

GEOQUÍMICA DA AMAZÔNIA: IMPACTOS ANTRÓPICOS E IMPLICAÇÕES PARA OS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS

*GEOCHEMISTRY OF THE AMAZON:
ANTHROPOGENIC IMPACTS AND IMPLICATIONS FOR ECOSYSTEM SERVICES*

*GEOQUÍMICA DE LA AMAZONÍA:
IMPACTOS ANTRÓPICOS E IMPLICACIONES PARA LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS*

Simone Rodrigues Silva¹
Lena Simone Barata Souza²
Jackson Douglas Silva da Paz³

Resumo

Este estudo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a geoquímica da Amazônia, com ênfase na caracterização dos solos, sedimentos e recursos hídricos, nos impactos antrópicos e na relação com os serviços ecossistêmicos. A pesquisa destaca a singularidade das terras pretas de índio, a importância da matéria orgânica na dinâmica geoquímica e os efeitos negativos de atividades humanas, como o desmatamento, as queimadas e a mineração. Os resultados evidenciam a degradação ambiental e seus efeitos na qualidade dos recursos naturais e na oferta de serviços ecossistêmicos, reforçando a necessidade de ações sustentáveis e políticas públicas eficazes para a preservação do bioma. Entre as práticas sustentáveis mais relevantes, destacam-se o manejo adequado do solo, a recuperação de áreas degradadas, o uso de tecnologias limpas na mineração e a promoção de sistemas agroflorestais. Conclui-se que a conservação dos processos geoquímicos é fundamental para garantir a sustentabilidade da Amazônia e reduzir os impactos das ações humanas.

Palavras-chave: terras pretas de índio; alterações ambientais; funções ecológicas; sustentabilidade.

Abstract

This study presents a literature review on the geochemistry of the Amazon, focusing on the characterization of soils, sediments, and water resources, anthropogenic impacts, and their relationship with ecosystem services. The research highlights the uniqueness of Amazonian Dark Earths (Terra Preta de Índio), the importance of organic matter in geochemical dynamics, and the negative effects of human activities such as deforestation, burning, and mining. The findings reveal environmental degradation and its effects on the quality of natural resources and the provision of ecosystem functions, emphasizing the need for sustainable practices and effective public policies to preserve the biome. Among the most relevant sustainable actions are proper soil management, the restoration of degraded areas, the use of clean technologies in mining, and the promotion of agroforestry systems. The study concluded that conserving geochemical processes is essential to ensure the sustainability of the Amazon and to mitigate the impacts of human activities.

Keywords: amazonian dark earths; environmental changes; ecological functions; sustainability.

Resumen

Este estudio presenta una revisión bibliográfica sobre la geoquímica de la Amazonía, con énfasis en la caracterización de los suelos, sedimentos y recursos hídricos, los impactos antrópicos y su relación con los servicios ecossistémicos. La investigación destaca la singularidad de las tierras negras indígenas (Terra Preta de Índio), la importancia de la materia orgánica en la dinámica geoquímica y los efectos negativos de las actividades humanas, como la deforestación, las quemadas y la minería. Los resultados evidencian la degradación ambiental y sus efectos sobre la calidad de los recursos naturales y la provisión de funciones ecossistémicas, lo que refuerza la

¹ Doutora em Química. UFRR - Universidade Federal de Roraima. E-mail: simone.rodrigues@ufrr.br

² Doutora em Geociências. UFRR - Universidade Federal de Roraima. E-mail: lena.barata@ufrr.br

³ Doutor em Geologia e Geoquímica. UFRR - Universidade Federal de Roraima. E-mail: jackson.paz@ufrr.br

necesidad de prácticas sostenibles y políticas públicas eficaces para la preservación del bioma. Entre las prácticas sostenibles más relevantes se destacan el manejo adecuado del suelo, la recuperación de áreas degradadas, el uso de tecnologías limpias en la minería y la promoción de sistemas agroforestales. Se concluye que la conservación de los procesos geoquímicos es fundamental para garantizar la sostenibilidad de la Amazonía y mitigar los impactos de las acciones humanas.

Palabras clave: tierras negras indígenas; cambios ambientales; funciones ecológicas; sostenibilidad.

1 Introdução

A floresta amazônica, considerada o maior bioma tropical contínuo do planeta, ocupa por cerca de 6,7 milhões de km² na América do Sul e abriga uma imensa variedade de ecossistemas. Cerca de 60% dessa cobertura florestal está localizada em território brasileiro, enquanto o restante distribui-se entre outros oito países sul-americanos: Bolívia, Peru, Colômbia, Venezuela, Equador, Guiana, Suriname e Guiana Francesa (Leal Filho *et al.*, 2025).

A região amazônica no Brasil desempenha papel essencial na manutenção do equilíbrio climático global, na regulação do ciclo hidrológico e na preservação da biodiversidade (Souza; Oliveira Junior; Hacon, 2024). Essa vasta área, rica em recursos naturais, é estratégica para estudos ambientais, em especial aqueles voltados a compreender os processos químicos que moldam os diferentes compartimentos ambientais da região (Costa *et al.*, 2024).

Os estudos geoquímicos consistem na investigação detalhada dos processos químicos que regem a distribuição, transformação e mobilização de elementos e compostos no solo, na água e nos sedimentos (Neto; Barreto; Lucas, 2023). Essa área do conhecimento é essencial para compreender as interações naturais e antrópicas que moldam a composição química dos ambientes terrestres e aquáticos, influenciando diretamente a saúde dos ecossistemas e a disponibilidade de recursos naturais (Galvão *et al.*, 2023; Freire *et al.*, 2022).

Na Amazônia brasileira a geoquímica assume um papel estratégico para avaliar tanto os processos naturais que sustentam o equilíbrio ambiental quanto os impactos causados por atividades humanas, como desmatamento, mineração e poluição (Silva Júnior *et al.*, 2024; Aquino; Ribeiro; Pontes, 2024). A análise da composição química de solos, sedimentos e corpos d'água permite identificar indicadores de degradação ambiental, alterações nos ciclos biogeoquímicos, acúmulo de nutrientes e presença de contaminantes, fornecendo bases científicas para o desenvolvimento de estratégias de conservação e de uso sustentável dos recursos naturais (Costa *et al.*, 2024; Sousa; Ranieri, 2024).

No entanto, a Amazônia enfrenta desafios crescentes decorrentes das atividades humanas, tais como desmatamento, mineração, agricultura intensiva e expansão urbana. Essas ações provocam alterações significativas nos sistemas geoquímicos da região, impactando

diretamente a qualidade dos solos, a composição química dos rios e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e terrestres (Silva, 2025). Além disso, o acúmulo de metais pesados em sedimentos e a degradação da matéria orgânica são problemas recorrentes que demandam uma análise científica aprofundada, especialmente considerando os rejeitos gerados por atividades minerárias. Nesse contexto, Araújo *et al.* (2025) demonstraram a viabilidade da síntese de materiais estruturados, como zeólitas, a partir de rejeitos da indústria de bauxita na Amazônia, evidenciando alternativas tecnológicas para o reaproveitamento de resíduos industriais.

A escassez de dados sistemáticos e abrangentes sobre a composição química dos recursos naturais da Amazônia compromete a compreensão dos processos geoquímicos e limita a formulação de políticas públicas eficazes para a conservação e sustentabilidade regional. Essa lacuna se deve, em parte, aos desafios logísticos e ao baixo investimento em pesquisa na região. Torna-se, assim, urgente ampliar o conhecimento sobre a dinâmica geoquímica amazônica para subsidiar a gestão ambiental e a formulação de políticas públicas, especialmente diante das mudanças climáticas e da intensificação das atividades humanas.

Apesar de avanços significativos no mapeamento de solos, sedimentos e recursos hídricos na Amazônia, há uma lacuna quanto à integração desses dados geoquímicos com os impactos antrópicos e as implicações para os serviços ecossistêmicos regionais de forma sistematizada e atualizada (2020–2025). Estudos anteriores tendem a tratar esses temas de forma segmentada, limitando a compreensão integrada dos processos que sustentam a resiliência do bioma frente às pressões humanas e climáticas. Este artigo busca suprir essa lacuna ao realizar uma revisão sistemática que articula a geoquímica da Amazônia com os impactos antrópicos e os serviços ecossistêmicos, contribuindo com subsídios científicos para políticas de conservação ambiental e manejo sustentável na região.

Este artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura científica sobre os processos geoquímicos na Amazônia, com foco na caracterização de solos, sedimentos e recursos hídricos, nos impactos antrópicos e nas implicações para os serviços ecossistêmicos. Como principal avanço, esta pesquisa oferece uma síntese atualizada de estudos recentes (2020–2025), sistematizando evidências científicas que indicam a relação direta entre alterações geoquímicas e perda de serviços ecossistêmicos, o que contribui para subsidiar políticas públicas e estratégias de conservação ambiental na região.

2 Composição geoquímica dos solos e sedimentos amazônicos

A Amazônia é caracterizada por uma ampla diversidade de tipos de solos, sedimentos e recursos hídricos que refletem sua complexidade ecológica e sua importância ambiental global. Dentre os solos, destacam-se as Terras Pretas de Índio (TPI), uma forma única de solo antrópico presente em diversas regiões da Amazônia, marcadas por sua alta fertilidade e estabilidade química (Costa *et al.*, 2023; Negreiros *et al.*, 2020). As TPI apresentam propriedades físico-químicas superiores às dos solos naturais da região, como altos teores de fósforo disponível, cálcio, magnésio, carbono orgânico e maior capacidade de troca catiônica (Silva; Lima; Viana, 2022; Freire *et al.*, 2022; Soares *et al.*, 2022).

A composição geoquímica dos solos e sedimentos amazônicos é resultado de processos naturais e transformações históricas que atuaram ao longo do tempo geológico. Pesquisas sobre depósitos sedimentares pleistoceno-holocenos no sistema fluvial Solimões-Amazonas revelam a evolução desses sedimentos e suas implicações na dinâmica geoquímica regional. A análise da evolução geomorfológica dos rios amazônicos, especialmente no que se refere à incisão e migração de canais durante o Neógeno e Quaternário, também contribui para a compreensão da formação da paisagem atual sob uma perspectiva paleogeográfica (Bezerra *et al.*, 2022).

A composição química também é influenciada pela hidrodinâmica e pela sazonalidade, afetando o transporte de nutrientes e metais durante os períodos de cheia e vazante dos rios amazônicos (Costa *et al.*, 2024; Oliveira; Lopes, 2022). Investigações realizadas em microbacias urbanas e periurbanas da região apontam variações significativas na qualidade da água e nos processos de deposição sedimentar, reforçando a influência de fatores hidroclimáticos e antrópicos sobre os sistemas aquáticos (Batista *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2021; Meireles *et al.*, 2024). A avaliação da qualidade da água da Baía do Guajará por Santos *et al.* (2020) revela padrões de contaminação relacionados à urbanização e à falta de saneamento, ilustrando os desafios enfrentados pelos corpos hídricos amazônicos. Nesse contexto, investigações sobre a fertilidade de solos em ilhas próximas a rios de águas brancas demonstram a relação entre a proximidade dos cursos d'água e a disponibilidade de nutrientes no solo (Ferreira Neto *et al.*, 2021).

Complementarmente, a modelagem do Sistema Aquífero Içá-Solimões evidencia os processos subterrâneos que influenciam a composição da água, estabelecendo conexões entre a dinâmica hidrogeoquímica e os fenômenos superficiais (Galvão *et al.*, 2023). A interação entre matéria orgânica e sedimentos, abordada na caracterização de querogênios da Bacia Amazônica, destaca o papel da matéria orgânica na retenção de nutrientes e contaminantes,

contribuindo para a estabilidade geoquímica (Souza *et al.*, 2021). Adicionalmente, Souza e Rodrigues (2020) aplicaram dados multissensores no mapeamento de ambientes sedimentares da planície do rio Amazonas, revelando padrões de deposição e transporte que influenciam diretamente a composição geoquímica local.

A análise geoquímica também tem sido aplicada ao estudo da relação entre paisagem e hidrogeoquímica em bacias como a do rio Moju, demonstrando como características físico-químicas do ambiente influenciam a qualidade da água (Lima *et al.*, 2023). A geoquímica mineral de elementos estratégicos, avaliada em áreas específicas da região amazônica, amplia o entendimento sobre o potencial geoquímico dos solos em relação aos minerais de interesse econômico (Campos *et al.*, 2023). Nesse contexto, o estudo de Silva e Costa (2020), sobre a gênese do minério de ferro “*soft*” no depósito S11D em Carajás, fornece evidências importantes sobre os processos de formação e enriquecimento mineral na região.

Ainda sobre a fertilidade dos solos amazônicos, evidências científicas demonstram a relevância da adsorção de fósforo em solos argilosos como fator de manutenção da fertilidade e da ciclagem de nutrientes na região (Freire *et al.*, 2022). A aplicação de quimiometria em igarapés industriais de Manaus tem sido empregada para avaliar a contaminação e a poluição em sedimentos, reforçando a necessidade de monitoramento ambiental diante das pressões antrópicas (Lages *et al.*, 2021). Por fim, as Terras Pretas de Índio (TPI) têm sido objeto de investigações sob a perspectiva da geoarqueologia, destacando como práticas de manejo ancestral influenciaram a formação de solos férteis e estáveis no Vale do Baixo Amazonas (Costa *et al.*, 2023). Conjuntamente, essas contribuições reforçam a importância de compreender a composição geoquímica dos solos e sedimentos amazônicos, não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também como subsídio à conservação dos serviços ecossistêmicos e ao manejo sustentável do bioma.

Compreender a composição geoquímica dos solos e sedimentos é fundamental para avaliar como os processos naturais e as pressões antrópicas atuam sobre o equilíbrio do bioma, sendo ponto de partida para discussões sobre impactos e serviços ecossistêmicos na Amazônia.

2.1 Impactos antrópicos e degradação geoquímica na Amazônia

A Amazônia tem sofrido impactos severos devido às atividades humanas, resultando em alterações significativas nos processos geoquímicos da região (Silva Júnior *et al.*, 2024; Dos Santos *et al.*, 2024). Entre esses impactos, destaca-se o desmatamento, associado à perda de cobertura vegetal e ao aumento da erosão do solo, que contribui para o transporte de sedimentos

contendo nutrientes e contaminantes aos cursos d'água. O uso de geotecnologias tem se mostrado eficiente na análise e monitoramento dessas alterações, como evidenciado por Araujo *et al.* (2021), que aplicaram técnicas de sensoriamento remoto para identificar áreas de desmatamento ao longo da aerovia entre Boa Vista e Brasília.

Esses processos afetam a qualidade dos recursos hídricos e a estabilidade dos ecossistemas terrestres e aquáticos, configurando um desafio para a manutenção da integridade ambiental do bioma. Pesquisas como a de Alves *et al.* (2020) demonstram que práticas agrícolas diferenciadas, analisadas por meio de ferramentas multivariadas, geram impactos distintos na estrutura geoquímica do solo, ressaltando a importância do uso sustentável da terra na Amazônia.

As queimadas, frequentemente vinculadas ao desmatamento, também contribuem para as alterações geoquímicas, elevando as emissões de carbono para a atmosfera e modificando a composição química do solo. Fatores como o aumento da temperatura do solo e a redução da umidade associam-se a essas alterações, comprometendo processos naturais de regulação ecológica (Gomes *et al.*, 2023). Além disso, modificações nos fluxos de água e nutrientes têm sido identificadas em áreas convertidas em pastagens, o que influencia a dinâmica hidrobiogeoquímica local e afeta a disponibilidade de nutrientes nos ambientes aquáticos e terrestres (De Paula *et al.*, 2025). Esses aspectos reforçam a necessidade de compreender a relação entre queimadas e processos geoquímicos na região, considerando os riscos para a resiliência dos ecossistemas amazônicos. A vulnerabilidade ambiental frente aos processos erosivos em bacias hidrográficas da Amazônia Oriental também tem sido destacada como fator de intensificação da perda de solo e transporte de sedimentos, com implicações para a geoquímica local (Fushimi; Ribeiro; Nunes, 2022; Furtado *et al.*, 2022).

Outro ponto relevante refere-se à presença de metais pesados nos sedimentos em áreas sob influência de atividades de mineração, uma prática historicamente realizada na Amazônia e que contribui para a poluição química de ambientes aquáticos e terrestres. Essa situação tem se intensificado devido à crescente extração de minerais, incluindo o mercúrio utilizado na mineração aurífera e outros elementos essenciais para setores industriais (Moulatlet *et al.*, 2023). Investigações recentes indicam ainda a presença de contaminação geoquímica por fontes difusas em áreas urbanas, revelando padrões de acúmulo de elementos como ferro e alumínio em rios e estuários (Negrilo *et al.*, 2024; Cabral *et al.*, 2023).

A bioacumulação de metais pesados, como mercúrio e chumbo presentes nos sedimentos, levanta preocupações relacionadas ao potencial de bioacumulação na cadeia alimentar, configurando um fator de risco para a biodiversidade e a saúde das populações locais

(Quintarelli *et al.*, 2024). Casos de bioacumulação de mercúrio em peixes e risco alimentar em comunidades amazônicas já foram reportados em áreas indígenas e ribeirinhas, com implicações sérias para a segurança alimentar e saúde pública (Panduro *et al.*, 2020). De forma complementar, Sousa *et al.* (2022) analisaram a concentração de macroelementos em peixes da Região de Integração de Carajás, reforçando a importância do monitoramento geoquímico da fauna aquática como indicador de qualidade ambiental e saúde pública. Além disso, Rosa e Weihs (2021) analisaram o impacto do garimpo de ouro sobre agricultores familiares na Amazônia mato-grossense, evidenciando o legado de risco à saúde e degradação ambiental associados à mineração informal.

Registros de contaminação em áreas industriais indicam a presença de elementos como alumínio, bário e ferro em ambientes aquáticos, evidenciando os impactos ambientais relacionados às atividades antrópicas na região (Oliveira *et al.*, 2020). Métodos como a análise fatorial vêm sendo empregados para caracterizar a qualidade da água e sua correlação com a atividade industrial e portuária, conforme demonstrado em pesquisas aplicadas à zona portuária de Belém (Oliveira *et al.*, 2021). Já em áreas rurais, o uso de índices específicos tem auxiliado no diagnóstico da água subterrânea para irrigação (Nascimento *et al.*, 2022). Esses elementos ilustram a complexidade dos desafios impostos pela contaminação geoquímica e pela dispersão de poluentes em ambientes amazônicos.

As terras indígenas na Amazônia, historicamente reconhecidas como barreiras de proteção ambiental, também enfrentam ameaças devido ao avanço de práticas agrícolas intensivas e atividades econômicas ilegais (Oviedo; Senra, 2023; Aquino; Ribeiro; Pontes, 2024). Além disso, análises geoquímicas de sedimentos em áreas sob influência de estações de tratamento de esgoto mostram alterações na composição química da água e riscos associados ao uso não planejado do solo urbano (Nascimento *et al.*, 2021).

Tais ameaças se relacionam não apenas à degradação da qualidade dos solos e recursos hídricos, mas também ao modo de vida das comunidades que dependem do uso sustentável desses recursos. Pesquisas têm indicado que o uso inadequado de fertilizantes e pesticidas pode contribuir para o empobrecimento dos solos e a contaminação dos corpos hídricos, afetando diretamente a integridade dos ciclos naturais e a sustentabilidade das práticas tradicionais de manejo (Rorato *et al.*, 2021). Esses elementos apontam a relevância de fortalecer estratégias de gestão sustentável e de proteção das áreas de preservação ambiental e das terras indígenas, visando garantir a conservação dos ecossistemas e a manutenção das formas de vida tradicionais na Amazônia.

Resumidamente, os impactos incluem contaminação por metais pesados devido à mineração, alterações químicas por desmatamento e queimadas, e contaminação difusa por pesticidas, comprometendo a resiliência geoquímica do bioma.

2.2 Serviços ecossistêmicos e a geoquímica na preservação da Amazônia

A Amazônia desempenha papel central na oferta de serviços ecossistêmicos, como regulação climática, sequestro de carbono, manutenção da biodiversidade e purificação da água, os quais dependem diretamente da dinâmica geoquímica de seus solos, sedimentos e recursos hídricos (Souza; Oliveira Junior; Hacon, 2024; Leal Filho *et al.*, 2025).

Por exemplo, solos com alta concentração de matéria orgânica e boa capacidade de retenção de nutrientes contribuem para o crescimento da vegetação e para a estabilidade dos ecossistemas, além de armazenarem carbono atmosférico de forma eficaz (Danielson; Rodrigues, 2022). Já os rios amazônicos, com suas redes de drenagem extensas e dinâmicas, distribuem nutrientes ao longo de grandes distâncias, conectando ambientes terrestres e aquáticos. Esse transporte é especialmente evidente nas águas ricas em sedimentos e matéria orgânica que escoam do interior da floresta até as regiões costeiras, como se observa no rio Amazonas (Drake *et al.*, 2021; Louchard; Gruber; Munnich, 2021). A influência da chemodiversidade da matéria orgânica dissolvida no solo e na água em áreas de desmatamento reforça a importância da proteção da cobertura vegetal para manter os processos geoquímicos responsáveis pela provisão de serviços ecossistêmicos (Souza *et al.*, 2024).

A interação entre os rios e as planícies de inundação, por sua vez, favorece a fertilidade dos solos em ilhas fluviais, que apresentam maior disponibilidade de nutrientes em função da proximidade com rios de águas brancas (Ferreira Neto *et al.*, 2021). Nessas áreas, a ciclagem geoquímica é favorecida pela deposição periódica de sedimentos e pela elevada produtividade dos ecossistemas. A própria formação da paisagem amazônica está relacionada a esses processos, uma vez que os fluxos de sedimentos e nutrientes provenientes dos Andes percorrem longas distâncias até atingir o oceano Atlântico, modificando a composição geoquímica dos ambientes ao longo do caminho (Nittrouer *et al.*, 2021; Narayanan; Cohen; Gardner, 2024).

A preservação dessas funções depende diretamente da integridade dos ciclos geoquímicos, os quais são sensíveis a alterações antrópicas. A substituição da vegetação nativa por pastagens, por exemplo, modifica a composição química da água dos rios e reduz a eficiência dos processos de retenção de nutrientes (De Paula *et al.*, 2025). De modo semelhante, o desmatamento e a mineração alteram a estrutura dos solos e aumentam a carga de metais

pesados nos sedimentos, como o mercúrio e o chumbo, com sérios impactos para a biodiversidade e a saúde humana (Moulatlet *et al.*, 2025; Quintarelli *et al.*, 2024).

As áreas protegidas da Amazônia Legal desempenham papel importante ao limitar essas pressões, atuando como barreiras contra a degradação ambiental e auxiliando na manutenção dos serviços ecossistêmicos. Ao restringirem o avanço do desmatamento e da mineração, essas áreas favorecem a continuidade dos processos naturais que sustentam o funcionamento do bioma (Zanin *et al.*, 2024; Santos; Liviz, 2024; Pereira; Ferreira, 2021). Compreender a relação entre geoquímica e serviços ecossistêmicos é essencial para estratégias de conservação da Amazônia, assegurando os benefícios que esse bioma oferece às populações locais e ao planeta.

Dessa forma, o monitoramento dos processos geoquímicos na Amazônia torna-se uma ferramenta essencial para avaliar a saúde dos ecossistemas e a continuidade dos serviços ecossistêmicos, funcionando como indicador das pressões antrópicas e das alterações ambientais em curso. Integrar informações geoquímicas ao planejamento ambiental permitirá traçar estratégias de conservação mais eficazes e promover políticas públicas voltadas à resiliência do bioma frente às mudanças climáticas e às atividades humanas.

3 Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura científica sobre os processos geoquímicos na região amazônica. A busca foi realizada por meio da plataforma Google Acadêmico, utilizando exclusivamente o descritor ‘geoquímica da Amazônia’. Foram incluídos artigos publicados entre os anos de 2020 e 2025, nos idiomas português, inglês e espanhol. Os critérios de inclusão abrangeram publicações com foco na geoquímica de solos, sedimentos e recursos hídricos da Amazônia, que também discutissem impactos antrópicos (como desmatamento, queimadas e mineração) ou as interações entre processos geoquímicos e serviços ecossistêmicos.

Optou-se pelo uso do Google Acadêmico por sua ampla cobertura e acesso aberto, que permite o rastreamento de artigos científicos de diferentes bases e editoras, inclusive aquelas com foco em publicações brasileiras e latino-americanas. Para assegurar o rigor metodológico, foram considerados apenas documentos científicos com registro formal de DOI ou ISSN, garantindo a rastreabilidade e a validade editorial das fontes. Teses, dissertações, relatórios técnicos, documentos institucionais e publicações sem revisão por pares foram excluídos. Reconhece-se que outras bases, como Scopus, Web of Science ou SciElo, poderiam

complementar a abrangência, mas a estratégia adotada privilegiou a especificidade temática, a reprodutibilidade e o foco na produção científica revisada por pares.

O processo de seleção seguiu as etapas recomendadas para revisões sistemáticas: identificação dos registros, triagem inicial por título e resumo e, posteriormente, leitura completa dos textos para confirmar a elegibilidade conforme os critérios estabelecidos. Ao final do processo, 73 artigos científicos foram selecionados para compor o *corpus* da análise.

Os artigos foram organizados segundo três eixos analíticos principais: (i) caracterização geoquímica dos solos, sedimentos e recursos hídricos; (ii) impactos antrópicos nos processos geoquímicos; e (iii) implicações para os serviços ecossistêmicos da região amazônica. A análise dos dados foi de natureza qualitativa, buscando sintetizar os principais achados, mapear lacunas no conhecimento científico atual e indicar caminhos para pesquisas futuras voltadas à sustentabilidade e à conservação ambiental da Amazônia.

4 Resultados e discussão

Esta seção apresenta a síntese, análise e discussão crítica dos principais achados extraídos da revisão sistemática da literatura sobre geoquímica na Amazônia, de forma alinhada ao objetivo de compreender a relação entre processos geoquímicos, impactos antrópicos e serviços ecossistêmicos, visando subsidiar estratégias de conservação e políticas públicas.

Na primeira etapa, referente à caracterização geoquímica, Quadro 1, os estudos revisados descrevem elevada heterogeneidade e complexidade dos solos, sedimentos e recursos hídricos da região amazônica. Andrade *et al.* (2021) abordam a ampla geodiversidade da Amazônia Legal, destacando variações significativas nas propriedades químicas e mineralógicas. Costa *et al.* (2023) e Soares *et al.* (2022) apontam altos estoques de carbono orgânico e nitrogênio em antrossolos e solos antrópicos, associados à persistência de matéria orgânica estável e ao uso histórico do solo.

Freire *et al.* (2022) demonstram que a adsorção de fósforo em solos argilosos é fundamental para a retenção de nutrientes e a manutenção da fertilidade. No entanto, enquanto esse processo é amplamente estudado em solos de uso agrícola, observa-se uma lacuna na compreensão de como a atividade antrópica recente, como queimadas e aplicação de agroquímicos, interfere nesse mecanismo de adsorção. Comparado a estudos como os de Soares *et al.* (2022), que enfocam solos antrópicos como as Terras Pretas de Índio, percebe-se um contraste entre solos formados por práticas tradicionais sustentáveis e aqueles impactados por técnicas agrícolas modernas, o que reforça a necessidade de estudos comparativos de longo prazo.

Em relação aos sedimentos, Costa *et al.* (2024) e Oliveira e Lopes (2022) demonstram que sua composição química é influenciada por processos hidrológicos, bem como por variações espaciais e sazonais, que afetam diretamente os ciclos biogeoquímicos locais. Passos *et al.* (2020), ao investigar depósitos sedimentares pleistoceno-holocenos, fornecem perspectiva temporal sobre a evolução geoquímica dos sedimentos fluviais. Essa perspectiva é ampliada por estudos de paleovegetação e clima quaternário em lagos de altitude na Amazônia Sudeste, os quais revelam alterações significativas no regime hidrológico e nos padrões de vegetação ao longo do tempo (Da Silva *et al.*, 2023; Guimarães *et al.*, 2023). Métodos estatísticos multivariados também têm sido aplicados para avaliar relações entre fontes geoquímicas e depósitos lacustres em bacias fechadas da região (Moraes *et al.*, 2020).

A hidrogeoquímica dos aquíferos é abordada por Galvão *et al.* (2023), que, por meio de modelagens do sistema aquífero Içá-Solimões, elucidam processos subterrâneos que influenciam a composição da água. Adicionalmente, Viel, Nascimento e Fenzl (2024) avaliaram a qualidade da água do Aquífero Alter do Chão, destacando preocupações sobre sua potabilidade e importância para comunidades rurais do oeste do Pará. Souza *et al.* (2021) caracterizam os querogênios presentes na Bacia Amazônica, com ênfase no papel da matéria orgânica nos processos geoquímicos regionais.

As pesquisas reunidas nesta etapa indicam que a diversidade geológica, a dinâmica hidrológica e os usos históricos do solo contribuem para a variabilidade geoquímica observada na região, fornecendo subsídios relevantes para o entendimento dos processos naturais e para o planejamento de ações de monitoramento e conservação. A geomorfologia regional também desempenha papel crucial no planejamento ambiental, especialmente em áreas estratégicas da Amazônia, onde a geodiversidade influencia diretamente os processos geoquímicos e o ordenamento territorial (De Cortes; Szlafsztein; Luvizotto, 2020).

Quadro 1: Principais estudos sobre caracterização geoquímica na região amazônica (2020-2025)

Autores	Tema
Andrade <i>et al.</i> , 2021	Estado da arte da geodiversidade da Amazônia Legal
Araújo <i>et al.</i> , 2025	Síntese e caracterização de zeólita a partir de rejeito de mineração
Batista <i>et al.</i> , 2022	Avaliação da qualidade da água superficial em microbacia periurbana
Bezerra <i>et al.</i> , 2022	Incisão e aglutinação do rio Amazonas no Quaternário
Cabral <i>et al.</i> , 2023	Aspectos geofísicos da dinâmica dos rios em áreas urbanas
Campos <i>et al.</i> , 2023	Geoquímica mineral de elementos estratégicos, região Amazonas, Peru
Costa <i>et al.</i> , 2021	Efeito da sazonalidade na qualidade da água do rio Guamá, Belém
Costa <i>et al.</i> , 2023	Geoarqueologia de antrossolos no Vale do Baixo Amazonas
Costa <i>et al.</i> , 2024	Análise geoquímica de sedimentos de microbacia urbana amazônica
Da Silva <i>et al.</i> , 2023	Mudanças hidroclimáticas e vegetacionais no Quaternário tardio
De Cortes; Szlafsztein; Luvizotto, 2020	Geomorfologia e planejamento ambiental em região estratégica amazônica

Geoquímica da Amazônia:
impactos antrópicos e implicações para os serviços ecossistêmicos

Autores	Tema
De Paula <i>et al.</i> , 2025	Impactos da conversão de floresta para pastagens na biogeoquímica da água em riachos na Amazônia ocidental
Drake <i>et al.</i> , 2021	Fluxos de carbono orgânico dissolvido e nutrientes no rio Amazonas
Ferreira Neto <i>et al.</i> , 2021	Fertilidade do solo em ilhas fluviais e proximidade com rios de água branca amazônicos
Figueiredo; Cak; Markewitz, 2020	Impactos agrícolas nos ciclos hidrobiogeoquímicos na Amazônia e possíveis soluções
Freire <i>et al.</i> , 2022	Adsorção de fosfato em solos argilosos na Amazônia
Galvão <i>et al.</i> , 2023	Modelagem numérica do sistema aquífero Içá-Solimões
Gautheron <i>et al.</i> , 2022	Intemperismo cenozoico e limites biogeográficos na Amazônia Central
Guimarães <i>et al.</i> , 2023	Mudanças no clima e paisagem na Amazônia Sudeste
Silva Júnior <i>et al.</i> , 2024	Estoques de carbono acima do solo na Amazônia Maranhense
Lages <i>et al.</i> , 2021	Quimiometria na avaliação química do igarapé industrial em Manaus
Lima <i>et al.</i> , 2023	Relação entre paisagem e hidrogeoquímica da bacia do rio Moju
Louchard; Gruber; Munnich, 2021	Influência da Amazônia no balanço de CO ₂ oceano-atmosfera no Atlântico Tropical Ocidental
Meireles <i>et al.</i> , 2024	Avaliação da qualidade da água da Baía do Portel e Rio Camarapi
Moraes <i>et al.</i> , 2020	Estatísticas multivariadas para entender relação fonte-sumidouro em lagos
Narayanan; Cohen; Gardner, 2024	Resposta dos sedimentos fluviais ao desmatamento na bacia amazônica
Nascimento <i>et al.</i> , 2022	Índice de qualidade da água subterrânea para irrigação na Amazônia Oriental
Negreiros <i>et al.</i> , 2020	Caracterização mineralógica de terra preta nas comunidades do Marajó
Negrilo <i>et al.</i> , 2024	Uso de esteróis como marcadores geoquímicos de contaminação aquática
Neto; Barreto; Lucas, 2023	Geoquímica da paisagem e estruturação de geossistemas em bacias cristalinas
Nittrouer <i>et al.</i> , 2021	Transporte e acumulação de sedimentos na Amazônia: processos fluviais e marinhos
Oliveira <i>et al.</i> , 2020	Risco toxicológico por ingestão de metais em comunidades próximas a áreas industriais
Oliveira <i>et al.</i> , 2021	Indicador da qualidade da água na zona portuária de Belém
Oliveira; Lopes, 2022	Avaliação geoquímica em águas superficiais e sedimentos fluviais
Passos <i>et al.</i> , 2020	Depósitos sedimentares pleistoceno-holoceno no sistema fluvial Solimões-Amazonas
Quintarelli <i>et al.</i> , 2024	Mercúrio em rios impactados pela mineração artesanal no Alto Rio Madeira
Santos <i>et al.</i> , 2020	Avaliação da qualidade da água da Baía do Guajará, Belém
Silva; Costa, 2020	Genesis de minério de ferro “macio” em Carajás, Amazônia
Silva; Lima; Viana, 2022	Aspectos geoquímicos de antrossolos do baixo Amazonas
Soares <i>et al.</i> , 2022	Estoques de carbono e nitrogênio em solos antrópicos e naturais da Amazônia
Sousa; Ranieri, 2024	Morfodinâmica de praias estuarinas na costa da Ilha do Marajó
Souza <i>et al.</i> , 2021	Caracterização geoquímica de querogênios na Bacia Amazonas
Souza <i>et al.</i> , 2024	Chemodiversidade da matéria orgânica do solo influenciada pelo desmatamento
Souza; Rodrigues, 2020	Reconhecimento e mapeamento de ambientes sedimentares na planície do Rio Amazonas
Viel; Nascimento; Fenzl, 2024	Qualidade da água do Aquífero Alter do Chão, oeste do Pará

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Na segunda etapa, que abordou os impactos antrópicos e a degradação geoquímica (Quadro 2), a revisão evidenciou que as atividades humanas causam alterações substanciais nos solos, sedimentos e recursos hídricos da Amazônia. Belato *et al.* (2022) analisaram o avanço dos focos de calor e as mudanças no uso e cobertura do solo em Viseu/PA, identificando a conversão de áreas florestais em pastagens e monoculturas, favorecendo processos erosivos e

o empobrecimento do solo. Gomes *et al.* (2023) confirmaram que a intensificação das queimadas em ecossistemas periurbanos do sudoeste amazônico está relacionada a variações de precipitação, resultando na liberação massiva de carbono e na degradação da matéria orgânica do solo. Quanto à mineração, Aquino, Ribeiro e Pontes (2024) mapearam pressões sobre terras indígenas decorrentes da extração mineral, revelando aumento de 150% em cinco anos na sobreposição entre requerimentos minerários e terras tradicionalmente ocupadas.

Os dados de Noronha Filho *et al.* (2021) sobre mercúrio em sedimentos da REBIO Trombetas revelam não apenas um cenário alarmante de contaminação (superior a 1,0 mg/kg), mas também expõem a ineficácia das atuais políticas de controle ambiental sobre a mineração informal. Em comparação, Moulatlet *et al.* (2025) reforçam que a presença de metais pesados é um problema recorrente em diversas sub-bacias da Amazônia, mas com respostas institucionais muito desiguais entre as regiões. Isso indica uma fragilidade na atuação das políticas públicas de fiscalização e aponta a necessidade de estratégias diferenciadas para áreas protegidas *versus* áreas de fronteira agrícola.

A degradação de territórios indígenas foi abordada por Oviedo e Senra (2023), que mostraram que o garimpo ilegal impactou 19 Terras Indígenas entre 2020 e 2023, com perda direta de mais de 28 mil hectares de vegetação nativa. Rorato *et al.* (2021) reforçam que tais práticas afetam ciclos geoquímicos e desestruturam modos de vida baseados no extrativismo sustentável e no uso tradicional do solo.

Os efeitos sobre a biodiversidade são também preocupantes. Quintarelli *et al.* (2024) relataram concentrações elevadas de mercúrio no Alto Rio Madeira, com impactos diretos sobre populações de peixes comerciais, afetando cadeias alimentares e a economia pesqueira local. Melo e Benchimol (2024) analisaram a produção científica sobre envenenamento por mercúrio e identificaram aumento nos relatos de intoxicação humana, sobretudo entre ribeirinhos e indígenas.

Esses achados indicam que a integridade geoquímica do bioma está comprometida, com efeitos cumulativos sobre a biodiversidade, a funcionalidade dos ecossistemas e os modos de vida amazônicos. Além disso, há indícios de que processos intempéricos de longa duração nas planícies fluviais contribuíram para a formação de limites biogeográficos na Amazônia Central, moldando sua diversidade ecológica atual (Gautheron *et al.*, 2022). A perda da qualidade dos solos e da água impacta diretamente a produtividade agrícola local, o extrativismo vegetal e a segurança alimentar. Tais processos reforçam a necessidade de políticas públicas eficazes que considerem a interdependência entre os sistemas geoquímicos e os usos sociais e ecológicos da terra na Amazônia. A perda de fertilidade do solo devido à erosão e ao esgotamento de nutrientes, aliada à contaminação geoquímica por metais pesados e pesticidas, afeta diretamente

a agricultura de subsistência praticada por agricultores familiares na região amazônica. Essa situação compromete a produtividade de cultivos essenciais, como mandioca e hortaliças, reduzindo a renda das famílias e elevando a insegurança alimentar em áreas rurais.

Os dados revisados indicam que a contaminação por mercúrio e outros metais pesados em ambientes aquáticos amazônicos impacta diretamente comunidades indígenas e ribeirinhas, afetando a pesca, principal fonte de proteína e renda local, e gerando custos com saúde pública em virtude de intoxicações por metais pesados. Essa contaminação compromete a segurança alimentar e agrava a vulnerabilidade socioeconômica dessas comunidades, que enfrentam dificuldades adicionais para manter práticas tradicionais de subsistência diante do avanço das pressões antrópicas, configurando um ciclo de injustiça ambiental ligado diretamente à degradação geoquímica.

Quadro 2: Principais referências sobre impactos antrópicos e degradação geoquímica na Amazônia (2020–2025)

Autores	Tema
Alves <i>et al.</i> , 2020	Diagnóstico de áreas agrícolas sob diferentes usos e manejos
Aquino; Ribeiro; Pontes, 2024	Pressões em terras indígenas pela mineração na Amazônia
Araújo <i>et al.</i> , 2021	Geotecnologia aplicada ao desmatamento
Belato <i>et al.</i> , 2022	Focos de calor e uso e cobertura do solo em Viseu/PA
Danielson; Rodrigues, 2022	Uso da terra e impactos nas comunidades microbianas do solo
De Paula <i>et al.</i> , 2025	Impactos da conversão de floresta para pastagens na biogeoquímica da água em riachos na Amazônia ocidental
Dias <i>et al.</i> , 2024	História geoecológica e biogeográfica da Amazônia no Antropoceno
Figueiredo; Cak; Markewitz, 2020	Impactos agrícolas nos ciclos hidrobiogeoquímicos na Amazônia e possíveis soluções
Filho <i>et al.</i> , 2025	Gestão dos serviços ecossistêmicos na Amazônia e influência do desmatamento
Furtado <i>et al.</i> , 2022	Fragilidade e integridade do uso da terra na bacia do Rio Murucupi
Fushimi; Ribeiro; Nunes, 2022	Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos em bacia hidrográfica
Gomes <i>et al.</i> , 2023	Precipitação e incêndios em ecossistemas periurbanos no sudoeste amazônico
Leal Filho <i>et al.</i> , 2025	Gestão dos serviços ecossistêmicos no contexto da degradação florestal amazônica
Melo, Benchimol, 2024	Produção científica sobre envenenamento por mercúrio na Amazônia
Moulatlet <i>et al.</i> , 2025	Riscos à biodiversidade amazônica pela contaminação por metais devido à mineração
Narayanan; Cohen; Gardner, 2024	Resposta dos sedimentos fluviais ao desmatamento na bacia amazônica
Nascimento <i>et al.</i> , 2021	Qualidade da água sob influência de estação de esgoto
Noronha Filho <i>et al.</i> , 2021	Acúmulo de mercúrio em sedimentos na REBIO Trombetas
Oliveira <i>et al.</i> , 2020	Risco toxicológico por ingestão de metais em comunidades próximas a áreas industriais
Oviedo; Senra, 2023	Mudança na trajetória de degradação causada por garimpo em Terras Indígenas
Panduro <i>et al.</i> , 2020	Bioacumulação de mercúrio em peixes e risco à saúde
Pereira; Ferreira, 2021	Eficácia das áreas protegidas no controle do desmatamento na Amazônia Legal
Quintarelli <i>et al.</i> , 2024	Mercúrio em rios impactados pela mineração artesanal no Alto Rio Madeira
Rorato <i>et al.</i> , 2021	Ameaças ambientais às Terras Indígenas na Amazônia
Rosa; Weihs, 2021	Garimpo de ouro e riscos à saúde de agricultores
Santos; Liviz, 2024	Papel das áreas protegidas no combate ao desmatamento na Amazônia

Autores	Tema
Silva, 2025. Souza <i>et al.</i> , 2022	Dinâmicas territoriais e conflitos agrários na Amazônia: revisão Macroelementos em peixes de rios da Amazônia Oriental
Souza <i>et al.</i> , 2024	Chemodiversidade da matéria orgânica do solo influenciada pelo desmatamento

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Na etapa que relacionou os serviços ecossistêmicos à geoquímica, Quadro 3, os resultados demonstraram que a manutenção desses serviços está diretamente vinculada à integridade dos processos geoquímicos na região amazônica. Estudos de Souza, Oliveira Júnior e Hacon (2024) ressaltam a importância das áreas protegidas e da conservação ambiental para a sustentação dos ciclos naturais e dos serviços ecossistêmicos, como regulação climática, fertilidade do solo e sequestro de carbono.

Ferreira Neto *et al.* (2021) e Louchard, Gruber e Munnich (2021) destacam o papel dos estoques de carbono em solos e florestas amazônicas, evidenciando sua influência no balanço de CO₂ entre oceano e atmosfera, fundamental para a mitigação das mudanças climáticas. Filho *et al.* (2025) e Leal Filho *et al.* (2025) enfatizam a necessidade de gestão integrada dos serviços ecossistêmicos diante da degradação florestal e dos impactos do desmatamento.

A contaminação por metais, conforme indicado por Moulatlet *et al.* (2025), compromete diretamente a funcionalidade dos serviços ecossistêmicos, como a purificação da água e o sequestro de carbono. Ainda assim, o impacto varia consideravelmente conforme o tipo de governança ambiental local. Enquanto Pereira e Ferreira (2021) apontam que áreas protegidas legalmente reconhecidas conseguem mitigar parcialmente esses efeitos, estudos como os de Oviedo e Senra (2023) demonstram que, em territórios indígenas, a ausência de apoio institucional e proteção efetiva torna a vulnerabilidade muito maior. Essa divergência revela uma falha de articulação entre os marcos legais de proteção ambiental e sua efetiva implementação.

A análise integrada indica que a preservação da geoquímica dos solos, sedimentos e recursos hídricos é essencial para garantir a resiliência do bioma amazônico, sustentando tanto seus processos naturais quanto as comunidades humanas que dele dependem. No entanto, observa-se uma lacuna de governança na integração do monitoramento geoquímico com políticas públicas, dificultando o controle eficaz da contaminação por metais pesados e o avanço de atividades minerárias ilegais, o que compromete os esforços de conservação ambiental na região.

Embora se reconheça que a degradação dos serviços ecossistêmicos afete a economia local e a subsistência de comunidades amazônicas, os estudos revisados apresentam abordagens variadas quanto à intensidade desses impactos. Por exemplo, Figueiredo, Cak e Markewitz (2020) sugerem que a agricultura familiar ainda mantém certa resiliência em áreas com menor pressão

fundiária, enquanto Leal Filho *et al.* (2025) enfatizam que mesmo pequenas alterações no uso da terra já comprometem serviços como a regulação climática e a fertilidade do solo. Essa divergência sinaliza a importância de considerar variáveis locais, como pressão fundiária, tipo de solo, acesso a políticas públicas e capacidade organizativa das comunidades, visto que o grau de vulnerabilidade socioambiental é diretamente influenciado por fatores territoriais e institucionais.

O comprometimento da qualidade da água e do solo reduz a disponibilidade de recursos naturais, aumentando os custos de produção e diminuindo a resiliência econômica frente às pressões ambientais. Ademais, é fundamental fortalecer a ciência participativa e os sistemas de monitoramento conduzidos por comunidades locais, que possuem conhecimento empírico sobre as mudanças ambientais em seus territórios e podem contribuir para uma gestão mais sensível às realidades socioculturais da Amazônia.

Quadro 3: Estudos sobre implicações da geoquímica para os serviços ecossistêmicos na Amazônia (2020–2025)

Autores	Tema
Souza; Oliveira Junior; Hacon, 2024	Serviços ecossistêmicos na Amazônia brasileira
Dos Santos <i>et al.</i> 2024	Mudança no uso da terra e efeitos nos serviços ecossistêmicos em Juína
Dias <i>et al.</i> , 2024	História geoecológica e biogeográfica da Amazônia no Antropoceno
Drake <i>et al.</i> , 2021	Fluxos de carbono orgânico dissolvido e nutrientes no rio Amazonas
Ferreira Neto <i>et al.</i> , 2021	Fertilidade do solo em ilhas fluviais e proximidade com rios de água branca amazônicos
Silva Júnior <i>et al.</i> , 2024	Estoques de carbono acima do solo na Amazônia Maranhense
Leal Filho <i>et al.</i> , 2025	Gestão dos serviços ecossistêmicos no contexto da degradação florestal amazônica
Louchard; Gruber; Munnich, 2021	Influência da Amazônia no balanço de CO ₂ oceano-atmosfera no Atlântico Tropical Ocidental
Moulatlet <i>et al.</i> , 2025	Riscos à biodiversidade amazônica pela contaminação por metais devido à mineração
Nittrouer <i>et al.</i> , 2021	Transporte e acumulação de sedimentos na Amazônia: processos fluviais e marinhos
Pereira; Ferreira, 2021	Eficácia das áreas protegidas no controle do desmatamento na Amazônia Legal
Santos; Liviz, 2024	Papel das áreas protegidas no combate ao desmatamento na Amazônia
Zanin <i>et al.</i> , 2024	As áreas protegidas melhoram a qualidade da água superficial na Amazônia?

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Apesar do avanço no mapeamento dos processos geoquímicos na Amazônia, os resultados indicam que ainda há lacunas significativas na compreensão integrada entre as alterações químicas provocadas pelas atividades humanas e a resiliência dos serviços ecossistêmicos, sobretudo pela ausência de séries temporais longas, metodologias padronizadas e pela fragmentação de dados entre instituições de pesquisa e órgãos governamentais.

A heterogeneidade metodológica dos estudos dificulta a comparação de resultados entre sub-regiões amazônicas, limitando a formulação de estratégias de gestão ambiental de base geoquímica. Observa-se que serviços como a regulação climática, o sequestro de carbono e a

manutenção da qualidade da água estão particularmente vulneráveis às alterações nos ciclos geoquímicos, intensificadas pelo avanço do desmatamento e da mineração, além do uso intensivo de agroquímicos. O Fluxograma 1 sistematiza essas relações, evidenciando como diferentes atividades antrópicas alteram processos geoquímicos e afetam os serviços ecossistêmicos essenciais à resiliência socioambiental da Amazônia.

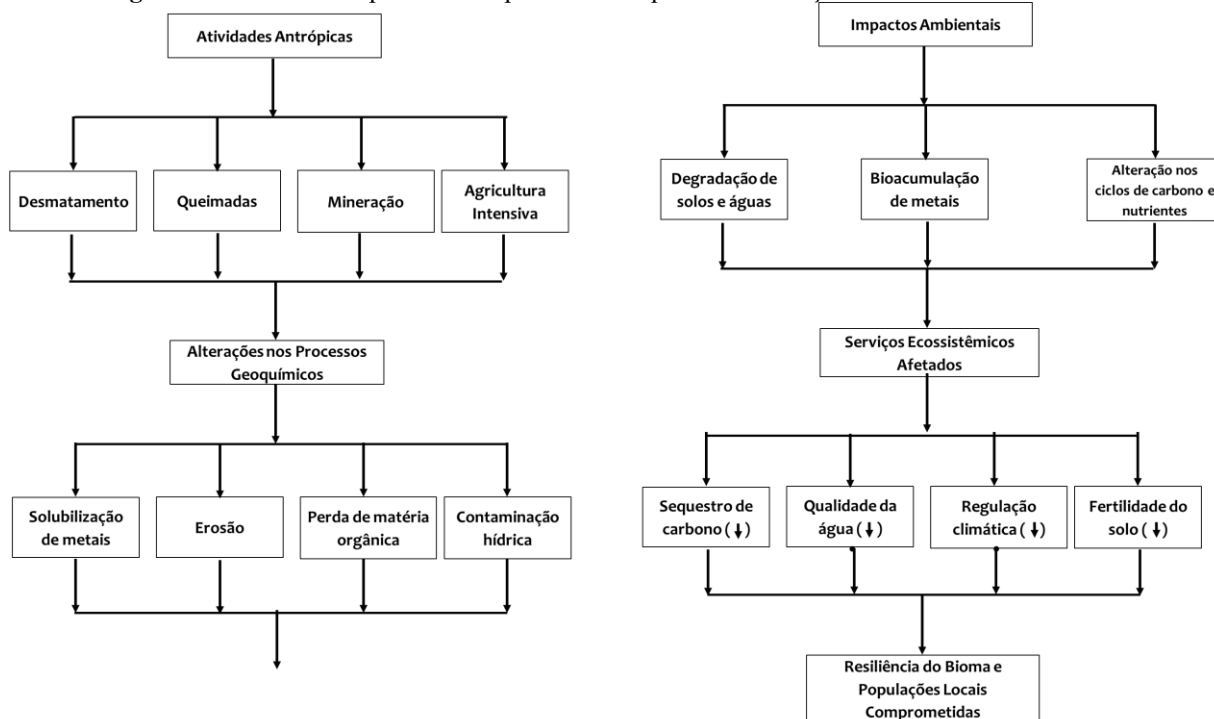
Assim, os resultados desta revisão destacam que a geoquímica amazônica não é apenas uma dimensão ambiental, mas também social e econômica, profundamente interligada ao cotidiano das comunidades que dependem da integridade dos ecossistemas para garantir alimentação, renda e saúde. Dessa forma, a manutenção dos processos geoquímicos é um pilar para o desenvolvimento sustentável da Amazônia, reforçando a necessidade de políticas públicas integradas que aliem conservação ambiental, monitoramento geoquímico e promoção de justiça social. Recomenda-se a implementação de programas específicos de fiscalização minerária em áreas críticas, incentivo à adoção de sistemas agroflorestais como forma de uso sustentável do solo e a criação de redes de monitoramento comunitário, que incluam as populações locais na coleta e acompanhamento de dados geoquímicos, fortalecendo a governança participativa.

A análise evidencia também que políticas públicas ainda não incorporam de forma sistemática o monitoramento geoquímico como indicador de sustentabilidade e saúde ambiental, o que fragiliza a gestão territorial e dificulta a identificação de áreas prioritárias para conservação. A integração de dados geoquímicos ao monitoramento ambiental e à formulação de políticas públicas é fundamental não apenas para a conservação dos serviços ecossistêmicos, mas também para a promoção da justiça ambiental, garantindo os direitos territoriais, a soberania alimentar e o bem-estar das comunidades tradicionais que dependem dos recursos naturais da Amazônia. Nesse contexto, torna-se urgente priorizar áreas de alta vulnerabilidade para ações de recuperação ambiental, implantar fiscalização minerária mais rigorosa e fomentar práticas produtivas de baixo impacto, assegurando o equilíbrio entre conservação ambiental e necessidades socioeconômicas locais.

A ausência de dados integrados sobre os fluxos de metais pesados, nutrientes e carbono entre sistemas terrestres e aquáticos na Amazônia limita o entendimento sobre as relações de equilíbrio e de compensação entre conservação e desenvolvimento econômico, elementos essenciais para o planejamento de políticas alinhadas às metas climáticas e de biodiversidade. Nesse sentido, a integração de dados geoquímicos ao monitoramento ambiental pode funcionar como ferramenta estratégica para avaliar a eficácia de áreas protegidas e fortalecer políticas de conservação e manejo sustentável, reforçando a importância da geoquímica como pilar da

resiliência do bioma amazônico frente às pressões antrópicas e às mudanças climáticas. Portanto, compreender os ciclos geoquímicos não é apenas uma tarefa científica, mas um imperativo político e ético diante das desigualdades ambientais que se aprofundam na região.

Fluxograma 1: Fluxo de Impactos Antrópicos na Geoquímica e Serviços Ecossistêmicos da Amazônia



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

4 Consideração final

Este estudo buscou compreender a importância dos processos geoquímicos na Amazônia, analisando sua relação com os impactos antrópicos, a degradação ambiental e os serviços ecossistêmicos associados. A revisão evidenciou que esses processos são fundamentais para o equilíbrio ecológico da região, influenciando a fertilidade dos solos, a qualidade da água e a sustentabilidade dos ecossistemas. Solos como as terras pretas de índio destacam a interação entre processos naturais e usos humanos na formação de ambientes férteis e estáveis. Por outro lado, pressões antrópicas comprometem essa dinâmica, revelando a fragilidade do bioma.

Os achados confirmam que a Amazônia enfrenta desafios crescentes relacionados à degradação geoquímica, especialmente em função da intensificação de práticas insustentáveis. As análises revisadas indicam que o desmatamento e as queimadas contribuem para a perda de carbono orgânico nos solos e o aumento da erosão, enquanto a mineração intensifica a contaminação dos sedimentos por metais pesados.

A fragilidade dos padrões de uso da terra em bacias hidrográficas como a do Rio Murucupi, no Pará, evidencia como as alterações no uso e cobertura impactam diretamente a integridade dos sistemas geoquímicos (Furtado *et al.*, 2022). Além disso, o uso agrícola intensivo altera os ciclos hidrobiogeoquímicos e compromete a resiliência dos ecossistemas aquáticos (Figueiredo; Cak; Markewitz, 2020). Esses fatores comprometem os ciclos naturais de nutrientes e ameaçam serviços ecossistêmicos cruciais para a região e o planeta, como o sequestro de carbono e a regulação climática. Esses resultados destacam a urgência de ações de conservação e manejo sustentável para mitigar os impactos identificados.

Com base nos resultados apresentados, é possível afirmar que o objetivo geral do estudo foi alcançado. A análise sistemática permitiu compreender de forma abrangente a interação entre os processos geoquímicos e os impactos das atividades humanas na Amazônia, oferecendo subsídios para discussões futuras sobre a preservação do bioma. Além disso, a pesquisa identificou que áreas protegidas desempenham papel central na manutenção dos ciclos geoquímicos, conforme destacado por diversos autores.

Entretanto, os resultados ressaltam lacunas de conhecimento quanto à extensão e profundidade das alterações geoquímicas causadas por atividades econômicas e mudanças climáticas, indicando a necessidade de investigações que integrem diferentes abordagens científicas e escalas espaciais. Pesquisas recentes sobre a história geocológica e biogeográfica da Amazônia no contexto do Antropoceno oferecem importantes marcos interpretativos para compreender as transformações ambientais observadas nas últimas décadas (Dias *et al.*, 2024).

Diante dos desafios identificados, torna-se evidente a necessidade urgente de ampliar os esforços de pesquisa sobre a dinâmica geoquímica na Amazônia, especialmente por meio de abordagens interdisciplinares que integrem diferentes escalas temporais e espaciais, além de utilizar metodologias padronizadas para garantir comparabilidade dos dados. Destaca-se, ainda, a ausência de dados integrados entre instituições de pesquisa e órgãos de gestão ambiental, o que fragmenta os esforços de monitoramento e dificulta a formulação de políticas públicas eficazes. As dificuldades logísticas para realizar pesquisas em áreas remotas da Amazônia, devido às limitações de acesso e altos custos operacionais, também restringem a coleta de dados representativos, comprometendo a caracterização detalhada das dinâmicas geoquímicas regionais. Além disso, a carência de séries temporais longas de dados geoquímicos limita a capacidade de identificar tendências e avaliar os impactos cumulativos das atividades antrópicas, o que é essencial para fundamentar estratégias de conservação e manejo sustentável.

Além disso, é imprescindível que os formuladores de políticas públicas reconheçam a relevância da geoquímica para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e incorporem esse

conhecimento nas estratégias de conservação ambiental e desenvolvimento sustentável. A implementação de políticas integradas, que contemplem o fortalecimento das áreas protegidas, o controle rigoroso das atividades antrópicas como mineração e desmatamento, e o incentivo a práticas produtivas sustentáveis, é fundamental para mitigar os impactos negativos sobre o bioma.

Propostas como o monitoramento contínuo da qualidade do solo e da água, a promoção de tecnologias limpas, programas de recuperação ambiental e ações de educação ambiental podem contribuir significativamente para a preservação dos processos geoquímicos essenciais. Tais iniciativas demandam a articulação entre governo, comunidade científica, setor produtivo e sociedade civil, visando garantir um desenvolvimento que respeite os limites ambientais e assegure a resiliência do ecossistema amazônico.

A hipótese inicial de que os processos geoquímicos são essenciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, os quais estão sob risco devido às atividades humanas, foi corroborada pelos dados revisados. No entanto, a pesquisa enfrentou limitações relacionadas à heterogeneidade metodológica das investigações consultadas, bem como à ausência de dados atualizados e sistemáticos para determinadas áreas da Amazônia. Dificuldades logísticas em trabalhos de campo e a falta de investimentos em pesquisa também foram identificadas como barreiras para uma compreensão mais detalhada da dinâmica geoquímica amazônica.

Em conclusão, esta pesquisa reafirma a importância da geoquímica na preservação da Amazônia e dos serviços ecossistêmicos que ela oferece. É imprescindível que políticas públicas e iniciativas científicas sejam implementadas para proteger esse patrimônio natural, promovendo um equilíbrio entre desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental. A Amazônia não é apenas um bioma de importância local, mas peça-chave no equilíbrio ecológico global, cuja preservação exige esforços coordenados que integrem ciência, sociedade e governança. Assim, espera-se que este trabalho contribua para ampliar o debate sobre a relevância dos processos geoquímicos na manutenção do bioma e inspire futuras pesquisas voltadas para sua proteção.

Referências

ALVES, M. H. D. *et al.* Diagnóstico de áreas agrícolas sob diferentes usos e manejos com o auxílio de ferramentas multivariadas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 6, p. 13-22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.006.0002>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.006.0002>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ANDRADE, M. M. N. *et al.* Estado da arte da geodiversidade da Amazônia Legal. **Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 10, n. 1, p. 380-405, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2021v10i1.p380-405>. Disponível em: <https://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/4729>. Acesso em: 12 nov. 2025.

AQUINO, R. D. G; RIBEIRO, M. M; PONTES, A. N. Pressões em terras indígenas pela atividade minerária na Amazônia brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 44, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5216/bgg.v44i1.69599>. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/69599>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ARAÚJO, C. F. de *et al.* Síntese e caracterização de material estruturado em zeólita F, a partir de rejeito da indústria de mineração de bauxita da Amazônia. *In*: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 2025, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.V-007>. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2025/V-007.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025

ARAUJO, S. B. de *et al.* Geotecnologia aplicada à perícia ambiental: o desmatamento ao longo da aerovia entre Boa Vista e Brasília. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 7, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.007.0023>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/5856>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BATISTA, L. F. *et al.* Avaliação da qualidade da água superficial em uma microbacia periurbana do município de Santarém, PA. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 2, p. 117-133, 2022. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0011>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/6964>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BELATO, L. de S. *et al.* Focos de calor associado à dinâmica de uso e cobertura do solo em Viseu/PA. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 5, p. 255-262, 2022. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.005.0019>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/7347>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BEZERRA, I. S. A. A. *et al.* Incision and aggradation phases of the Amazon River in central-eastern Amazonia during the late Neogene and Quaternary. **Geomorphology**, v. 399, 2022, 108073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108073>.

CABRAL, M. V. A. *et al.* Aspectos geofísicos da dinâmica dos rios em áreas urbanas na Amazônia. **Cadernos de Pedagogia**, v. 20, n. 7, p. 2545-2563, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv20n7-007>. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/1682>. Acesso em: 12 nov. 2025.

CAMPOS, A. M.; FERNANDEZ, J. C. Geoquímica mineral de elementos estratégicos mediante microsonda eletrônica do projeto Cañón Florida – região Amazonas, Peru. **Revista Científica de Mineralogía y Geoquímica**, v. 7, n. 3, 2023. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6338. Disponível em: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/6338/9646>. Acesso em: 12 nov. 2025.

COSTA, G. M. M. *et al.* Avaliação do efeito da sazonalidade na qualidade da água superficial no rio Guamá, Belém, PA. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 10, p. 545–560, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0043>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rca/article/view/6617>. Acesso em: 12 nov. 2025.

COSTA, I. *et al.* Análise geoquímica de sedimentos de uma microbacia urbana na região Amazônica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 547–563, 2024. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p547-563>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/258071>. Acesso em: 12 nov. 2025.

COSTA, J. A. *et al.* Geoarqueologia de antrossolos do sítio Terra Preta 2, Vale do Baixo Amazonas, Juruti-Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 21, n. 3, 2023. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1729>. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1729>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DA SILVA, E. F. *et al.* Late Quaternary hydroclimate and vegetation changes in an upland lake in southeastern Amazonia. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 95, supl. 2, e20230173, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202320230173>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/QTtVFdHRhVqb4XBySMtwgff/?format=pdf&lang=em>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DANIELSON, R. E.; RODRIGUES, J. L. M. Chapter Three - Impacts of land-use change on soil microbial communities and their function in the Amazon Rainforest. *In*: SPARKS, D. L. (Ed.). **Advances in Agronomy**. v. 175. Amsterdam: Elsevier, 2022. p. 179-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.04.001>. Disponível em: <https://escholarship.org/content/qt60c7p6h9/qt60c7p6h9.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DOS SANTOS, J. B. G. *et al.* Mudanças no uso e cobertura da terra e os seus impactos nos serviços ecossistêmicos do município de Juína, Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 6, p. 4177-4205, 2024. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4177-4205>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/260036>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DE CORTES, J. P. S.; SZLAFSZTEIN, C. F.; LUVIZOTTO, G. L. Geomorfologia e planejamento ambiental em uma região de interesse estratégico na Amazônia Brasileira. **Geociências**, v. 39, n. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i03.15077>. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/15077/11825>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DE PAULA, F. R. *et al.* Timing since deforestation for pastures implementation in the western Amazon: impacts on stream water biogeochemistry. **Science of the Total Environment**, v. 976, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179320>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969725009568>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DIAS, L. J. B. da S. *et al.* Contribuições à história geocológica e biogeográfica da Amazônia brasileira durante o Antropoceno. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 3, p. 1875–1893, 2024. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.3.p1875-1893>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/258562>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DRAKE, T. W. *et al.* The pulse of the Amazon: fluxes of dissolved organic carbon, nutrients, and ions from the world's largest river. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 35, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GB006895>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020GB006895>. Acesso em: 12 nov. 2025.

FERREIRA NETO, G. de S. *et al.* Sedimental journey: soil fertility of fluvial islands increases with proximity to an Amazonian white-water river. **Wetlands**, v. 41, art. 104, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01506-6>. Disponível em: https://ruffordorg.s3.amazonaws.com/media/project_reports/Wetlands_2021_41-104.pdf. Acesso em: 12 nov. 2025.

FIGUEIREDO, R. de O.; CAK, A.; MARKEWITZ, D. Agricultural impacts on hydrobiogeochemical cycling in the Amazon: is there any solution? **Water**, v. 12, n. 3, art. 763, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030763>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/763/pdf?version=1584433308>. Acesso em: 12 nov. 2025.

FREIRE, G. A. P. *et al.* Adsorção de fosfato em solos argilosos altamente absorventes no sudoeste da Amazônia brasileira. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.008.0001>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/download/7581/4173/16258>. Acesso em: 12 nov. 2025.

FURTADO, L. G. *et al.* Fragilidade e integridade de padrões de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Murucupi, Barcarena, Pará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 1, p. 388-402, 2022. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.001.0029>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/6914>. Acesso em: 12 nov. 2025.

FUSHIMI, M.; RIBEIRO, D. de Q.; NUNES, J. O. R. Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares da bacia hidrográfica do rio dos Cachorros, Amazônia Oriental. **Revista de Geografia**, v. 42, 2022. DOI: <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.193453>. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/139565/3/fushimi_m_dr_prud.pdf. Acesso em: 12 nov. 2025.

GALVÃO, P. *et al.* Modelagem numérica do Sistema Aquífero Içá-Solimões para fins de disponibilidade e demanda hídrica da Província Petrolífera de Urucu, Amazonas, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 37, n. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v37i3.30216>. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/30216/19483>. Acesso em: 12 nov. 2025.

GAUTHERON, C. *et al.* Cenozoic weathering of fluvial terraces and emergence of biogeographic boundaries in Central Amazonia. **Global and Planetary Change**, v. 212, maio 2022, 103815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103815>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818122000820>. Acesso em: 12 nov. 2025.

GOMES, J. da C. *et al.* Precipitação e ocorrências de incêndios em ecossistemas periurbanos no Sudoeste da Amazônia. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 7, p. 40-53, 2023. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.007.0004>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/7521>. Acesso em: 12 nov. 2025.

GUIMARÃES, J. T. F. *et al.* Landscape and climate changes in Southeastern Amazonia from Quaternary records of upland lakes. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 621, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14040621>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/4/621>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SILVA JÚNIOR, A. R. S. *et al.* Quantificação dos estoques de carbono acima do solo da Amazônia Maranhense. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 4, p. 3008–3021, 2024. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p3008-3021>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/262101>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LAGES, A. da S. *et al.* Quimiometria aplicada à avaliação química do igarapé que cruza o polo industrial de Manaus/AM. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 10, p. 328–338, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0027>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/6646>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LEAL FILHO, W. *et al.* Gestão de serviços ecossistêmicos na Amazônia brasileira: a influência do desmatamento e da degradação florestal na maior floresta tropical do mundo. **Geoscience Letters**, v. 12, art. 24, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40562-025-00391-9>. Disponível em: <https://geoscienceletters.springeropen.com/articles/10.1186/s40562-025-00391-9>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LIMA, A. M. M. de *et al.* Análisis de la relación entre paisaje y la hidrogeoquímica de la cuenca del río Moju, Amazonia Oriental-Brasil. **Acta Amazonica**, v. 17, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17561/at.17.5041>. Disponível em: <https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/atma/article/view/5041>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LOUCHARD, D.; GRUBER, N.; MÜNNICH, M. The impact of the Amazon on the biological pump and the air-sea CO₂ balance of the western tropical Atlantic. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 35, e2020GB006818, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GB006818>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GB006818>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MEIRELES, R. R. *et al.* Avaliação da Qualidade da Água da Baía do Portel e do Rio Camaraipe, Município de Portel – Marajó, Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 2, p. 1251-1267, 2024. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1251-1267>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/258710>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MELO, P. L. da S.; BENCHIMOL, A. C. Produção científica de pesquisadores brasileiros na base Scopus sobre envenenamento por mercúrio nos rios da Amazônia. **Novos Cadernos NAEA**, v. 27, n. 3, p. 341-354, set.-dez. 2024. ISSN 1516-6481/2179-7536. Disponível em:

<https://bioeconomia.fea.usp.br/wp-content/uploads/2025/01/Pesquisas-e-publicacoes-sobre-o-envenenamento-por-mercurio-nos-rios-da-Amazonia-030125-pdf.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MORAES, A. M. *et al.* Multivariate statistics and geochemical approaches for understanding source-sink relationship: a case study from close-basin lakes in Southeast Amazon. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 99, 102497, abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102497>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981119305279?via%3Dihub>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MOULATLET, G. M. *et al.* Amazon biodiversity is at risk from metal contamination due to mining activity. **bioRxiv**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1101/2025.05.21.654597>. Disponível em: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2025.05.21.654597v1.full>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MOULATLET, G. M. *et al.* A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards. **Chemosphere**, v. 339, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139700>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653523019677?via%3Dihub>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NARAYANAN, A.; COHEN, S.; GARDNER, J. R. Resposta dos sedimentos fluviais ao desmatamento na bacia amazônica. **Earth Surface Dynamics**, v. 12, p. 581-599, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/esurf-12-581-2024>. Disponível em: <https://esurf.copernicus.org/articles/12/581/2024/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NASCIMENTO, S. M. *et al.* Proposição do índice de qualidade da água subterrânea para irrigação em ambiente rural, Amazônia oriental, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 7, p. 165-176, 2022. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.007.0013>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/7489>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NASCIMENTO, T. S. R.; MONTE, C. N.; CORREA, E. S. Qualidade de água em áreas influenciadas por uma estação de tratamento de esgoto na Amazônia. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 9, p. 146-160, 2021. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.009.0012>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/6145>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NEGREIROS, R. S. *et al.* Caracterização mineralógica de terra preta das comunidades do Marajó e Gregostone, em Parintins, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência Aplicada**, v. 4, n. 5, p. 2882–2894, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34115/basrv4n5-010>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/17018>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NEGRILLO, B. H. M. *et al.* Uso de esteróis como marcadores geoquímicos de fontes de contaminação aquática na Amazônia. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, 2024, e4658. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n6-161>. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/4658>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NETO, R. M.; BARRETO, J. C. B.; LUCAS, P. G. S. Geoquímica da paisagem e suas relações com a estruturação dos geossistemas: aplicações em bacia de baixa ordem de terrenos cristalinos. **Geografia**, v. 48, n. 1, p. 1-26, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.5016/geografia.v48i1.17231>. Disponível em:

<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/17231/12767>.

Acesso em: 12 nov. 2025.

NITTROUER, C. A. *et al.* Amazon sediment transport and accumulation along the continuum of mixed fluvial and marine processes. *Annual Review of Marine Science*, v. 13, p. 501-536, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060457>. Disponível em:

<https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-marine-010816-060457>.

Acesso em: 12 nov. 2025.

NORONHA FILHO, F. Á. *et al.* Acúmulo de mercúrio em sedimentos de fundo da reserva biológica do rio Trombetas (REBIO), cidade de Oriximiná, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 5, p. 378-386, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0031>. Disponível em:

<https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/5543>. Acesso em: 12 nov. 2025.

OLIVEIRA, A. F. S. de *et al.* Evaluation and Geostatistical Study of Toxicological Risk by Water Ingestion with Al, Ba, Fe and Pb in Communities Close to Industrial Areas in the Brazilian Amazon. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 31, n. 7, p. 1492-1508, 2020. DOI:

<http://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20200036>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/jbchs/a/4zRFfFbQjwZn77V9YyNg6DB/?format=pdf&lang=en>.

Acesso em: 12 nov. 2025.

OLIVEIRA, E. S. *et al.* Indicador da qualidade da água através de análise fatorial: um estudo de caso na zona portuária de Belém, Amazônia, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0051>. Disponível em:

<https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2021.003.0051>. Acesso em: 12 nov. 2025.

OLIVEIRA, L. N. de; LOPES, F. A. Avaliação geoquímica em águas superficiais e sedimentos fluviais na bacia do Córrego Paciência. **Caderno de Geografia**, v. 32, n. 70, p. 813-829, 2022. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2022v32n70p813>. Disponível em:

<https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/28249>. Acesso em: 12 nov. 2025.

OVIEDO, A. F. P.; SENRA, E. B. Modificando a trajetória de degradação do garimpo em Terras Indígenas. **Ciência & Saúde Coletiva**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-311XPT111223>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/csp/a/JWL8GwHwcYb9SfFdKXYkHHg/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 12 nov. 2025.

PANDURO, G. *et al.* Bioacumulación por mercurio en peces y riesgo por ingesta en una comunidad nativa en la amazonia peruana. **Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú**, v. 31, n. 3, e18177, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.15381/rivpep.v31i3.18177>.

Disponível em: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1609-91172020000300012. Acesso em: 12 nov. 2025.

PASSOS, M. S. *et al.* Pleistocene-Holocene sedimentary deposits of the Solimões-Amazonas fluvial system, Western Amazonia. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 98, p. 102455, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102455>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjgeo/a/HBvdDWb6Q5TVsXr3qHLdq9S/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 12 nov. 2025.

PEREIRA, J. L. G.; FERREIRA, L. V. The effectiveness of the categories of protected areas in containing deforestation in the legal Amazon. **Boletim de Geografia**, v. 39, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v39.a2021.e58064>. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/58064>. Acesso em: 12 nov. 2025.

QUINTARELLI, J. M. *et al.* Mercúrio em amostras de rios com influência da mineração artesanal e de pequena escala de ouro: o caso da Bacia do Alto Rio Madeira (Brasil/Bolívia). **Revista de Ciências da Terra Sul-Americanas**, v. 145, p. 105070, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105070>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/SRFLVxhSnHqGZb5VFZzLfCn/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 12 nov. 2025.

RORATO, A. C. *et al.* Ameaças ambientais sobre as Terras Indígenas da Amazônia. **Terra**, v. 10, n. 3, p. 267, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10030267>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/10/3/267/pdf?version=1615989105>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ROSA, P. P. da; WEIHS, M. L. Devastação ambiental e riscos à saúde: o doloroso legado do garimpo de ouro a agricultores familiares da Amazônia Mato-Grossense. **Revista de História Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 66-80, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2021v10i2.p66-80>. Disponível em: <https://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/5608>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SANTOS, L. F. dos *et al.* Avaliação da qualidade da água da baía do Guajará em Belém/PA. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 2, p. 367–380, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0034>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.002.0034>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SANTOS, T. A. dos; LIVIZ, C. A. M. O Papel Crucial das Áreas Protegidas no Combate ao Desmatamento na Amazônia. **Revista Jurídica da Amazônia**, v. 1, n. 2, p. 205–225, 2024. DOI: <https://doi.org/10.63043/sgm1ax25>. Disponível em: <https://revista.mpro.mp.br/amazonia/article/view/107>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SILVA, A. C. S.; COSTA, M. L. Gênese do minério de ferro “soft” no depósito S11D, em Carajás, região Amazônica, Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 50, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020180128>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjgeo/a/NpgzbY789CYwWBJ5p3tH3Hv/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SILVA, M. C.; LIMA, L. S.; VIANA, L. C. S. Aspectos geoquímicos de antrossolos do baixo Amazonas, estado do Pará – Amazônia oriental brasileira: uma revisão integrativa. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 29602–29620, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-448>. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/46926>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SILVA, R. G. C. Amazônia, dinâmicas territoriais e conflitos agrários: revisão de uma trajetória de curta duração. **Revista NERA**, Presidente Prudente, v. 28, n. 1, e10467, 2025.

DOI: <https://doi.org/10.47946/rnera.v28i1.10467>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/nera/a/wSxM5cSdhL4SDb5wdTdnmNn/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 12 nov. 2025.

SOARES, R. *et al.* Determinação dos estoques de carbono e nitrogênio nas frações físicas da matéria orgânica em solos antrópicos (Terra Preta de Índio) e não antrópicos da Amazônia Central. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 2, 2022. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210120>. Disponível em: <https://rvq-sub.s bq.org.br/index.php/rvq/article/view/4229>.

Acesso em: 12 nov. 2025.

SOUZA, C. de; OLIVEIRA JUNIOR, E. S.; HACON, S. de S. Serviços ecossistêmicos da Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 178-198, 2024.

DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p178-198>. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/256805>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SOUSA, M. B. P.; RANIERI, L. A. Morfodinâmica de praias estuarinas da costa leste da Ilha do Marajó, Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 24, n. 3, p. 2350, 2024. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2350>. Disponível em:

<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2350>. Acesso em: 12 nov. 2025.

Acesso em: 12 nov. 2025.

SOUSA, P. E. S. *et al.* Macroelementos em peixes de rios da Amazônia Oriental: estudo de caso na Região de Integração de Carajás. **Acadêmica**, v. 23, n. 4, 2022.

<https://doi.org/10.7213/acad.2022.20005>. Disponível em:

<https://periodicos.pucpr.br/cienciaanimal/article/view/28629>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SOUZA, I. M. S. *et al.* Geochemical characterization and origin of kerogens from source-rock of Devonian in the Amazonas Basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 111, p. 103437, nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103437>. Disponível em:

<https://lepetro.ufba.br/sites/default/files/2021-08/Geochemical%20characterization%20and%20origin%20of%20kerogens%20from%20source-rock%20of%20Devonian%20in%20the%20Amazonas%20Basin%2C%20Brazil.pdf>.

Acesso em: 12 nov. 2025.

SOUZA, S. V.; RODRIGUES, S. W. P. Dados multi-sensores para reconhecimento e mapeamento de ambientes sedimentares na planície do Rio Amazonas. **Revista Geociências**, v. 39, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i2.13500>. Disponível em:

<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/download/13500/11697/80741>. Acesso em: 12 nov. 2025.

Acesso em: 12 nov. 2025.

SOUZA, T. *et al.* Chemodiversity of dissolved soil organic matter from Amazon rainforest as influenced by deforestation. **Metabolites**, v. 14, n. 3, p. 144, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.3390/metabo14030144>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2218-1989/14/3/144/pdf?version=1709090416>. Acesso em: 12 nov. 2025.

VIEL, E. U.; NASCIMENTO, F. S. do; FENZL, N. Qualidade da água do Aquífero Alter do Chão: comunidade Jaca-mim, zona rural do Oeste do Pará, Amazônia, Brasil. **International Journal of Scientific Management and Tourism**, v. 10, n. 1, p. 543-562, 2024. DOI: 10.55905/ijstvtv10n1-025. Disponível em: <https://ojs.scientificmanagementjournal.com/ojs/index.php/smj/article/view/726>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ZANIN, P. R. *et al.* Do protected areas enhance surface water quality across the Brazilian Amazon? **Journal for Nature Conservation**, v. 81, p. 126684, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2024.126684>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S161713812400133X>. Acesso em: 12 nov. 2025.

Data de submissão: 26/04/2025

Data de aceite: 31/07/2025