
MUDANÇAS AMBIENTAIS E SEGURANÇA ALIMENTAR NA AMAZÔNIA: EVIDÊNCIAS A PARTIR DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

Environmental Changes and Food Security In The Amazon: Evidence from Aquatic Ecosystems

Adalberto Luis Val*¹ & Fernando Almeida-Val²

¹ ALV - ORCID: 0000-0002-3823-3868, e-mail dalval.inpa@gmail.com, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus/AM;

² FAV - ORCID: 0000-0001-9995-0249, e-mail: ffaival@gmail.com, Fundação de Medicina Tropical Dr. Heitor Vieira Dourado, Manaus/AM.

Destaques

• Mudanças climáticas ameaçam a segurança alimentar na Amazônia. • Poluição por mercúrio e microplásticos comprometem o pescado. • Biodiversidade aquática sustenta nutrição e identidade cultural. • Eventos extremos reduzem estoques e ampliam vulnerabilidades. • Integração entre ciência, políticas e saberes fortalece a resiliência.

RESUMO

A Bacia Amazônica abriga o maior sistema de água doce do planeta e sustenta uma extraordinária diversidade de peixes que constitui a principal fonte de proteína e micronutrientes

para milhões de pessoas. Em comunidades indígenas e ribeirinhas, o consumo de pescado pode ultrapassar 160 kg per capita por ano, evidenciando a profunda dependência nutricional e cultural dos ecossistemas aquáticos. Esta revisão narrativa sintetiza evidências recentes sobre como mudanças ambientais, especialmente mudanças climáticas e poluição, estão afetando a ictiofauna amazônica e, consequentemente, a segurança alimentar regional. Alterações hidrológicas, aumento da temperatura da água e eventos extremos de seca e cheia comprometem a fisiologia, a reprodução, o crescimento e a disponibilidade de biomassa dos peixes. Paralelamente, contaminantes como mercúrio, associado princi-

* Correspondência: Instituto Nacional de Pesquisas na Amazônia (INPA) - Av. André Araújo, 2936 – Manaus (AM).
E-mail: dalval.inpa@gmail.com

Recebido em: 15/09/2025 - Aceito para publicação em: 26/02/2026

Revisores:

Acadêmicos Marcelo Marcos Morales & Paulo Nascimento Saldiva



palmente ao garimpo ilegal de ouro, e microplásticos emergem como ameaças adicionais à saúde humana e à segurança alimentar, devido à bioacumulação e biomagnificação ao longo das cadeias tróficas. Essas pressões afetam de forma desproporcional populações indígenas, ribeirinhas e outras comunidades socialmente vulneráveis, que dependem diretamente do pescado para nutrição e subsistência. O estudo também discute estratégias de enfrentamento baseadas em monitoramento ambiental integrado, governança participativa, valorização de sistemas alimentares tradicionais e desenvolvimento de alternativas sustentáveis, como aquicultura adaptada ao contexto amazônico. Conclui-se que clima, biodiversidade e saúde constituem sistemas interdependentes, e que a proteção dos ecossistemas aquáticos amazônicos é fundamental para garantir a segurança alimentar, a equidade em saúde e a resiliência socioecológica na região.

Palavras-chave: Amazônia; Ictiofauna; Mercúrio; Mudanças climáticas; Poluição aquática; Segurança alimentar.

ABSTRACT

The Amazon Basin hosts the largest freshwater system on Earth and supports an exceptional diversity of fish species that represent the primary source of protein and essential micronutrients for millions of people. In many Indigenous and riverine communities,

annual fish consumption may exceed 160 kg per capita, highlighting the profound nutritional and cultural dependence on aquatic ecosystems. This narrative review summarizes current evidence on how environmental changes, particularly climate change and pollution, are affecting Amazonian fish populations and regional food security. Alterations in hydrological cycles, rising water temperatures, and extreme drought and flood events disrupt fish physiology, reproduction, growth, and biomass availability. At the same time, contaminants such as mercury, largely associated with illegal gold mining, and emerging pollutants like microplastics pose additional threats to human health and food safety through bioaccumulation and biomagnification along aquatic food webs. These pressures disproportionately affect Indigenous peoples, riverine communities, and other socially vulnerable populations that rely heavily on fish for nutrition and livelihoods. This review also discusses potential response strategies, including integrated environmental monitoring, participatory governance, recognition of traditional food systems, and sustainable alternatives such as locally adapted aquaculture. Overall, the evidence indicates that climate, biodiversity, and human health form tightly interconnected systems. Protecting Amazonian aquatic ecosystems is therefore essential to safeguard food security, promote health equity, and



strengthen socioecological resilience in the region.

Keywords: Amazon; Aquatic pollution; Climate change; Freshwater fish; Food security; Mercury contamination.

INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica abriga o maior sistema de água doce do planeta e sustenta os mais ricos hotspots de biodiversidade do mundo. Os recursos pesqueiros são centrais na dieta de milhões de pessoas em toda a região, constituindo a principal fonte de proteína e de micronutrientes essenciais para populações indígenas, ribeirinhas e urbanas. As taxas de consumo diário de peixe em comunidades amazônicas estão entre as mais elevadas já relatadas globalmente, chegando a até 169 kg per capita por ano, o que reforça o papel crítico dos ecossistemas aquáticos na segurança alimentar regional (1).

No entanto, essa forte dependência de recursos aquáticos torna as populações amazônicas particularmente vulneráveis às rápidas mudanças ambientais. As mudanças climáticas vêm alterando os ciclos hidrológicos, elevando as temperaturas da água e modificando a dinâmica ecológica de rios e áreas alagadas (várzeas e igapós). Essas alterações ameaçam a fisiologia, a reprodução e a disponibilidade de biomassa dos peixes,

com repercussões para a segurança alimentar e a saúde humana (2). Em paralelo, a poluição associada ao garimpo ilegal de ouro, especialmente a contaminação por mercúrio, acrescenta uma camada adicional de risco, uma vez que a bioacumulação em peixes compromete diretamente a saúde das comunidades locais (3).

Enfrentar esses desafios requer uma abordagem integrativa que reconheça clima, biodiversidade e saúde humana como sistemas interconectados. Este estudo consiste em uma revisão narrativa da literatura científica sobre mudanças ambientais, ecossistemas aquáticos e segurança alimentar na Amazônia, baseada em buscas em bases científicas amplamente utilizadas, priorizando estudos revisados por pares e relatórios relevantes. A partir dessa literatura, sintetizamos evidências sobre como a variabilidade climática e a poluição afetam os ecossistemas aquáticos e a segurança alimentar na região, além de discutir estratégias de resiliência ancoradas em sistemas alimentares tradicionais, saberes locais e políticas públicas (Figura 1).

A AMAZÔNIA E SUA DEPENDÊNCIA NUTRICIONAL DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

Embora seja evidente a dependência da Amazônia em relação aos recursos aquáticos para a segurança alimentar e a saúde pública,

Mudanças ambientais e segurança alimentar na Amazônia: evidências de ecossistemas aquáticos

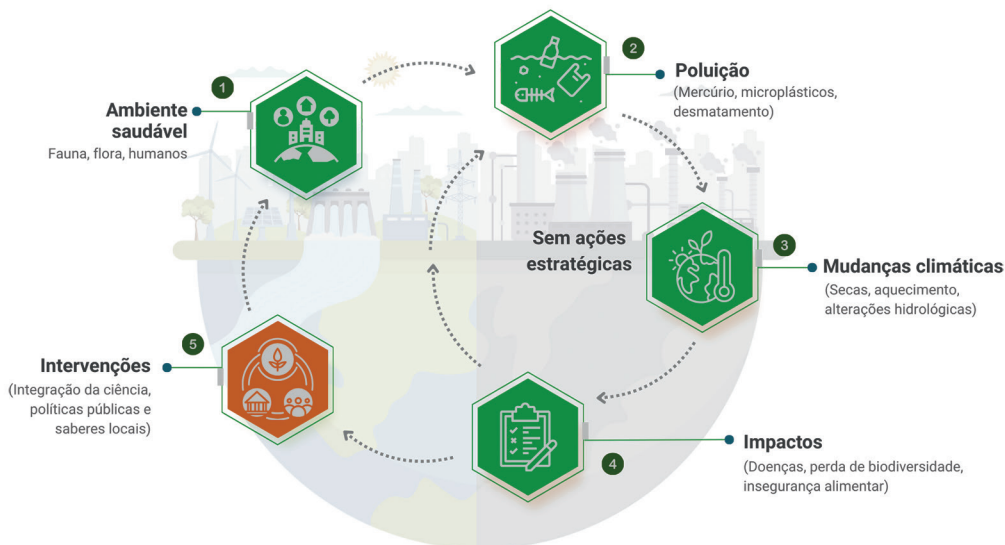


Figura 1 - Mudanças ambientais, poluição e trajetórias da segurança alimentar na Amazônia.

Esta figura ilustra os processos interconectados que relacionam um ambiente saudável aos desafios da segurança alimentar na Amazônia. A poluição por mercúrio e microplásticos e o desmatamento, combinados a estressores associados às mudanças climáticas, como secas, aquecimento e alterações hidrológicas, geram impactos em cascata sobre a biodiversidade, a saúde humana e a nutrição. Sem intervenções estratégicas que integrem ciência, políticas públicas e saberes locais, essas pressões comprometem a resiliência ecológica e agravam a insegurança alimentar entre as populações amazônicas.

é necessário um entendimento mais aprofundado dessa relação para compreender sua complexidade ecológica, nutricional e socio-cultural. Esta seção examina os fundamentos dessa interdependência, abordando a importância alimentar do pescado, a biodiversidade que sustenta a produtividade aquática, as vulnerabilidades socioambientais das comunidades dependentes da pesca e os valores culturais que moldam os padrões de consumo de peixe. Em conjunto, essas dimensões

estruturam a forma como as mudanças ambientais afetam não apenas os ecossistemas, mas também os meios de vida e as identidades na Amazônia.

Consumo de Peixe e Importância Nutricional

O pescado representa a principal fonte de proteína animal para milhões de habitantes da Amazônia, fato amplamente sustentado por inquéritos nutricionais e estudos



etnográficos. Além de constituir base da alimentação cotidiana, o peixe fornece micronutrientes essenciais, como ferro, manganês, zinco, iodo e ácidos graxos poli-insaturados, fundamentais para o desenvolvimento infantil e a saúde de adultos (Tabela 1). Em algumas comunidades indígenas e ribeirinhas, o consumo de peixe ultrapassa 135–169 kg per capita ao ano, entre os mais elevados do mundo, evidenciando a dependência alimentar singular dos ecossistemas de água doce (1, 4).

Essa dependência não é apenas cultural, mas profundamente funcional: em áreas remotas, onde a infraestrutura viária é limitada, a refrigeração é escassa e a integração aos mercados é frágil, o pescado é frequentemente mais acessível do que outras fontes de proteína. As cadeias tróficas relativamente curtas e a disponibilidade sazonal de diferentes espécies garantem acessibilidade econômica e diversidade alimentar. Espécies como *Colossoma macropomum* (tambaqui), *Plagioscion* spp. e *Pseudoplatystoma* spp. apresentam elevado teor de proteína de alta qualidade e ácidos graxos ômega-3, desempenhando papel preventivo contra a desnutrição e doenças cardiovasculares (5).

Entretanto, os benefícios à saúde associados ao consumo de peixe vêm sendo progressivamente ameaçados pela degradação ambiental. A bioacumulação de mercúrio, a ingestão de microplásticos e as alterações na qualidade dos habitats induzidas pelo clima

comprometem não apenas a disponibilidade de pescado, mas também sua segurança nutricional. Esse duplo papel, como ativo nutricional e potencial vetor de contaminação, coloca o peixe no centro dos debates sobre segurança alimentar na região.

Manter o consumo de pescado como estratégia nutricional segura e viável requer monitoramento robusto, comunicação de risco específica por espécie e a promoção de sistemas alimentares resilientes. Identificar espécies que conciliem baixos níveis de contaminantes e alta densidade nutricional é fundamental para orientar padrões de consumo e subsidiar intervenções em saúde pública.

Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos

A Bacia Amazônica abriga a maior diversidade de peixes de água doce do planeta, com mais de 2.500 espécies cientificamente descritas e, provavelmente, centenas ainda não documentadas (6, 7). Essa extraordinária riqueza da ictiofauna reflete o mosaico de habitats aquáticos da bacia amazônica (sistemas de águas brancas, pretas e claras), cada qual com características físico-químicas distintas que sustentam assembleias específicas de espécies. Essa biodiversidade não representa apenas um indicador de riqueza ecológica, mas constitui a base funcional para a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais que sustentam a vida humana na região.



Tabela 1 - Composição centesimal e parâmetros nutricionais selecionados de espécies de peixes amazônicos durante períodos de cheia e seca.

Os valores são expressos em porcentagem (%) ou miligramas por grama (mg/g) ou miligramas por quilograma (mg/kg), conforme o parâmetro. Siglas: PUFA – ácidos graxos poli-insaturados; EPA – ácido eicosapentaenoico; DHA – ácido docosahexaenoico. Locais de coleta: (1) desembarque no Porto da Ceasa, Manaus; (2) peixes coletados no Rio Branco, Estado de Roraima.

ESPÉCIES	PARÂMETROS	CHEIA	SECA	REFS
<i>Pseudoplatystoma tigrinum</i> (surubim)	Lipídios (%)	1.07	0.89	72
	EPA+DHA	54.35	20.65	72
<i>Hypophthalmus edentatus</i> (mapará)	Lipídios (%)	26.29	9.26	72
	EPA+DHA	37.87	36.21	72
<i>Astronotus ocellatus</i> (acará-açu)	Lipídios (%)	0.78	1.21	73
	Carboidratos (%)	0.31	2.63	73
	Proteína (%)	18.82	22.38	73
<i>Leporinus friderici</i> (aracu)	Lipídios (%) (1)	3.94	1.65	73
	Carboidratos (%)	0.66	2.18	73
	Proteína (%)	18.16	16.56	73
	Lipídios (%) (2)	3.97	7.26	5
	PUFA (mg/g)	220.77	180.85	5
<i>Colossoma macropomum</i> (tambaqui)	Lipídios (%) (2)	7.56	7.63	5
	PUFA (mg/g)	243.57	216.17	5
	Lipídios hepáticos (mg/g)	64.9	29.2	74
<i>Cichla monoculus</i> (tucunaré)	Lipídios hepáticos (mg/g)	15.0	44.5	74
	Lipídios musculares (mg/g)	2.8	4.6	74
<i>Semaprochilodus insignis</i> (jaraqui)	Lipídios (%)	2.64	1.65	75
	Carboidratos (%)	0.73	1.00	75
<i>Cichla pleizona</i> (tucunaré)	Ferro (mg/kg)	1.35	4.22	76
	Manganês (mg/kg)	0.17	0.08	76
<i>Mylossoma duriventre</i> (pacu)	Ferro (mg/kg)	10.55	6.9	76
	Manganês (mg/kg)	0.6	1.0	76



Entre os serviços mais fundamentais está a provisão de alimentos. Espécies adaptadas a diferentes ambientes contribuem para a disponibilidade nutricional ao longo do ano e para a diversidade alimentar, especialmente entre populações ribeirinhas e indígenas. Espécies carnívoras, onívoras e detritívoras ocupam nichos ecológicos complementares que estabilizam as teias alimentares aquáticas e auxiliam na regulação da ciclagem de nutrientes, da dinâmica de sedimentos e da produção primária (8). Espécies migratórias, como *Brachyplatystoma rousseauxii* (dourada), também promovem conectividade regional ao integrar ambientes de várzea, estuários e áreas a montante.

Além da nutrição, os peixes amazônicos contribuem para a identidade cultural, a resiliência econômica e a regulação climática. A dispersão de sementes por espécies frugívoras, como *C. macropomum*, favorece a regeneração florestal durante o pulso de inundação e contribui para o sequestro de carbono nas interfaces terra-água (9). Ademais, a pesca constitui pilar das economias locais, gerando emprego e renda em setores comerciais de pequena escala e na pesca de subsistência.

A erosão da biodiversidade de peixes, impulsionada pela sobrepesca, barragens hidrelétricas, mineração, poluição e mudanças climáticas, compromete esses serviços e

amplia a insegurança alimentar. Proteger a diversidade da ictiofauna é, portanto, não apenas um imperativo ecológico, mas também uma prioridade de saúde pública e de sistemas alimentares. As estratégias de conservação devem ir além da contagem de espécies e considerar os papéis funcionais dos peixes nos sistemas aquático-humanos.

Vulnerabilidades Socioambientais

As populações mais dependentes do pescado para alimentação e subsistência na Amazônia são também as mais expostas a riscos socioambientais. Povos indígenas, comunidades ribeirinhas e populações afrodescendentes (quilombolas) frequentemente vivem em áreas remotas, com acesso limitado a serviços de saúde, saneamento, infraestrutura e alternativas alimentares. A dependência alimentar do peixe se entrelaça com desigualdades estruturais e riscos ambientais, tornando essas populações particularmente vulneráveis à insegurança nutricional, às doenças e à marginalização socioeconômica.

A intensificação das atividades de mineração de ouro, especialmente de caráter ilegal, tem provocado ampla contaminação por mercúrio em rios e peixes (10). Estudos relatam níveis alarmantes de mercúrio em peixes piscívoros consumidos por populações indígenas, como os Yanomami, entre os quais foram registradas 400 mortes de crian-

ças entre 2018 e 2022 em decorrência de negligência em saúde e exposição tóxica (11). Apesar dos riscos amplamente documentados, muitas comunidades afetadas carecem de acesso a fontes alternativas de proteína ou a informações adequadas sobre riscos, perpetuando um ciclo de exposição alimentar e deterioração da saúde.

As vulnerabilidades ambientais são agravadas pela invisibilidade social. Programas governamentais de monitoramento e mitigação de riscos frequentemente concentram-se em áreas urbanas, negligenciando populações dispersas em regiões florestais e de várzea. Inundações sazonais, eventos climáticos extremos e perdas de infraestrutura aumentam ainda mais o isolamento desses grupos durante eventos associados às mudanças climáticas. Mulheres e crianças, especialmente em comunidades indígenas, enfrentam vulnerabilidades acentuadas devido ao acesso desigual a serviços de saúde e suporte nutricional (12,13).

Essas vulnerabilidades interligadas demandam uma abordagem integrada de políticas públicas que contemple não apenas a disponibilidade de alimentos, mas também a justiça ambiental, a equidade em saúde e a governança inclusiva. Proteger populações vulneráveis da exposição a contaminantes e dos impactos climáticos deve ser central em qualquer estratégia voltada à segurança alimentar e à saúde na Amazônia.

Determinantes Culturais e Sociais do Consumo de Peixe

O consumo de peixe na Amazônia não pode ser explicado apenas pela disponibilidade ecológica, estando profundamente enraizado em valores culturais, práticas sociais e modos de vida de povos indígenas, comunidades ribeirinhas e populações quilombolas (14). Nessas comunidades, o peixe ultrapassa sua função nutricional, ocupando papel central em rituais, celebrações, redes de reciprocidade e na transmissão intergeracional de conhecimentos ecológicos tradicionais (14).

Saberes locais e tradições orais orientam as práticas de pesca, baseadas na observação dos ciclos hidrológicos, das migrações sazonais e dos comportamentos específicos das espécies. Essas práticas incluem usos diferenciados de espécies, por exemplo, aquelas consideradas mais adequadas para crianças, mulheres lactantes ou idosos, diretrizes culturais raramente contempladas em políticas públicas de nutrição padronizadas (14).

O peixe também representa o principal recurso alimentar cotidiano em contextos nos quais o acesso a outras fontes de proteína é limitado pelo isolamento geográfico, pela pobreza e pela precariedade da infraestrutura. O consumo informal e de subsistência frequentemente predomina sobre cadeias formais de abastecimento, reforçando a centralidade do pescado na dieta diária, mas também am-



pliando a vulnerabilidade à variabilidade ecológica e aos impactos socioambientais (1).

Contudo, essa dependência cultural e alimentar de longa data vem sendo reconfigurada pela degradação ambiental, pela instabilidade hidrológica e pelo aumento da poluição (2, 15), bem como pela crescente penetração de alimentos industrializados e ultraprocessados em comunidades remotas (16). Essas transformações contribuem para a erosão da soberania alimentar, o distanciamento cultural e o aumento de riscos nutricionais, especialmente entre as gerações mais jovens.

Reconhecer os determinantes culturais e sociais do consumo de peixe é, portanto, essencial para a formulação de políticas eficazes de segurança alimentar e saúde pública na Amazônia. Isso requer ultrapassar abordagens exclusivamente biomédicas ou quantitativas e incorporar conhecimentos locais, valores simbólicos e práticas alimentares comunitárias como dimensões centrais do bem-estar e da resiliência (14).

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E RISCOS À ICTIOFAUNA AMAZÔNICA

As mudanças climáticas estão reconfigurando o equilíbrio ecológico dos rios amazônicos ao alterar a intensidade dos pulsos sazonais de cheia e vazante que sustentam os ciclos de vida dos peixes. O momento e a intensidade das cheias determinam o acesso às

áreas de alimentação e reprodução, e alterações nesses padrões comprometem o sucesso reprodutivo e a sobrevivência de juvenis. O aumento da temperatura da água impõe desafios adicionais às espécies com estreita tolerância térmica, especialmente aquelas adaptadas a ambientes específicos. Essas pressões não atuam de forma isolada; elas se somam a estressores já existentes, como fragmentação de habitats e poluição, ampliando os riscos para populações de peixes que desempenham papel central na segurança alimentar regional.

Tendências Recentes de Temperatura, CO₂ e Hidrologia

A Bacia Amazônica enfrenta crescente estresse climático, com efeitos diretos sobre seus ecossistemas aquáticos. Em 2023, uma seca recorde e temperaturas elevadas reduziram os níveis do Rio Negro aos mais baixos desde 1902, evidenciando uma pressão hidrológica associada principalmente às mudanças climáticas de origem antrópica (17). Paralelamente, análises isotópicas de anéis de crescimento de árvores demonstram que, desde 1980, as chuvas na estação chuvosa na Amazônia ocidental aumentaram entre 15–22%, enquanto as precipitações na estação seca diminuíram entre 5,8 e 13,5%, indicando maior contraste sazonal e intensificação do ciclo hidrológico (18).

Essas alterações coincidem com evidências de enfraquecimento do sumidouro ter-

restre de carbono. Análises recentes do orçamento global de carbono indicam que 2023 registrou forte declínio na absorção de CO₂ por florestas e solos, com a Amazônia desempenhando papel central nessa redução (19). Esses mecanismos de retroalimentação reforçam tendências de aquecimento, agravam secas e desestabilizam a conectividade hidrológica. Em conjunto, o aumento das temperaturas, a irregularidade das chuvas e a redução da capacidade de sequestro de carbono estão remodelando a hidrologia amazônica, alterando o momento, a extensão e a qualidade dos habitats aquáticos. Essas mudanças impõem desafios fisiológicos significativos a espécies que evoluíram sob dinâmicas relativamente estáveis de pulso de inundação.

Impactos Fisiológicos nos Peixes

Os peixes amazônicos já habitam ambientes nos quais temperatura e oxigênio flutuam próximos aos seus limites fisiológicos, tornando-os particularmente vulneráveis às mudanças climáticas. Evidências indicam que o aumento da temperatura da água reduz a margem de segurança térmica, diminui a tolerância à hipóxia e compromete o escopo aeróbico (20). O estilo de vida e o comportamento natatório também influenciam as respostas: espécies mais ativas, como determinados caracídeos, apresentam taxas metabólicas de repouso mais elevadas, o que restringe a flexibilidade aeróbica e reduz a

capacidade de adaptação a aquecimentos adicionais (21).

O aumento projetado da temperatura da água eleva as demandas metabólicas e reduz a solubilidade do oxigênio, impondo estresse às funções cardiorrespiratórias e à regulação iônica. Espera-se que essas condições favoreçam espécies com metabolismo intrinsecamente mais baixo e maior tolerância à hipóxia, enquanto eliminam aquelas incapazes de apresentar compensação fisiológica adequada (22). Em nível celular, o estresse térmico desencadeia desequilíbrio oxidativo e danos teciduais. Em *C. macropomum*, a exposição a 37 °C induziu peroxidação lipídica, redução de enzimas antioxidantes e lesões histopatológicas hepáticas, indicando colapso funcional próximo ao limite térmico superior da espécie (23).

A reprodução também é diretamente afetada. Experimentos *in vivo* demonstraram que temperaturas elevadas comprometem a qualidade espermática em *C. macropomum*, reduzindo motilidade, consumo de oxigênio e integridade de membranas dos gametas, prejudicando a capacidade de fertilização (24). Em conjunto, esses achados evidenciam a vulnerabilidade da ictiofauna amazônica em múltiplos níveis ao aquecimento, desde restrições sistêmicas do escopo aeróbico até danos celulares e comprometimento reprodutivo, indicando que as mudanças climáticas estão erodindo



a resiliência fisiológica que sustenta a diversidade regional.

Efeitos Sobre Alimentação e Crescimento

A alimentação e o crescimento dos peixes amazônicos estão fortemente associados ao pulso de inundação, que regula o acesso aos habitats alimentares e a distribuição sazonal de recursos. O conceito do pulso de inundação destaca que a subida das águas conecta rios e planícies alagáveis, disponibilizando frutos, sementes, insetos e detritos, enquanto a vazante restringe habitats e intensifica a competição (25). Essas transições cíclicas exigem flexibilidade trófica, com muitas espécies alternando dietas baseadas em invertebrados durante a enchente para detritos e algas durante a seca (26).

Alterações extremas na hidrologia intensificam essas pressões. Evidências recentes indicam que níveis extremos de seca reduzem a condição corporal dos peixes, com declínios mensuráveis na massa ajustada ao comprimento, especialmente em sistemas de águas pretas naturalmente pobres em nutrientes (27). A fragmentação de habitats agrava esses efeitos: a perda de conectividade entre lagos de várzea, rios e florestas inundáveis compromete migrações alimentares e aumenta o risco de mortalidade durante secas prolongadas (27).

As respostas de crescimento às mudanças climáticas reforçam essas vulnerabilidades. Simulações experimentais de cenários futuros do IPCC indicam que *C. macropomum* pode aumentar a ingestão alimentar sob aquecimento e altas concentrações de CO₂, mas os ganhos em peso vêm acompanhados de estresse fisiológico e alterações na alocação energética (28). Embora essa plasticidade possa sustentar o crescimento no curto prazo, ela pode desestabilizar teias alimentares ao modificar padrões de dominância e interações ecológicas.

Esses resultados demonstram que os peixes amazônicos enfrentam um desafio duplo: manter adaptabilidade trófica em ambientes flutuantes enquanto lidam com extremos climáticos que reduzem a qualidade dos habitats e alteram trajetórias de crescimento. A erosão da conectividade e da previsibilidade das várzeas compromete não apenas a condição e o recrutamento dos estoques, mas também os serviços ecológicos e nutricionais dos quais dependem as populações humanas.

Implicações para a Segurança Alimentar

Projeta-se que a variabilidade climática na Amazônia se intensifique, com secas mais prolongadas, atraso no início das chuvas e eventos extremos de precipitação, ameaçando diretamente a disponibilidade e a estabi-

lidade de alimentos (29,30). Essas alterações hidrológicas comprometem tanto a pesca quanto a agricultura, expondo famílias ribeirinhas, rurais e indígenas a ciclos de escassez que agravam riscos de desnutrição (Figura 2). Para populações dependentes de recursos naturais, a perda de previsibilidade ecológica fragiliza sistemas alimentares de subsistência e de mercado.

Abordagens recentes destacam a importância da soberania alimentar e de marcos

baseados em direitos para enfrentar essas vulnerabilidades. Evidências indicam que políticas e práticas comunitárias que fortalecem a governança local dos recursos promovem melhores resultados nutricionais e maior resiliência do que estratégias focadas exclusivamente na produção (31). Essa perspectiva é particularmente relevante para povos amazônicos cujas dietas estão profundamente interligadas à biodiversidade e ao conhecimento tradicional.



Figura 2 - Mortalidade massiva de peixes durante seca severa na Amazônia, consequência direta da intensificação da emergência climática na região.

Eventos como esse ocorreram em dois anos consecutivos, 2023 e 2024, afetando gravemente a disponibilidade diária de pescado, principal fonte de proteína para comunidades ribeirinhas, indígenas e rurais. A recorrência cíclica desses distúrbios impulsionados pelo clima reduz a capacidade de reposição natural dos estoques e ameaça a resiliência ecológica e nutricional dos sistemas alimentares tradicionais. Foto: Edmar da Silva Barros.



A própria biodiversidade alimentar pode atuar como amortecedor frente a choques climáticos. Em comunidades indígenas amazônicas, dietas diversificadas, incluindo peixes, frutos e alimentos silvestres, estão associadas a maior ingestão de micronutrientes e podem aumentar a resiliência durante eventos extremos de cheia ou seca (32). Contudo, pressões decorrentes da expansão agrícola e das cadeias globais de commodities vêm erodindo esses sistemas alimentares tradicionais, reduzindo autonomia e ampliando a vulnerabilidade a choques externos (30).

Uma trajetória sustentável exige repensar o desenvolvimento por meio de estratégias inclusivas de bioeconomia que integrem conhecimentos ecológicos tradicionais, fortaleçam cadeias alimentares locais e ampliem o acesso a alimentos seguros e diversos. Ao reforçar a gestão comunitária da pesca, apoiar infraestrutura local de processamento e armazenamento e valorizar produtos da sociobiodiversidade, tais estratégias podem articular conservação ecológica com melhoria da segurança alimentar e da nutrição (33).

POLUIÇÃO E RISCOS À SAÚDE PÚBLICA

A poluição decorrente de atividades antrópicas emergiu como uma das maiores ameaças aos ecossistemas aquáticos amazônicos e às populações que deles dependem. Entre os contaminantes, o mercúrio desta-

ca-se como elemento tóxico fortemente associado ao garimpo ilegal de ouro, que se expandiu rapidamente na bacia nas últimas duas décadas. Uma vez introduzido nos rios, o mercúrio ingressa nos ciclos biogeoquímicos, acumula-se nos peixes e é transferido ao longo da cadeia alimentar, configurando grave ameaça à segurança alimentar e à saúde humana. Compreender a dinâmica da poluição por mercúrio, suas origens, vias tróficas, impactos à saúde e mecanismos naturais de atenuação, é fundamental para avaliar a interseção entre degradação ambiental, incluindo os efeitos das mudanças climáticas, e saúde pública na Amazônia.

Mercúrio e Garimpo Ilegal

O garimpo ilegal de ouro constitui a principal fonte de contaminação por mercúrio na Amazônia. A mineração artesanal e de pequena escala libera mercúrio em rios, solos e atmosfera, com impactos severos em territórios indígenas como as terras Yanomami, onde as perdas econômicas e de saúde foram estimadas em US\$ 69 milhões em 2020 (34). O mercúrio emitido durante a queima do minério também se dispersa atmosféricamente e é depositado em florestas intactas, acumulando-se em solos, folhagens e fauna, ampliando a contaminação para além dos focos de mineração (35).

Igualmente crítica é a contaminação dos sistemas aquáticos. Estudos em áreas

mineradoras do Pará revelam concentrações elevadas de mercúrio na água e nos sedimentos fluviais, condições que favorecem a metilação microbiana e a formação de compostos mais tóxicos (36). Na Bacia do Tapajós, a mineração artesanal libera ao menos 2,5 toneladas de mercúrio por ano, com perdas médias de 0,19 kg de Hg por quilograma de ouro produzido (37). Essas cargas acumulam-se nos ambientes aquáticos, expondo diretamente comunidades que utilizam a água do rio e estabelecendo as bases para a bioacumulação nos peixes, principal fonte proteica regional.

Bioacumulação e Biomagnificação em Peixes

Nos sistemas aquáticos, o mercúrio liberado por mineração, desmatamento e baramentos sofre metilação microbiana, gerando metilmercúrio (MeHg), que se acumula prontamente nos tecidos dos peixes. Estudos no Rio Negro e na planície de inundação do Tapajós demonstram que espécies piscívoras, como *Cichla* spp. e *Serrasalmus* spp., acumulam mercúrio em concentrações frequentemente superiores aos limites de segurança, enquanto espécies herbívoras e detritívoras apresentam níveis comparativamente menores (38–40). Evidências de sedimentos lacustres na Amazônia central indicam que o desmatamento intensifica o aporte de mercúrio aos ecossistemas aquáticos, criando

condições para concentrações mais elevadas em espécies consumidas pelas populações locais (41).

A biomagnificação amplia a exposição ao longo dos níveis tróficos, com peixes maiores e de vida longa acumulando as maiores concentrações de mercúrio. Levantamentos em diferentes bacias amazônicas confirmam que a bioacumulação ocorre mesmo na ausência de influência direta da mineração, ressaltando o papel de ambientes naturais de águas pretas, ciclos hidrológicos e erosão do solo na intensificação do ciclo do Hg e na influência das mudanças climáticas (41,42). Barragens hidrelétricas, como Tucuruí, atuam como hotspots de metilação, aumentando as concentrações de mercúrio em peixes consumidos a montante dos reservatórios (43). Em conjunto, esses estudos demonstram que o consumo de pescado constitui uma das principais vias de exposição alimentar, conectando contaminação ambiental à segurança alimentar e aos riscos à saúde.

Efeitos Diretos sobre Populações Humanas

Os efeitos da exposição ao mercúrio na Amazônia têm sido amplamente documentados entre comunidades ribeirinhas e indígenas. Populações próximas a barragens hidrelétricas, como Tucuruí, apresentam níveis de mercúrio em cabelo acima dos limites de segurança da OMS, com mais da metade



dos participantes excedendo 10 $\mu\text{g/g}$, valores associados a riscos neurológicos (43). De forma semelhante, levantamentos em comunidades ribeirinhas do Tapajós mostram que crianças frequentemente apresentam concentrações de mercúrio em cabelo entre 3 e 25 vezes superiores às doses de referência internacionais, com impactos sobre crescimento, nutrição e neurodesenvolvimento (44, 45). Evidências do Rio Madeira confirmam associações entre mercúrio capilar e déficits cognitivos e motores em crianças (46).

Adultos também são afetados: riscos cardiovasculares, comprometimento imunológico e outros efeitos crônicos têm sido associados à exposição prolongada ao MeHg em populações ribeirinhas e urbanas amazônicas (47). Entre os Munduruku, mulheres em idade reprodutiva estão desproporcionalmente expostas, evidenciando que a contaminação por mercúrio é tanto um problema toxicológico quanto de justiça social (48). Mesmo em contextos urbanos estuarinos, como no Rio de Janeiro, peixes contaminados vendidos em mercados locais têm sido associados a biomarcadores elevados em pescadores, reforçando que as vias alimentares de exposição extrapolam o interior amazônico (49). Ressalte-se que o aquecimento ambiental decorrente das mudanças climáticas pode agravar a contaminação por metais em peixes, pois a maior demanda por oxigênio aumenta a ventilação branquial e, conse-

quentemente, a absorção de metais (Figura 3).

Processos Naturais de Mitigação

Embora a contaminação por mercúrio seja ampla, alguns sistemas aquáticos apresentam condições que reduzem sua biodisponibilidade. Rios de águas pretas, como o Rio Negro, ricos em substâncias húmicas e carbono orgânico dissolvido, favorecem a ligação dessas moléculas ao mercúrio, limitando sua conversão em MeHg e reduzindo sua transferência trófica para os peixes (40). A hidrologia sazonal também modula esses processos: durante períodos de cheia, o mercúrio associa-se a partículas suspensas; na seca, condições anóxicas favorecem a metilação microbiana e a incorporação pelo plâncton (50). Essas dinâmicas biogeoquímicas geram flutuações temporais na contaminação dos peixes, atenuando parcialmente a exposição humana em determinados sistemas.

Contudo, essas defesas naturais vêm sendo progressivamente enfraquecidas por pressões antrópicas. O desmatamento mobiliza mercúrio armazenado nos solos, contribuindo significativamente para cargas atmosféricas e aquáticas (41,42). Reservatórios hidrelétricos criam condições de anoxia e elevada matéria orgânica que intensificam o potencial de metilação, tornando-se importantes vetores locais do ciclo do mercúrio



Figura 3 - Interações entre mudanças climáticas e contaminação por mercúrio na Amazônia.

Processos impulsionados pelo clima, como aumento da temperatura, chuvas extremas, inundações e liberação de matéria orgânica, combinados às entradas de mercúrio provenientes do garimpo ilegal de ouro, intensificam a metilação e o acúmulo de mercúrio em sistemas aquáticos. Essas alterações ampliam a bioacumulação e a biomagnificação do metilmercúrio (MeHg) nos peixes, aumentando os riscos toxicológicos para comunidades indígenas e ribeirinhas que dependem do pescado como principal fonte de proteína. As mudanças climáticas atuam, portanto, tanto como fator direto quanto indireto da contaminação ambiental e da insegurança alimentar. Nota: Esquema conceitual gerado com o ChatGPT a partir de instruções fornecidas pelos autores.

(43). Além disso, a erosão do solo e as mudanças no uso da terra aumentam fluxos sedimentares de mercúrio para os rios, sobrecarregando a capacidade de amortecimento natural (51). Assim, embora processos ecológicos proporcionem mitigação parcial, eles são insuficientes diante da escala da contaminação, reforçando a necessidade de estratégias preventivas e de governança.

O papel amortecedor dos processos naturais deve ser analisado no contexto mais amplo da emergência climática amazônica. O aumento das temperaturas, a alteração dos regimes de inundação e a intensificação de secas interagem com mudanças no uso da terra para acelerar o ciclo do mercúrio e comprometer a resiliência dos sistemas aquáticos. Águas mais quentes intensificam a atividade



microbiana e as taxas de metilação, além de aumentar a ventilação branquial dos peixes, facilitando a absorção de contaminantes. Ao mesmo tempo, a variabilidade hidrológica extrema reduz a estabilidade dos estoques de carbono orgânico dissolvido que normalmente sequestram mercúrio. Essas pressões convergentes demonstram que as mudanças climáticas não apenas agravam indiretamente a contaminação, mas reconfiguram ativamente os processos que antes moderavam seus impactos, criando riscos cumulativos para ecossistemas e saúde humana.

Microplásticos e Contaminantes Emergentes

Além de ameaças consolidadas como o mercúrio, os microplásticos emergem como importante classe de poluentes nos ecossistemas aquáticos amazônicos. Estudos recentes detectaram microplásticos em peixes de diferentes regiões da Amazônia, inclusive em áreas protegidas, indicando contaminação disseminada da biota por partículas sintéticas (52). Essas partículas estão presentes na água, nos sedimentos e na fauna, originando-se de fibras têxteis, escoamento de resíduos plásticos e sistemas de esgoto inadequados, evidenciando a infiltração generalizada de microplásticos mesmo em ecossistemas remotos (53).

Os microplásticos também representam riscos indiretos relevantes ao atuarem como vetores de poluentes químicos, incluindo

metais pesados como o mercúrio, aumentando sua toxicidade por meio de exposições combinadas (54). Evidências experimentais sugerem que microplásticos podem intensificar a acumulação de mercúrio em organismos aquáticos e potencializar a neurotoxicidade por mecanismos sinérgicos de estresse (3). Estudos clínicos e de autópsia recentes identificaram partículas de microplásticos na placenta humana, pulmões, cérebro, sangue e tecidos cardiovasculares, levantando preocupações quanto à exposição sistêmica e possíveis efeitos inflamatórios, endócrinos, neurológicos e cardiovasculares (55, 56). Essa dupla contaminação, por ingestão física e por adsorção química, cria riscos complexos à segurança alimentar e à saúde humana que ainda estão em processo de compreensão.

No contexto da emergência climática, a ameaça dos microplásticos torna-se ainda mais relevante no contexto amazônico. A intensificação de eventos extremos de precipitação, inundações e a má gestão de resíduos aceleram o transporte de plásticos de centros urbanos e áreas desmatadas para ambientes aquáticos, enquanto temperaturas mais elevadas e maior radiação UV favorecem sua fragmentação em partículas menores e mais biodisponíveis. Essas mudanças ampliam as vias de exposição ao longo dos níveis tróficos, reforçando que microplásticos e contaminantes emergentes constituem não apenas uma nova camada de poluição, mas uma

ameaça cujo risco é amplificado pelo ritmo acelerado da mudança climática.

PERSPECTIVAS E ESTRATÉGIAS DE ENFRENTAMENTO

A Amazônia enfrenta um ônus múltiplo de poluição e mudanças ambientais, no qual ameaças históricas se somam a contaminantes emergentes e a pressões mais amplas relacionadas ao uso da terra e à variabilidade climática. Esses desafios comprometem os ecossistemas aquáticos, a segurança alimentar e a saúde pública, além de afetarem a resiliência das comunidades locais. As estratégias de enfrentamento devem, portanto, ser multidimensionais, combinando monitoramento, governança, inovação tecnológica e resiliência cultural. Enfrentar esses riscos interconectados requer marcos integrados que articulem clima, biodiversidade e saúde, garantindo respostas sustentáveis e equitativas.

Monitoramento Ambiental e Alimentar

Abordagens inovadoras de monitoramento vêm sendo desenvolvidas ao integrar amostragem comunitária, sensoriamento remoto e aprendizado de máquina, possibilitando a detecção quase em tempo real de atividades de mineração ilegal e seus impactos ambientais (57,58). Essas estratégias permitem antecipar áreas críticas de contami-

nação, alinhar coletas de campo com alertas de satélite e aprimorar a eficiência de custos e a cobertura territorial. Esses métodos demonstram a viabilidade de ampliar sistemas de vigilância ao conectar observações locais a tecnologias avançadas.

O monitoramento alimentar também tem avançado. Estudos recentes integraram análises de contaminantes em peixes a avaliações nutricionais, fornecendo subsídios para orientar padrões seguros de consumo (59,60). A incorporação sistemática da tescagem de pescado na infraestrutura de saúde pública, com comunicação clara de limites de segurança e riscos específicos por espécie, permitiria institucionalizar a segurança alimentar e vincular diretamente dados ambientais a programas nutricionais. Em conjunto, tais iniciativas podem fortalecer a resiliência e reduzir os riscos cumulativos que as mudanças climáticas impõem à segurança alimentar.

Integração Entre Ciência, Políticas Públicas e Saberes Locais

A integração efetiva requer marcos regulatórios sensíveis às evidências científicas. Estudos de alta resolução revelaram a expansão contínua da mineração ilegal em áreas protegidas, evidenciando a necessidade de fiscalização coordenada e do uso de evidências remotas para orientar intervenções (61). Paralelamente, plataformas de ciência cidadã no Brasil demonstram que



o monitoramento participativo pode gerar dados ambientais confiáveis e ampliar a legitimidade das decisões (62,63).

Estruturas conceituais como One Health (Saúde Única) e Saúde Planetária oferecem linguagem comum para integrar poluentes clássicos e emergentes nas agendas regionais (64,65). Essas abordagens vêm sendo adotadas em diferentes contextos para alinhar vigilância, prevenção e adaptação, oferecendo diretrizes que podem ser adaptadas à realidade amazônica, evitando soluções fragmentadas e reduzindo os impactos da emergência climática.

Sistemas Alimentares Tradicionais Como Base de Resiliência

Reduzir riscos sem estigmatizar o consumo de peixe exige priorizar espécies de baixo nível trófico, com elevado valor nutricional e, em geral, menores concentrações de mercúrio. Análises recentes identificam espécies que representam “ganho duplo”, combinando segurança toxicológica e acessibilidade econômica, oferecendo um caminho para manter a ingestão proteica e, ao mesmo tempo, reduzir a exposição a contaminantes (66,67). Esses achados podem ser incorporados a programas de alimentação escolar e orientações dietéticas.

A aquicultura sustentável constitui outra estratégia complementar. Ensaio com tambaqui avaliaram dietas baseadas em in-

gredientes locais, como subprodutos de mandioca e farinha de insetos, demonstrando resultados promissores em crescimento e qualidade do produto (68). Sistemas de aquaponia que integram produção de peixes e hortaliças também vêm sendo testados como modelos bioeconômicos na Amazônia (69). Essas inovações fortalecem a soberania alimentar e diversificam fontes proteicas, respeitando práticas culturais.

Clima, Biodiversidade e Saúde Como Sistemas Acoplados

Estudos recentes demonstram como secas e cheias reconfiguram a dinâmica de contaminantes, isolam comunidades e alteram cadeias de suprimento alimentar, reforçando a necessidade de modelos preditivos que orientem a gestão pesqueira e intervenções em saúde (70). A integração de dados climáticos ao monitoramento de contaminantes permitirá que gestores antecipem crises, em vez de apenas reagirem a elas.

Estruturas como Saúde Planetária e One Health oferecem oportunidades transformadoras para sincronizar adaptação climática, proteção da biodiversidade e promoção da saúde (64,65). Inserir poluentes como mercúrio e microplásticos nessas perspectivas mais amplas possibilita a construção de resiliência sistêmica, superando ações mitigatórias pontuais em direção à adaptação de longo prazo.

AGENDA DE PESQUISA

Para a próxima década, a agenda de pesquisa deve estar ancorada no reconhecimento de que clima, biodiversidade e saúde constituem sistemas profundamente interconectados (71). Investigar como extremos climáticos reconfiguram a dinâmica de contaminantes, como a biodiversidade alimentar atua como amortecedor nutricional sob estresse e como a governança pode integrar múltiplos sistemas de conhecimento é central para a construção de resiliência. Caminhos inovadores, como aquicultura sustentável e estratégias inclusivas de bioeconomia, podem complementar a conservação ao oferecer alimentos seguros, acessíveis e culturalmente adequados. Ao mesmo tempo, será fundamental avançar no desenvolvimento de plataformas integradas de monitoramento e na produção de evidências sobre impactos cumulativos à saúde, articulando ciência, políticas públicas e saberes locais. Essas prioridades estão sintetizadas na Tabela 2, organizada por dimensão temática, foco e resultados esperados. Somente ao reconhecer a Amazônia como linha de frente da emergência climática planetária e ao vincular proteção ambiental à saúde e à equidade social será possível salvaguardar a segurança alimentar e o bem-estar humano na região.

CONCLUSÕES

Embora os impactos da contaminação por mercúrio sobre peixes e populações humanas estejam bem documentados na literatura amazônica, outras interações, como aquelas envolvendo mudanças climáticas, microplásticos e a dinâmica de contaminantes, ainda constituem um campo emergente de investigação. As evidências sintetizadas nesta revisão demonstram que a segurança alimentar na Amazônia está cada vez mais ameaçada pela convergência entre mudanças climáticas, erosão da biodiversidade e poluição por contaminantes clássicos e emergentes. Mercúrio, microplásticos e outros poluentes infiltram-se nos ecossistemas aquáticos, acumulam-se nos peixes e comprometem a saúde de populações indígenas, ribeirinhas e urbanas. Embora processos naturais ofereçam algum grau de amortecimento, essas defesas vêm sendo superadas por pressões antrópicas em um contexto de aceleração da mudança climática. A emergência climática intensifica essas ameaças ao desestabilizar processos ecológicos essenciais, comprometendo a conectividade hidrológica, a fisiologia dos peixes e a estabilidade dos sistemas alimentares. Em conjunto, esses processos indicam que a insegurança alimentar na Amazônia se configura como uma crise sistêmica e urgente, exigindo estratégias integradas que articulem ciência, políticas públicas e saberes locais.



Tabela 2 - Agenda de pesquisa para a Amazônia na próxima década, organizada por dimensão temática. Cada prioridade destaca focos específicos de pesquisa e resultados esperados voltados a enfrentar os desafios combinados da emergência climática, da segurança alimentar e da resiliência ecossistêmica.

DIMENSÃO	PRIORIDADE (ORIENTADA À AÇÃO)	FOCO	RESULTADOS ESPERADOS
Ciência & Monitoramento	Desenvolver plataformas integradas de monitoramento	Combinar amostragem de campo, participação comunitária e sensoriamento remoto para rastrear mercúrio, microplásticos e pesticidas.	Monitoramento robusto de contaminantes e sistemas de alerta precoce.
	Modelar e prever interações clima-contaminantes	Prever interações entre extremos climáticos, mudanças no uso da terra, perda de biodiversidade e dinâmica de contaminantes.	Gestão proativa de riscos e antecipação de crises.
	Inovar com biotecnologias (avaliação criteriosa)	Aplicar melhoramento seletivo ou ferramentas genéticas para aumentar tolerância a poluentes ou reduzir bioacumulação, avaliando riscos ecológicos e culturais.	Potencial adaptação de peixes com governança responsável.
Saúde & Nutrição	Avançar na pesquisa em segurança alimentar e nutrição	Identificar espécies com baixo teor de contaminantes e alto valor nutricional e avaliar aquicultura sustentável adaptada ao contexto amazônico.	Diretrizes alimentares mais seguras e opções sustentáveis de aquicultura.
	Expandir estudos de impacto em saúde	Ampliar vigilância por biomarcadores em populações vulneráveis, com foco em impactos neurodesenvolvimentais, cardiovasculares e imunológicos.	Melhor compreensão dos impactos cumulativos à saúde.
Política & Governança	Fortalecer políticas e governança para segurança alimentar	Traduzir evidências científicas em mecanismos de fiscalização, utilizando modelos participativos que integrem conhecimentos indígenas e ribeirinhos.	Governança baseada em evidências e tomada de decisão inclusiva.
	Integrar conhecimentos tradicionais e locais	Incorporar perspectivas indígenas e ribeirinhas, coproduzindo conhecimento para estratégias culturalmente adequadas de adaptação e resiliência.	Sistemas alimentares resilientes ancorados na cultura.

Agradecimentos

Agradecemos à Erika de Oliveira Gomes (INPA) pelo rápido desenvolvimento e elaboração da Figura 1, que ilustra o marco conceitual deste estudo.

Financiamento

Este estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), Chamada 18/2023, Processo nº 01.02.016301.01900/2024-93. O estudo também contou com financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do INCT/ADAPTA III (Processo CNPq nº 409202/2024-0; CAPES – Código de Financiamento 001). ALV é bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq (número do processo).

Conflitos de Interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses para a redação deste artigo.

REFERÊNCIAS

1. Isaac VJ, et al.: Food consumption as an indicator of the conservation of natural resources in riverine communities of the Brazilian Amazon. *An Acad Bras Cienc.* 2015; 87:2229-2242.
2. Castello L, Macedo MN: Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Glob Change Biol.* 2016; 22:990-1007.
3. Crespo-Lopez ME, et al.: Mercury: what can we learn from the Amazon? *Environ Int.* 2021; 146:106223.
4. Barthem RB, Goulding M: The Catfish Connection: Ecology, Migration, and Conservation of Amazon Predators. New York, Columbia University Press. 1997; p. 184.
5. Petenuci ME, et al.: Seasonal variations in lipid content, fatty acid composition and nutritional profiles of five freshwater fish from the Amazon basin. *J Am Oil Chem Soc.* 2016; 93:1373-1381.
6. Jézéquel C, et al.: Freshwater fish diversity hotspots for conservation priorities in the Amazon basin. *Conserv Biol.* 2020; 34:956-965.
7. Val AL, Almeida-Val VMF: Fishes of the Amazon and their environment: physiological and biochemical aspects. Heidelberg, Springer. 1995; vol. 32, p. 224.
8. Winemiller K, et al.: Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science.* 2016; 351:128-129.
9. Anderson JT, Rojas JS, Flecker AS: High-quality seed dispersal by fruit-eating fishes in Amazonian floodplain habitats. *Oecologia.* 2009; 161:279-290.
10. Souza-Araujo J, Giarrizzo T, Lima MO, Souza MBG: Mercury and methylmercury in fishes from Bacajá River (Brazilian Amazon): evidence for bioaccumulation and biomagnification. *J Fish Biol.* 2016; 89:249-263.
11. Vega CM, Orellana JDY, Oliveira MW, Hacon SS, Basta PC: Human mercury exposure in Yanomami indigenous villages from the Brazilian Amazon. *Int J Environ Res Public Health.* 2018; 15:1051.
12. Le Tourneau FM: The sustainability challenges of indigenous territories in Brazil's Amazonia. *Curr Opin Environ Sustain.* 2015; 14:213-220.



13. Franco CLB, et al.: Community-based environmental protection in the Brazilian Amazon: recent history, legal landmarks and expansion across protected areas. *J Environ Manage.* 2021; 287:112314
14. FAO: Indigenous peoples' food systems: insights on sustainability and resilience in the front line of climate change. Rome, FAO. 2021; p. 420.
15. Passos CJS, Mergler D: Human mercury exposure and adverse health effects in the Amazon: a review. *Cad Saude Publica.* 2008; 24:S503-S520.
16. Moraes AOS, et al.: Food profile of Yanomami indigenous children aged 6 to 59 months from the Brazilian Amazon according to the degree of food processing: a cross-sectional study. *Public Health Nutr.* 2022; 26:208-218.
17. Espinoza JC, et al.: The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Sci Rep.* 2024; 14:8107.
18. Cintra BBL, et al.: Tree ring isotopes reveal an intensification of the hydrological cycle in the Amazon. *Commun Earth Environ.* 2025; 6:453.
19. Ke P, et al.: Low latency carbon budget analysis reveals a large decline of the land carbon sink in 2023. *Natl Sci Rev.* 2024; 11:nwae367.
20. Braz-Mota S, Duarte RM, Val AL: Contrasting thermal and hypoxic responses of species from blackwater and whitewater rivers. *J Fish Biol.* 2025; [Epub ahead of print].
21. Campos D, Val AL, Almeida-Val VMF: The influence of lifestyle and swimming behavior on metabolic rate and thermal tolerance of twelve Amazon forest stream fish species. *J Therm Biol.* 2018; 72:148-154.
22. Val AL, Wood CM: Global change and physiological challenges for fish of the Amazon today and in the near future. *J Exp Biol.* 2022; 225:jeb216440.
23. Amanajás RD, Silva JM, Silva MNP, Val AL: Temperature alters antioxidant status and induces cell damage in the Amazonian fish tambaqui. *J Therm Biol.* 2024; 126:103995.
24. Castro JS, Santos FBP, Costa JC, Heinrichs-Caldas W, Val AL: In vivo exposure to high temperature compromises quality of the sperm in *Colossoma macropomum*. *Anim Reprod Sci.* 2024; 262:107412.
25. Junk WJ, Bayley PB, Sparks RE: The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: Dodge DP (ed.), *Proceedings of the International Large River Symposium*. Canada, Can Spec Publ Fish Aquat Sci. 1989; vol. 106, pp. 110-127.
26. Röpke CP, Ferreira EJ, Zuanon J: Seasonal changes in the use of feeding resources by fish in stands of aquatic macrophytes in an Amazonian floodplain, Brazil. *Environ Biol Fishes.* 2014; 97:401-414.
27. Zingel P, et al.: How do extreme fluctuations in water level affect fish condition in Amazonian floodplain lakes? *J Fish Biol.* 2025; [Epub ahead of print].
28. Oliveira AM, Val AL: Effects of climate scenarios on the growth and physiology of the Amazonian fish tambaqui (*Colossoma macropomum*). *Hydrobiologia.* 2017; 789:167-178.
29. Duffy PB, Brando P, Asner GP, Field CB: Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2015; 112:13172-13177.
30. Marengo JA, et al.: Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia-Cerrado transition zone. *Sci Rep.* 2022; 12:457.
31. Sampson D, et al.: Food sovereignty and rights-based approaches strengthen food security and nutrition across the globe: a systematic review. *Front Sustain Food Syst.* 2021; 5:686492.
32. Zavaleta-Cortijo C, et al.: Does food biodiversity protect against malnutrition and favour resilience?



- ce to climate change-related events in Amazon indigenous communities? Wellcome Open Res. 2023; 7:246.
33. Val AL, et al.: Como a bioeconomia na Amazônia pode contribuir para a segurança alimentar dos povos originários e comunidades tradicionais? In: Hungria M (ed.), *Segurança Alimentar: o papel da ciência brasileira no combate à fome*. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências. 2024; pp. 139-209.
34. Bakker LB, et al.: Economic impacts on human health resulting from the use of mercury in illegal gold mining in the Brazilian Amazon. *Int J Environ Res Public Health*. 2021; 18:11869.
35. Gerson JR, et al.: Amazon forests capture high levels of atmospheric mercury pollution from artisanal gold mining. *Nat Commun*. 2022; 13:559.
36. Castilhos Z, et al.: Human exposure and risk assessment associated with mercury contamination in artisanal gold mining areas in the Brazilian Amazon. *Environ Sci Pollut Res*. 2015; 22:11255-11264.
37. Fritz B, et al.: Mercury and CO₂ emissions from artisanal gold mining in Brazilian Amazon rainforest. *Nat Sustain*. 2023; 7:15-22.
38. Barbosa AC, et al.: Mercury biomagnification in a tropical black water Rio Negro, Brazil. *Arch Environ Contam Toxicol*. 2003; 45:235-246.
39. Nyholt K, et al.: High rates of mercury biomagnification in fish from Amazonian floodplain-lake food webs. *Sci Total Environ*. 2022; 833:155087.
40. Kasper D, et al.: Mercury in black-waters of the Amazon. In: Myster RW (ed.), *Igapó (Black-water flooded forests) of the Amazon Basin*. Cham, Springer. 2018; pp. 39-56.
41. Roulet M, et al.: Increase in mercury contamination recorded in lacustrine sediments following deforestation in the central Amazon. *Chem Geol*. 2000; 165:243-266.
42. Feinberg A, et al.: Deforestation as an anthropogenic driver of mercury pollution. *Environ Sci Technol*. 2024; 58:3246-3257.
43. Arrifano GPF, et al.: Large-scale projects in the Amazon and human exposure to mercury: the case-study of the Tucuruí dam. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2018; 147:299-305..
44. Hofer CB, et al.: Munduruku indigenous children: health situation in an area with high mercury exposure. *Rev Saude Publica*. 2025; 59:e238885.
45. Vasconcellos ACS, et al.: Health risk assessment of mercury exposure from fish consumption in Munduruku indigenous communities in the Brazilian Amazon. *Int J Environ Res Public Health*. 2021; 18:7940.
46. Santos-Lima CD, et al.: Neuropsychological effects of mercury exposure in children and adolescents of the Amazon region, Brazil. *Neurotoxicology*. 2020; 79:48-57.
47. Rego RV, et al.: Mercury exposure in riverside Tapajós communities in the Brazilian Amazon. In: Leal Filho W, et al. (eds.), *Amazon 2030*. Cham, Springer. 2025; pp. 77-92
48. Lucchini RG, et al.: Mercury contamination and co-exposures in the Amazon basin: at the center of the planetary environmental crisis. *Ann Glob Health*. 2025; 91:42.
49. Vezzone M, et al.: Mercury contamination in sediments and fish from an urban tropical estuary. *Water Air Soil Pollut*. 2023; 234:72.
50. Gomes VM, et al.: Study on mercury methylation in Amazonian rivers in flooded areas for hydroelectric use. *Water Air Soil Pollut*. 2019; 230:211.
51. Obrist D, et al.: A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations. *Ambio*. 2018; 47:116-140.
52. Costa ID, et al.: Microplastics in fishes in Amazon riverine beaches. *Sci Total Environ*. 2023; 863:160934.



53. Morais LMS, et al.: Microplastics in the Amazon biome: state of the art and future priorities. *Helvion*. 2024; 10:e28851.
54. Liu S, et al.: Interactions between microplastics and heavy metals in aquatic environments: a review. *Front Microbiol*. 2021; 12:652520..
55. Jenner LC, et al.: Detection of microplastics in human lung tissue. *Sci Total Environ*. 2022; 831:154907.
56. Ragusa A, et al.: First evidence of microplastics in human placenta. *Environ Int*. 2021; 146:106274.
57. Fonseca A, Marshall MT, Salama S: Enhanced detection of artisanal small-scale mining with spectral and textural segmentation of Landsat time series. *Remote Sens*. 2024; 16:1749.
58. Ngom NM, et al.: Artisanal exploitation of mineral resources: environmental consequences and social aspects. *Surv Geophys*. 2023; 44:225-247.
59. Basta PC, et al.: Risk assessment of mercury-contaminated fish consumption in the Brazilian Amazon. *Toxics*. 2023; 11:800.
60. Vasconcellos ACS, et al.: Health risk assessment attributed to consumption of fish contaminated with mercury in the Rio Branco basin. *Toxics*. 2022; 10:516.
61. Cortinhas-Ferreira-Neto L, et al.: Uncontrolled illegal mining and garimpo in the Brazilian Amazon. *Nat Commun*. 2024; 15:9847.
62. Bacellar AEF, et al.: Parceria entre CNPq e Instituto Chico Mendes no fortalecimento dos sítios PELD. *Oecol Aust*. 2020; 24:266-270.
63. Cronemberger C, et al.: Social participation in the Brazilian national biodiversity monitoring program. *Citizen Sci Theory Pract*. 2023; 8:32.
64. Morrison M, et al.: A growing crisis for One Health: impacts of plastic pollution across biological systems. *Front Mar Sci*. 2022; 9:980705..
65. Myers SS, Pivor JI, Saraiva AM: The São Paulo declaration on planetary health. *Lancet*. 2021; 398:1299.
66. Pierezan MD, et al.: Total mercury and methylmercury levels in Brazilian Amazon fish: a scope review with meta-analysis. *J Trace Elem Miner*. 2024; 10:100196.
67. Heilpern SA, et al.: Accessible, low-mercury and nutritious fishes provide win-wins for conservation and public health. *One Earth*. 2025; 8:101174
68. Matos-Dantas F, et al.: A sustainable diet for tambaqui farming in the Amazon. *Animals (Basel)*. 2024; 14:1165.
69. Guimarães RQ, et al.: Integrated cultivation of tambaqui with coriander grown at different densities. *J Clean Prod*. 2024; 470:143346..
70. Santos-de-Lima L, et al.: Severe droughts reduce river navigability and isolate communities in the Brazilian Amazon. *Commun Earth Environ*. 2024; 5:370..
71. Pörtner HO, et al.: Overcoming the coupled climate and biodiversity crises and their societal impacts. *Science*. 2023; 380:eabl4881..
72. Souza AFL, et al.: Effect of seasonal variations on fatty acid composition of Amazonian fish species. *Food Res Int*. 2020; 132:109051.
73. Barai AA, et al.: Seasonal influence on centesimal composition and yield of Amazonian fish. *Food Sci Technol*. 2022; 42:e55320.
74. Correia BSB, et al.: NMR analysis of lipids from Amazonian fishes with different feeding habits. *J Braz Chem Soc*. 2020; 31:2531-2543.
75. Souza AFL, et al.: Proximal and mineral composition of native fish species from Amazonas, Brazil. *Acta Sci Anim Sci*. 2023; 45:e61884..
76. Silva LO: Transporte de Fe e Mn em sistema rio-planície de inundação (AAM): avaliação do uso de peixes como indicadores. *Campos dos Goytacazes, UENF*. 2021; p. 59.