), a identificação dos fatores de confusão foi incerta e não foram descritas estratégias para seu controle; em Hofer *et al.* (2025), o quadro foi semelhante, e o mercúrio foi tratado como desfecho nos modelos multivariados, de modo que a anemia entrou apenas em comparações brutas. Marques *et al.* (2020) identificaram fatores como idade e parasitoses, mas analisaram a relação entre mercúrio e hemoglobina por correlação de Spearman, sem ajuste, e utilizaram o mercúrio capilar como marcador de consumo de peixe, com hemoglobina disponível para 756 das 937 crianças.

Em Vianna *et al.* (2024), os itens relativos à confusão foram atendidos, e a principal limitação foi a incerteza quanto à adequação da análise estatística, somada à menor precisão das estimativas, decorrente da amostra reduzida, dos intervalos de confiança amplos e da ausência de grupo não exposto. Quanto a Basta *et al.* (2021), os pontos de corte de hemoglobina divergiram em parte dos critérios da Organização Mundial da Saúde, o que também torna incerta a classificação da anemia. Esses aspectos justificam a interpretação cautelosa dos achados, sobretudo quanto à inferência causal.

Quadro 2. Avaliação da qualidade metodológica dos estudos incluídos, segundo a lista de verificação do JBI para estudos transversais analíticos

Estudo	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Fonseca *et al.* (2014)	S	S	S	S	S
Vianna *et al.* (2022)	S	S	S	S	S
Vianna *et al.* (2024)	I	S	S	S	S
Basta *et al.*	S	S	S	I	I

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/associacao-entre-exposicao-ao-mercurio-e-parametros-hematologicos-em-populacoes-da-amazonia-brasileira-revisao-sistematica?noblockage

Fonte: Autoria própria 2026, com base em Moola *et al.* (2020).

Legenda: S = sim; N = não; I = incerto. Q1 = critérios de inclusão da amostra claramente definidos; Q2 = participantes e cenário descritos

em detalhe; Q3 = exposição mensurada de forma válida e confiável; Q4 = critérios objetivos e padronizados para a mensuração da condição; Q5 = fatores de confusão identificados; Q6 = estratégias para lidar com os fatores de confusão descritas; Q7 = desfechos mensurados de forma válida e confiável; Q8 = análise estatística apropriada.

Ao comparar os seis estudos incluídos, observa-se um gradiente de exposição ao mercúrio relacionado à proximidade das populações avaliadas em relação às atividades de garimpo de ouro e ao padrão de consumo de peixe. Fonseca *et al.* (2014), ao avaliarem mulheres de 12 a 49 anos da bacia do Rio Madeira, encontraram mediana de mercúrio no cabelo de 3,8 ppm, inferior ao limite de referência de 6,0 µg/g da Organização Mundial da Saúde, embora o percentil 95 tenha alcançado 17,6 ppm. Vianna *et al.* (2022) verificaram mediana de 12,8 µg/g entre crianças e adolescentes sob influência do garimpo no Rio Tapajós, contra 4,3 µg/g no grupo controle, com 78,4% do grupo exposto acima do limite de referência, ante apenas 29,0% no controle. Entre as comunidades indígenas Munduruku do médio Tapajós, tanto Basta *et al.* (2021) quanto Hofer *et al.* (2025) identificaram gradiente semelhante entre as aldeias, com a maior prevalência de participantes com mercúrio igual ou superior a 6,0 µg/g em Sawré Aboy (87,5% em Basta *et al.* e 80,0% em Hofer *et al.*) e a menor em Sawré Muybu (42,9% e 30,8%, respectivamente).

Já Marques *et al.* (2020), ao compararem crianças de famílias tradicionais e de famílias de garimpeiros de estanho em Rondônia, encontraram um padrão inverso ao esperado: as crianças de famílias tradicionais, mais dependentes da pesca, apresentaram mercúrio no cabelo quase duas vezes maior, em média 4,3 µg/g, do que as de famílias de garimpeiros de estanho, em média 2,3 µg/g, o que os

autores atribuíram à maior frequência de consumo de peixe entre as famílias ribeirinhas tradicionais, independentemente da atividade de mineração exercida pela família.

O cenário de exposição mais elevado foi descrito por Vianna *et al.* (2024) na comunidade indígena Munduruku de Sai Cinza, situada em área historicamente afetada pela extração de ouro no médio Rio Tapajós. Nessa população, todos os 95 participantes apresentaram concentrações de mercúrio no cabelo acima do limite de referência, com mediana de 14,6 µg/g e valor mínimo de 6,8 µg/g; isto é, até o participante menos exposto da amostra superava o limite adotado pela literatura internacional.

Fonseca *et al.* (2014) e Vianna *et al.* (2022) atribuíram a exposição sobretudo ao consumo regular de peixe contaminado, e Vianna *et al.* (2024) apontaram essa mesma via como a provável fonte principal em Sai Cinza, em razão da presença prolongada do garimpo nas proximidades, tendo em vista que os dados provêm de levantamento realizado em 1995, período de grande impacto ambiental dessa atividade.

Quanto à associação entre mercúrio e alterações hematológicas, os seis estudos não convergem integralmente, divergência que pode estar relacionada à faixa etária das populações avaliadas, à intensidade e ao tempo de exposição e aos desfechos hematológicos analisados. Três estudos não identificaram associação estatisticamente significativa entre mercúrio e hematologia: Fonseca *et al.* (2014) não encontraram relação entre o mercúrio no cabelo e nenhum dos biomarcadores de ferro ou de hemoglobina em mulheres em idade fértil (12 a 49 anos); Basta *et al.* (2021) não observaram diferença significativa na prevalência de

anemia entre participantes Munduruku com 12 anos ou mais, com mercúrio abaixo ou acima de 6,0 µg/g, com 6 dos 38 menos expostos e 17 dos 77 mais expostos apresentando anemia (p=0,428) e hemoglobina média idêntica nos dois grupos (13,8 g/dL); e Hofer *et al.* (2025), nas mesmas comunidades, tampouco encontraram associação entre as duas variáveis nas crianças: das 83 crianças avaliadas, 79 tinham registro de anemia, com prevalência geral de 13,9% (11/79); no subgrupo de 78 crianças com mercúrio e anemia registrados simultaneamente, 6 das 41 crianças menos expostas e 4 das 37 mais expostas apresentavam anemia (p=0,61), sem diferença entre os grupos.

Em contrapartida, três estudos relataram alguma associação entre mercúrio e desfechos hematológicos. Vianna *et al.* (2022) observaram associação significativa entre concentrações de mercúrio iguais ou superiores a 6,0 µg/g e anemia na amostra total (OR ajustado = 1,38; IC95% 1,02-1,87), associação mais expressiva no grupo sob influência do garimpo (OR ajustado = 2,23; IC95% 1,28-3,90) e ausente no grupo controle (OR ajustado = 1,10; IC95% 0,74-1,64).

As tabelas de regressão do estudo informam n = 348, valor que corresponde ao número de casos de anemia. Vianna *et al.* (2024), com amostra menor e níveis de mercúrio mais elevados, encontraram associação de significância limítrofe entre mercúrio igual ou superior a 10 µg/g e anemia (OR ajustado = 1,22; IC95% 0,99-1,97), tomando-se como referência a faixa de 6,0 a 9,9 µg/g, uma vez que todos os participantes apresentavam mercúrio acima de 6,0 µg/g. Já Marques *et al.* (2020) encontraram correlação positiva (Spearman) entre o mercúrio no cabelo, empregado como marcador do consumo de peixe, e a concentração de hemoglobina entre

crianças de famílias tradicionais (r=0,2318; p=0,0005), no sentido oposto ao esperado, isto é, quanto maior o mercúrio, maior a hemoglobina; essa correlação não se confirmou entre crianças de famílias de garimpeiros de estanho (r=0,0663; p=0,1258). Os próprios autores relacionam esse achado ao papel duplo do peixe discutido no referencial teórico deste artigo: como fonte simultânea de mercúrio e de ferro, seu consumo mais frequente pode elevar a hemoglobina ao mesmo tempo em que eleva a exposição ao metal, o que é compatível com a hipótese de confundimento negativo levantada por Fonseca *et al.* (2014).

A faixa etária das populações avaliadas parece constituir outro fator relevante para essa divergência de achados: enquanto Fonseca *et al.* (2014) e parte da amostra de Basta *et al.* (2021) trabalharam sobretudo com adultos (mulheres de 12 a 49 anos e indivíduos de 12 anos ou mais, respectivamente), nos quais os mecanismos de detoxificação, em tese, já estão plenamente desenvolvidos, os demais estudos avaliaram predominantemente crianças e adolescentes, população reconhecidamente mais vulnerável, em razão das janelas críticas de exposição e da possível imaturidade desses mecanismos.

Some-se a isso a heterogeneidade dos critérios utilizados para definir anemia entre os estudos: Basta *et al.* (2021) adotaram pontos de corte de hemoglobina ajustados por idade e sexo, e Hofer *et al.* (2025), por faixa etária, ao passo que Vianna *et al.* (2022) e Vianna *et al.* (2024) empregaram valores de referência por sexo e idade, os de Vianna *et al.* (2024) baseados nos parâmetros da Organização Mundial da Saúde. Marques *et al.* (2020), por sua vez, adotaram a classificação internacional de gravidade da anemia para crianças de 0 a 59 meses (hemoglobina inferior a 11 g/dL) e analisaram também

a hemoglobina como variável contínua. Essa falta de padronização dificulta a comparação direta entre os achados e deve ser considerada na leitura conjunta dos resultados.

Entre os estudos conduzidos com crianças e adolescentes sob exposição mais intensa, observou-se ainda associação entre o consumo de castanha-do-pará e menor ocorrência de anemia, descrita por Vianna *et al.* (2022) (OR ajustado = 0,46; IC95% 0,31-0,67) e por Vianna *et al.* (2024) (OR ajustado = 0,27; IC95% 0,04-0,98, intervalo amplo). Os autores aventaram que o elevado teor de selênio da castanha poderia contribuir para esse resultado, elemento que atua como cofator de selenoproteínas antioxidantes e que pode competir com o mercúrio por sítios de ligação celular. Trata-se, porém, de uma hipótese. Ambos os estudos são transversais, o que impede estabelecer precedência temporal, e o consumo de castanha pode funcionar como marcador de melhores condições alimentares e socioeconômicas, de modo que os dados disponíveis não autorizam afirmar um efeito protetor nem a mediação pelo selênio. A questão permanece em aberto e demanda estudos longitudinais ou de intervenção, com dosagem do estado de selênio dos participantes.

A interpretação dessas associações exige considerar, ainda, que a anemia nas populações amazônicas tem etiologia multifatorial e não pode ser atribuída exclusivamente ao mercúrio. Parasitoses intestinais e malária, frequentes em comunidades com saneamento precário e acesso restrito aos serviços de saúde, reduzem a hemoglobina por perda sanguínea, hemólise ou inflamação crônica, enquanto a deficiência de ferro e o estado nutricional figuram entre as principais causas de anemia em crianças e mulheres em idade fértil (Kassebaum *et al.*, 2014; WHO, 2011).

Em Vianna *et al.* (2022), sexo, faixa etária e consumo de pescado associaram-se à anemia na amostra total, a malária no grupo sob influência do garimpo e a parasitose intestinal no grupo controle; em Vianna *et al.* (2024), consumo de castanha-do-pará, malária e faixa etária associaram-se à anemia, além do mercúrio, na análise bivariada, o que ilustra o peso desses determinantes. O consumo de pescado acrescenta outra camada de complexidade, pois o alimento que veicula o metilmercúrio fornece também ferro e outros nutrientes, o que pode atenuar ou inverter o sentido da associação, como sugerem os achados de Marques *et al.* (2020) e a hipótese de confundimento negativo levantada por Fonseca *et al.* (2014). Soma-se a isso a possível coexposição a outros metais, sobretudo o chumbo, classicamente associado à anemia por interferir na cinética do ferro (Vianna *et al.*, 2022; Vianna *et al.*, 2024), cuja dosagem não foi contemplada na maioria dos estudos. Mesmo em análises multivariadas, a mensuração incompleta ou imprecisa dessas variáveis favorece a confusão residual, de modo que parte da associação observada entre mercúrio e anemia pode refletir condições concomitantes de vulnerabilidade, e não efeito do metal. Sem ajuste simultâneo para esse conjunto de fatores, os resultados sintetizados devem ser lidos como indício de associação, e não de causalidade.

Os seis estudos compartilham limitações metodológicas relevantes, a começar pelo delineamento transversal, que impede o estabelecimento de relação temporal e, por conseguinte, de causalidade entre a exposição ao mercúrio e as alterações hematológicas identificadas. A maior parte das pesquisas não foi originalmente desenhada com esse objetivo específico, o que resultou em lacunas como a ausência de classificação morfológica da anemia e a escassa investigação de outros metais pesados,

sobretudo o chumbo. O número reduzido de estudos, refletido nos apenas seis trabalhos que atenderam aos critérios de elegibilidade desta revisão, restringe a generalização dos achados, e a investigação de polimorfismos genéticos relacionados à via metabólica da glutationa, mencionada por Vianna *et al.* (2022) como possível determinante da suscetibilidade individual ao mercúrio, permanece como lacuna a ser explorada em estudos longitudinais futuros.

As publicações de Basta *et al.* (2021) e Hofer *et al.* (2025), assim como o estudo de Kempton *et al.* (2021) mencionado no referencial teórico, podem compartilhar participantes das mesmas comunidades Munduruku do Tapajós, avaliadas em períodos próximos. Por esse motivo, os dois estudos incluídos foram mantidos como publicações distintas nesta síntese, mas seus resultados não devem ser interpretados como estimativas independentes de uma mesma população, limitação que deverá ser considerada em eventual metanálise futura. A ausência de significância estatística nesses dois estudos não constituiu critério de exclusão, e a correlação inversa ao esperado observada por Marques *et al.* (2020) foi igualmente preservada, com as ressalvas metodológicas já discutidas, a fim de não superestimar a força da associação entre mercúrio e alterações hematológicas nessas populações.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A associação entre a exposição ao mercúrio e as alterações hematológicas em populações da Amazônia brasileira não é uniforme e varia conforme a intensidade e a duração da exposição, a faixa etária e a presença de fatores dietéticos e infecciosos concomitantes. Os objetivos propostos são atingidos: a revisão

identifica as alterações descritas, relaciona-as a diferentes níveis de exposição e reconhece os principais fatores que interferem nessa associação. As evidências, provenientes de seis estudos transversais, são escassas e insuficientes para conclusões definitivas sobre a natureza causal da relação.

O consumo de castanha-do-pará associa-se à menor ocorrência de anemia em dois estudos, o que torna plausível, como hipótese, a participação do selênio na modulação dos efeitos do mercúrio. Por derivar de delineamentos transversais, esse achado requer confirmação em estudos longitudinais ou de intervenção e não fundamenta, isoladamente, orientações nutricionais.

A heterogeneidade e o número reduzido de estudos, o delineamento transversal e a possibilidade de confusão residual limitam as conclusões. Recomendam-se estudos longitudinais que controlem outros contaminantes ambientais, como o chumbo, e determinantes da anemia, como parasitoses, malária, estado nutricional e deficiência de ferro, e que investiguem determinantes genéticos de suscetibilidade individual. Os achados podem subsidiar profissionais de saúde e gestores públicos na priorização de estratégias de vigilância epidemiológica voltadas às comunidades ribeirinhas e indígenas mais expostas e estimular novas pesquisas que preencham as lacunas identificadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTA, Paulo Cesar *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, v. 18, n. 17, p. 9222, 2021. DOI: 10.3390/ijerph18179222.

BASTA, Paulo Cesar *et al.* Risk Assessment of Mercury-Contaminated Fish Consumption in the Brazilian Amazon: An Ecological Study. **Toxics,** v. 11, p. 800, 2023.

CRESPO-LOPEZ, Maria Elena *et al.* Mercury: What can we learn from the Amazon? **Environment International,** v. 146, p. 106223, 2021.

FONSECA, Márlon de Freitas *et al.* Iron status as a covariate in methylmercury-associated neurotoxicity risk. **Chemosphere,** v. 100, p. 89-96, 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.12.053.

GALVÃO, Taís Freire; PEREIRA, Maurício Gomes. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde,** v. 23, n. 1, p. 183-184, 2014.

HACON, Sandra *et al.* An overview of mercury contamination research in the Amazon basin with an emphasis on Brazil. **Cadernos de Saúde Pública,** v. 24, n. 7, p. 1479-1492, 2008.

HOFER, Cristina Barroso *et al.* Munduruku Indigenous children: health situation in an area with high mercury exposure. **Revista de Saúde Pública,** v. 59, p. e19, 2025. DOI: 10.11606/s1518-8787.2025059006403.

KASSEBAUM, Nicholas J. *et al.* A systematic analysis of global anemia burden from 1990 to 2010. **Blood,** v. 123, n. 5, p. 615-624, 2014.

KEMPTON, Joseph William *et al.* An Assessment of Health Outcomes and Methylmercury Exposure in Munduruku Indigenous Women of

Childbearing Age and Their Children under 2 Years Old. **International Journal of Environmental Research and Public Health,** v. 18, p. 10091, 2021.

MARQUES, Rejane C. *et al.* Intestinal Parasites, Anemia and Nutritional Status in Young Children from Transitioning Western Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health,** v. 17, n. 2, p. 577, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17020577.

MOOLA, Sandeep *et al.* Chapter 7: Systematic reviews of etiology and risk. In: AROMATARIS, Edoardo; MUNN, Zachary (ed.). **JBI Manual for Evidence Synthesis.** Adelaide: Joanna Briggs Institute, 2020. DOI: 10.46658/JBIMES-20-08.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ,** v. 372, p. n71, 2021.

PASSOS, Carlos J. S.; MERGLER, Donna. Human mercury exposure and adverse health effects in the Amazon: a review. **Cadernos de Saúde Pública,** v. 24, supl. 4, p. S503-S520, 2008.

PEREIRA, Maurício Gomes; GALVÃO, Taís Freire. Etapas de busca e seleção de artigos em revisões sistemáticas da literatura. **Epidemiologia e Serviços de Saúde,** v. 23, n. 2, p. 369-371, 2014.

PINHEIRO, Maria da Conceição Nascimento *et al.* Mercury Exposure and Health Effects in Indigenous People from the Brazilian Amazon: Literature-Scoping Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health,** v. 22, p. 1159, 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global Mercury Assessment 2018.** Geneva: UNEP, 2019.

VASCONCELLOS, Ana Claudia Santiago de *et al.* Health Risk Assessment Attributed to Consumption of Fish Contaminated with Mercury in the Rio Branco Basin, Roraima, Amazon, Brazil. **Toxics,** v. 10, p. 516, 2022.

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,** v. 18, p. 7940, 2021.

VIANNA, Angélica dos Santos *et al.* Anemia in Indigenous youth from an Amazonian community in Brazil exposed to mercury during a major environmental impact from gold mining activities. **Cadernos Saúde Coletiva,** v. 32, n. 4, p. e32040101, 2024. DOI: 10.1590/1414-462X202432040101.

VIANNA, Angélica dos Santos *et al.* Exposição ao mercúrio e anemia em crianças e adolescentes de seis comunidades da Amazônia Brasileira. **Ciência & Saúde Coletiva,** v. 27, n. 5, p. 1859-1871, 2022. DOI: 10.1590/1413-81232022275.08842021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Haemoglobin concentrations for the diagnosis of anaemia and assessment of severity.** Vitamin and Mineral Nutrition Information System. Geneva: WHO, 2011.

---

[1] Graduando em Biomedicina da Faculdade da Amazônia – UNAMA. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6040-640X. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[2] Bacharel em Farmácia-Bioquímica, habilitação em Toxicologia. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.