



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UNB PLANALTINA
Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos –
ProfÁgua

JORGE GABRIEL MERLADETT MADRUGA

SENSORIAMENTO REMOTO COMO INSTRUMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DE
DANO AMBIENTAL: ASSOCIAÇÃO ENTRE O GARIMPO ILEGAL DE OURO E A
DEGRADAÇÃO HÍDRICA NA TI MUNDURUKU NO ALTO TAPAJÓS, OESTE DO
PARÁ

BRASÍLIA – DF
2026

JORGE GABRIEL MERLADETT MADRUGA

**SENSORIAMENTO REMOTO COMO INSTRUMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DE
DANO AMBIENTAL: ASSOCIAÇÃO ENTRE O GARIMPO ILEGAL DE OURO E A
DEGRADAÇÃO HÍDRICA NA TI MUNDURUKU NO ALTO TAPAJÓS, OESTE DO
PARÁ**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em
Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos
Hídricos na Universidade de Brasília (ProfÁgua/UnB),
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Carlos José Sousa Passos;

Coorientador: Dr. Lucas Silva Costa

**BRASÍLIA – DF
2026**

Ficha Catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pelo autor

Madruga, Jorge

XXXXX SENSORIAMENTO REMOTO COMO INSTRUMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANO AMBIENTAL: ASSOCIAÇÃO ENTRE O GARIMPO ILEGAL DE OURO E A DEGRADAÇÃO HÍDRICA NA TI MUNDURUKU NO ALTO TAPAJÓS, OESTE DO PARÁ/ Jorge Gabriel Merladett Madruga; orientador Carlos José Sousa Passos, coorientador Lucas Silva Costa - - Brasília, 2026. XX p.

Dissertação (Mestrado – Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - - Universidade de Brasília, 2026.

1. Mineração. 2. Amazônia. 3. Munduruku. 4. Recursos Hídricos. 5. Mercúrio. I – Sousa Passos, Carlos José, orient. II. Título.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

JORGE GABRIEL MERLADETT MADRUGA

JORGE GABRIEL MERLADETT MADRUGA

**SENSORIAMENTO REMOTO COMO INSTRUMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DE
DANO AMBIENTAL: ASSOCIAÇÃO ENTRE O GARIMPO ILEGAL DE OURO E A
DEGRADAÇÃO HÍDRICA NA TI MUNDURUKU NO ALTO TAPAJÓS, OESTE DO
PARÁ**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em
Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos
Hídricos, por meio da Universidade de Brasília
(ProfÁgua/UnB), como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos.

Aprovado em: __/__/____

Banca Examinadora

Dr. Carlos José Sousa Passos
Orientador

Dr. Rômulo José da Costa Ribeiro
Examinador Interno

Dra. Sabrina Nunes Iocken
Examinador Externo

Dr. Carlos Tadeu Carbalho do Nascimento
Suplente

BRASÍLIA-DF
2026

*“Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder o que,
com frequência, poderíamos ganhar, por simples medo de
arriscar.”*

William Shakespeare

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e proteção em cada etapa desta jornada.

À minha esposa, Jédera, pelo companheirismo, pela paciência e por ser o meu porto seguro em meio às renúncias que este trabalho exigiu. À minha mãe, Elizabete, e aos meus irmãos, Silvia e Victor, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem no valor da minha trajetória.

Ao meu orientador, o Dr. Carlos José Sousa Passos, e ao meu coorientador, Dr. Lucas Silva Costa, por aceitarem o desafio desta orientação. Para além da excelência técnica e do rigor científico, agradeço a paciência e as palavras de incentivo nos momentos de dúvida. Transformar o processo de pesquisa em um aprendizado constante foi um privilégio; a postura ética e a dedicação de ambos permanecem como inspiração para minha carreira.

Ao Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam), instituição que não apenas me acolhe profissionalmente, mas que viabiliza e incentiva o aperfeiçoamento constante de seus servidores. Minha gratidão ao órgão por promover políticas públicas que valorizam a capacitação técnica e enriquecem o ecossistema de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) no Brasil.

Ao meu chefe, o Sr. Thiago Zaccarini pela liderança, pela confiança depositada e pelo apoio fundamental para que eu pudesse conciliar os desafios do serviço público com a dedicação acadêmica. Sua compreensão e incentivo foram pilares para a conclusão deste projeto.

Aos meus colegas de trabalho no Censipam, pela parceria diária, pelas trocas de conhecimento e pelo auxílio técnico que muito contribuiu para a maturação desta pesquisa.

RESUMO

A mineração ilegal de ouro em Terras Indígenas da Amazônia Legal representa uma das principais ameaças à qualidade dos recursos hídricos, comprometendo ecossistemas e a saúde de populações tradicionais. Este estudo analisou a relação entre a atividade garimpeira e a turbidez da água no rio Cabitutu, principal afluente do rio Tapajós localizado na Terra Indígena Munduruku (PA), no período de 2020 a 2025. Diante da ausência de dados contínuos de monitoramento *in situ*, adotou-se uma abordagem baseada na resposta espectral da água como indicadora de impactos ambientais. A metodologia integrou análises estatísticas de índices espectrais de turbidez NDTI, NDSSI e índice combinado, com indicadores de atividade de garimpo, destacando-se o Índice de Frente de Garimpo (IFG), derivado da metodologia de Localização de Garimpo, ambos desenvolvidos pelo Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam). Os resultados demonstraram que o modelo composto pelo NDTI e pelo IFG apresentou o melhor desempenho explicativo ($F = 10,71$; $p = 0,02$; R^2 ajustado = 0,40), indicando que 40% da variabilidade da turbidez estimada é explicada diretamente pela dinâmica espaço-temporal do avanço do garimpo. A análise sazonal revelou que, embora o regime hidrológico influencie a concentração de sedimentos ($F = 9,99$; $p < 0,001$), a atividade garimpeira mantém-se como fator de impacto estatisticamente significativo em diferentes períodos do ano, com maior intensidade observada na estação seca.. Conclui-se que o uso de índices espectrais, fundamentado nos princípios da óptica hidrológica, atua como instrumento complementar para a caracterização da degradação ambiental por meio do aumento da turbidez da água e para o suporte à análise da associação entre uma eventual conduta comissiva ou omissiva e o dano ambiental. As evidências obtidas demonstram que o aumento da turbidez no rio Cabitutu é uma possível consequência da atividade garimpeira ilícita na região, reforçando a necessidade de integração entre sensoriamento remoto, inteligência geoespacial e políticas públicas de gestão de recursos hídricos.

Palavras-chaves: Monitoramento Ambiental. Bacia do Tapajós. Gestão de Águas. Conflitos Socioambientais. Geoprocessamento.

ABSTRACT

Illegal gold mining in Indigenous Lands within the Legal Amazon represents a major threat to water resource quality, compromising ecosystems and the health of traditional populations. This study analyzed the relationship between mining activity and water turbidity in the Cabitutu River, the main tributary of the Tapajós River located in the Munduruku Indigenous Land (PA), from 2020 to 2025. Given the absence of continuous in situ monitoring data, an approach based on the spectral response of water was adopted as an indicator of environmental impacts. The methodology integrated statistical analyses of spectral turbidity indices (NDTI, NDSSI, and a combined index) with mining activity indicators, notably the Mining Front Index (IFG), derived from the Mining Location methodology (LOGAR), developed by the Management and Operational Center of the Amazon Protection System (Censipam). The results demonstrated that the model composed of NDTI and IFG showed the best explanatory performance ($F = 10,71$; $p = 0,02$; adjusted $R^2 = 0,40$), indicating that 40% of the estimated turbidity variability is directly explained by the spatio-temporal dynamics of mining expansion. Seasonal analysis revealed that, although the hydrological regime influences sediment concentration ($F = 9.99$; $p < .001$), mining activity remains a statistically significant impact factor throughout different periods of the year, with greater intensity observed during the dry season. It is concluded that the use of spectral indices, grounded in the principles of hydrologic optics, serves as a complementary instrument for characterizing environmental degradation through increased water turbidity and for supporting the analysis of the causal nexus between mineral activity and environmental damage. The evidence obtained indicates that turbidity variation in the Cabitutu River maintains a statistical correlation with illegal mining activity in the region, reinforcing the potential of geospatial intelligence as a support tool for public policies on water resource management and environmental enforcement in hard-to-reach areas.

Keywords: Environmental Monitoring. Tapajós Basin. Water Management. Socio-environmental Conflicts. Geoprocessing.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CF	Constituição Federal
Censipam	Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SUDAM	Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia
TIMU	Terra Indígena Munduruku
LOGAR	Metodologia de Localização de Garimpos (Metodologia criada pelo Censipam)
LOPIS	Metodologia de Localização de Pistas de Pouso (Metodologia criada pelo Censipam)
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
RNQA	Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade de Água
PL	Projeto de Lei
PCC	Primeiro Comando da Capital
CV	Comando Vermelho
OrCrim	Organização Criminosa

LISTA DE SÍMBOLOS

Hg	Mercúrio
MeHg	Metilmercúrio
R\$	Real brasileiro
km ²	Quilômetro quadrado
mg/L	Miligramas por Litro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivo Geral	16
2. Objetivos Específicos.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
Qualidade da água.....	18
Uma introdução sobre os fundamentos da óptica hidrológica: IOPS e AOPS	21
O comportamento espectral da água turva.....	23
Relação entre a turbidez e sólidos suspensos totais	24
Classificação limnológica de sioli	25
Dos índices de análise de turbidez por sensoriamento remoto (ndti e ndssi)	27
Do índice composto	28
Dos alertas de garimpo e do índice de frente de garimpo.....	29
Garimpo ilegal: aspectos jurídicos, associação com organizações criminosas e o seu impacto na organização social e saúde das comunidades indígenas	30
O Garimpo Ilegal	30
Associação com Organizações Criminosas	31
Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (censipam)	36
Surgimento e Contexto Estratégico	36
Questões logísticas da região amazônica	37
O Desafio Logístico da Amazônia.....	38
A Logística como Condição para a Ilegalidade	38
Estado da Arte	38
Síntese conceitual: garimpo ilegal, logística ilícita, impacto hídrico e responsabilização	44
3. METODOLOGIA	46
Base de Dados e Fontes de Informação	46
Processamento e Integração dos Dados	48
Construção do Índice Composto.....	48
Modelagem Estatística	48
Avaliação e Seleção dos Modelos.....	49
Análise das Relações e Interpretação dos Resultados.....	49
Limitações Metodológicas e Implicações Jurídicas.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
Análise comparativa de modelos (Objetivo Específico I)	51
Análise da relação entre variáveis (Objetivo específico II)	52
Interpretação físico-ambiental dos resultados (Objetivo específico III) - Discussões.....	57
CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
PERSPECTIVAS FUTURAS	62
PRODUTOS DO MESTRADO	63

5. REFERÊNCIAS	70
-----------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica, a maior bacia hidrográfica do mundo, estende-se por oito países sul-americanos: Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela (Silva Filho, 2024). Em território nacional, a Amazônia Legal representa a porção florestal brasileira. Definida pela Lei nº 12.651/2012, ela abrange cerca de 5,3 milhões de km², correspondendo a aproximadamente 61% do território brasileiro (De Melo Nogueira 2023, *apud.* SUDAM, 2023). Essa área engloba integralmente os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima, além de partes de Tocantins, Goiás e Maranhão. Sua importância é destacada por De Melo Nogueira (2023), que enfatiza a relevância estratégica e geopolítica da Amazônia, especialmente em sua relação com as áreas de fronteira (terrestre e marítima) e a significativa navegabilidade de seus rios.

Apesar de sua importância, a região enfrenta a expansão da atividade garimpeira ilegal. Essa atividade tem sido associada à degradação ambiental, sobretudo pela mobilização de sedimentos e pela contaminação hídrica por metais pesados, como o mercúrio, afetando diretamente ecossistemas aquáticos e populações humanas dependentes desses recursos (Silva Filho, 2024; Martoredjo, 2023). O crescimento dessa atividade é expressivo: enquanto em 1985 a área ocupada pelo garimpo era de aproximadamente 220 km², em 2022 esse valor ultrapassou 2.600 km², com expansão predominante no bioma amazônico (Cortinhas Ferreira Neto et al., 2024).

Os impactos associados ao garimpo ilegal estão relacionados à alteração das propriedades físicas da água, especialmente à turbidez, decorrente do aumento da concentração de sedimentos em suspensão. Esse parâmetro constitui um dos indicadores de qualidade da água, sendo inclusive contemplado em normativas ambientais, como as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Nessa linha, Silva Filho (2024) aponta que o uso intensivo de pesticidas e, sobretudo, o garimpo ilegal de ouro são os principais agentes de poluição das águas por metais pesados, com destaque para o mercúrio. Essa contaminação ameaça diretamente a vida aquática e as populações humanas que dependem do recurso para subsistência e consumo.

A preservação das Terras Indígenas (TIs) é um desafio crescente, impulsionado pelo grande interesse econômico na exploração de metais preciosos (Rocha *et al.*, 2025). Entre as áreas mais vulneráveis, destaca-se a Terra Indígena Munduruku (TIMU), situada no estado do Pará, o estado mais afetado pelo garimpo ilegal entre os meses de julho e agosto de 2025, conforme dados do Boletim de Desmatamento e Ilícitos Ambientais (BDI) do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Brasil, 2025). Além disso, Cortinhas Ferreira Neto *et al.* (2024, destacam que as TI Kayapo, Munduruku e Yanomami contém mais de 90% do total do garimpo realizado em

terras indígenas.

Nesse cenário, o sensoriamento remoto consolida-se como uma ferramenta estratégica para o monitoramento ambiental, pois viabiliza a obtenção de informações sobre a superfície terrestre mediante a interação da radiação eletromagnética com diferentes alvos, sem a necessidade de contato direto com o objeto. No caso específico dos corpos hídricos, essa interação fundamenta-se nos princípios da óptica hidrológica, definida como o campo da Física que estuda o comportamento da luz na água e suas propriedades de espalhamento e absorção. Segundo Cortivo (2009), essa análise baseia-se na energia radiante e em grandezas fundamentais como a radiância (L), que é a energia detectada pelo sensor em uma direção específica, e a irradiância (E), que representa o fluxo total de energia incidente sobre uma superfície. Conforme apontam Barbosa et al. (2019), o desafio central dessa ciência é compreender como os processos de absorção e espalhamento, as chamadas propriedades ópticas inerentes (IOPs), modificam a trajetória e a intensidade da luz de acordo com a composição e a concentração de substâncias presentes no meio aquático.

Nesse contexto, a assinatura espectral da água é influenciada pela presença de componentes opticamente ativos que alteram sua interação com a radiação solar. Em condições de baixa turbidez, a água apresenta maior reflectância nas faixas do azul e do verde, enquanto absorve quase totalmente a energia no vermelho e no infravermelho. No entanto, a presença de sólidos suspensos modifica as características físicas da água, reduzindo sua transparência e elevando a reflectância, especialmente nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Conforme verificado por Sari *et al* (2017), alterações na concentração de sedimentos em suspensão (CSS) impactam significativamente a turbidez registrada por sensores, sendo que altas concentrações de partículas resultam em maior variabilidade desse parâmetro.

Essa modificação no comportamento óptico pode permitir a utilização de índices espectrais como indicadores auxiliares para a estimativa de parâmetros de qualidade da água, com o potencial de oferecer uma abordagem econômica e escalável para o monitoramento de grandes dimensões. Entre esses indicadores, destaca-se o Índice de Turbidez por Diferença Normalizada (NDTI). Segundo Ardyan (2025), o NDTI é calculado a partir da diferença normalizada entre as bandas espectrais do vermelho (red) e do verde (green), fornecendo valores que variam de acordo com o nível de turbidez detectado.

Além do NDTI, a utilização de imagens do satélite Sentinel-2 viabiliza o cálculo de índices voltados à estimativa de sedimentos em suspensão, baseados na combinação de bandas espectrais, como o azul (*blue*) e o infravermelho próximo (NIR), cuja fundamentação está associada ao comportamento espectral da água e dos materiais em suspensão, conforme descrito na literatura clássica de sensoriamento remoto (Jensen, 2009). Esses índices atuam como parâmetros objetivos,

reduzindo a subjetividade inerente à análise visual da coloração da água. Contudo, para uma compreensão mais abrangente dos danos ambientais, torna-se necessário integrar esses dados espectrais a indicadores da dinâmica da atividade garimpeira ilegal, por meio de sistemas de monitoramento como o DETER, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que realiza o levantamento de alertas de mudanças na cobertura florestal na Amazônia Legal, bem como ao uso de imagens de alta resolução fornecidas pela *Planet Labs*, amplamente utilizadas na identificação de polígonos associados à atividade garimpeira.

No entanto, o ponto fraco dos alertas é que ele não é capaz de deixar claro se o evento começou antes ou se continuou depois de detectado. Com base nisso, o Índice de Frente de Garimpo (IFG), derivado da metodologia de Localização de Garimpo (LOGAR), veio para cobrir o que os alertas, que são fragmentados, não representam, pois ele integra o espaço e tempo, ao combinar a concentração espacial e a persistência temporal. Segundo Costa et. al. (2025) o IFG constitui um recurso analítico que transcende a simples quantificação numérica de alertas gerados via imagens dos satélites *PlanetScope* e *Sentinel-2*. Ao integrar variáveis que permitem uma interpretação qualificada da evolução da mineração ilícita, o IFG possibilita a identificação estratégica de zonas prioritárias para intervenções de controle e fiscalização ambiental.

No contexto institucional brasileiro, iniciativas como o Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), operacionalizado pelo Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam), desempenham papel central no monitoramento e combate a ilícitos ambientais, por meio da integração de dados provenientes de sensoriamento remoto, radares e outros sistemas, gerando informações estratégicas que subsidiam ações de fiscalização e controle. Nesse cenário, destaca-se o Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM), cuja origem remonta à Exposição de Motivos nº 194, de 21 de setembro de 1990, na qual o Ministério da Aeronáutica propôs a implementação de um conjunto de ações governamentais voltadas à atuação integrada e coordenada dos órgãos públicos na região amazônica, conforme publicado no Diário Oficial da União de 24 de setembro de 1990.

Do ponto de vista jurídico-ambiental, a relevância desta pesquisa não está na demonstração de culpa do agente poluidor, mas na produção de elementos técnicos capazes de subsidiar a identificação do dano ambiental, da atividade potencialmente causadora e da associação entre ambos. Embora o Código Civil brasileiro estabeleça, em seus arts. 186 e 927, a regra geral da responsabilidade civil fundada no ato ilícito e no dever de reparação, a responsabilidade por dano ambiental possui regime próprio, de natureza objetiva, nos termos da Política Nacional do Meio Ambiente.

Nesse contexto, o art. 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981 estabelece que o poluidor é obrigado,

independentemente da existência de culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros afetados por sua atividade. Assim, em matéria ambiental, a discussão central desloca-se da comprovação do elemento subjetivo, dolo ou culpa, para a demonstração do dano, da atividade degradadora e do nexo de causalidade.

Essa distinção é particularmente relevante em áreas de difícil acesso, como a Terra Indígena Munduruku, onde a identificação individualizada dos responsáveis pela atividade garimpeira ilegal pode ser operacionalmente complexa. Nesses casos, ferramentas de sensoriamento remoto podem contribuir para caracterizar alterações ambientais objetivamente observáveis, como o aumento da turbidez da água, bem como para associá-las espacial e temporalmente à expansão de frentes de garimpo.

Desse modo, os índices espectrais utilizados nesta pesquisa, associados aos indicadores de atividade garimpeira, não têm a finalidade de substituir a perícia ambiental ou a instrução probatória judicial, mas de oferecer subsídios técnicos para a caracterização preliminar do dano hídrico e para o fortalecimento da análise do nexo entre a atividade ilícita e a degradação da qualidade da água. Essa abordagem é compatível com a responsabilidade civil ambiental objetiva, pois contribui justamente para os elementos que permanecem indispensáveis à responsabilização: a existência do dano, a identificação da atividade degradadora e a relação entre ambos.

Nesse sentido, a disponibilidade de indicadores confiáveis que permitam estabelecer de forma mais segura a associação entre a conduta, seja ela omissiva ou comissiva e o dano torna-se fundamental para o fortalecimento das ações de responsabilização.

Diante desse contexto, este estudo busca analisar a relação entre a dinâmica da atividade garimpeira ilegal e a turbidez da água, por meio de dados de sensoriamento remoto, visando avaliar o potencial desses parâmetros como indicadores de impactos ambientais e como subsídio à análise da associação entre a conduta e o dano. Parte-se da hipótese de que a utilização de índices espectrais aplicados a imagens satelitais, quando associados a indicadores da atividade do garimpo ilegal, pode contribuir para a identificação de alterações na qualidade da água relacionadas ao garimpo ilegal e auxiliar na identificação da ocorrência das atividades ilícitas e do seu responsável.

1.1. Objetivo Geral

Analisar a relação entre a dinâmica da atividade garimpeira ilegal a montante do Rio Cabitutu, afluente do Tapajós, situado na Terra Indígena Munduruku, no Estado do Pará e a resposta turbidez da água à jusante no mesmo Rio, por meio do NDTI, NDSSI e índice combinado, a fim de avaliar o potencial desses parâmetros como indicadores auxiliares na identificação de alterações na turbidez da água associadas à dinâmica da atividade garimpeira ilegal, com plausibilidade físico-

ambiental compatível com o aumento de sedimentos em suspensão, e no suporte ao estabelecimento da associação entre a conduta ilícita e o dano aos recursos hídricos.

2. Objetivos Específicos

- I. Comparar o desempenho de diferentes combinações entre indicadores de atividade garimpeira (Alertas e IFG) e os índices espectrais (NDTI, NDSSI e Índice Combinado), a fim de identificar a relação que apresenta a melhor capacidade explicativa, significância estatística do preditor e robustez do modelo.
- II. Analisar a relação entre a dinâmica espaço-temporal da atividade garimpeira e a resposta espectral da água, a partir da combinação que apresentou melhor desempenho estatístico, buscando identificar padrões consistentes de associação entre essas variáveis.
- III. Analisar os resultados obtidos à luz dos processos físico-químicos que regem a interação entre sedimentos em suspensão e a resposta espectral da água, avaliando o potencial desses indicadores como subsídio à identificação de impactos ambientais e ao fortalecimento da análise da associação entre a conduta e o dano ambiental.
- IV. Trazer a proposição de um Acordo de Cooperação Técnica entre o Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia e a Agência Nacional de Águas (ANA).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Qualidade da água

De acordo com De Campos (2025), historicamente, a água foi considerada como um recurso infinito, dotado da capacidade de retornar para suas condições naturais. No entanto, com a pressão social sobre os recursos hídricos, eles passaram a ser o foco das discussões sociais e ambientais ao redor do mundo. No contexto amazônico, essa pressão se manifesta de forma aguda através do aporte de sedimentos decorrentes de atividades antrópicas, o que impacta diretamente os atributos físicos e visuais dos corpos d'água.

Embora a Constituição Federal (1988) não tenha trazido expressamente a previsão sobre a preservação da qualidade da água de acordo com os usos mais restritivos, o art. 225 estabeleceu que “todos tem direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (Brasil, 1988). De acordo com Brunckhorst (2019), “a primeira normatização brasileira de qualidade da água para consumo humano ocorreu em 1977, pelo Decreto Federal nº 79.367/77, que atribuiu ao Ministério da Saúde a competência para normatizar parâmetros de potabilidade”.

Da conferência de Dublin surgiram os famosos princípios que destacam a importância da gestão participativa e da adoção de mecanismos econômicos para a gestão dos recursos hídricos. Os princípios são: I - A água é um recurso finito e vulnerável, essencial para a manutenção da vida, do desenvolvimento e do ambiente; II - A gestão e o desenvolvimento dos recursos hídricos devem ser baseados no enfoque participativo, envolvendo usuários, projetistas e governos de todos os níveis; III - As mulheres têm um papel fundamental na administração, gestão e proteção dos recursos hídricos; IV - A água tem valor econômico em todos os seus usos e deve ser reconhecida como um bem econômico, (Gomes, 2017). Os princípios da convenção de Dublin foram incorporados na Lei das Águas do Brasil, que veio a ser publicada no ano de 1997. A degradação desses padrões por processos severos de assoreamento e turbidez rompe com esse preceito legal, justificando a necessidade de ferramentas de controle contínuo.

A Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como a Lei das Águas, é o marco legal que instituiu a PNRH. Entre outras finalidades, ela regulamentou o inciso XIX do Art. 21 da Constituição Federal, que define a competência da União para criar um sistema nacional de gerenciamento e estabelecer critérios para a outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos. O principal objetivo da PNRH, conforme exposto na legislação, é “assegurar à atual e às futuras

gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos" (Brasil, 1997).

Para alcançar os objetivos pretendidos, a PNRH conta com cinco instrumentos: os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, a cobrança pelo uso de recursos hídricos e o sistema de informações sobre Recursos Hídricos. Dos cinco instrumentos, três se relacionam mais diretamente com a qualidade da água: o enquadramento dos corpos hídricos, a outorga de direito de uso e o sistema de informações (Brunckhorst, 2019). Esta pesquisa dialoga diretamente com o Enquadramento e o Sistema de Informações, propondo o sensoriamento remoto orbital como suporte tecnológico para a operacionalização de ambos.

O Enquadramento consiste na classificação dos corpos d'água de acordo com os seus usos preponderantes (Art. 9º da Lei das Águas). O objetivo é duplo: (i) assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes, e (ii) reduzir os custos de combate à poluição através de ações preventivas permanentes.

A Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), detalha essa classificação, diferenciando os corpos d'água em águas doces, salinas e salobras, de acordo com a qualidade requerida para seus usos preponderantes. As águas doces são divididas em Classe Especial, Classe 1, Classe 2, Classe 3 e Classe 4. As classes 1 a 3 podem ser utilizadas para o abastecimento humano, variando o nível de tratamento, sendo que a Classe Especial, de acordo com o Art. 4º, Inciso II, Alínea "e", destina-se à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas. Sobre a turbidez, a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, traz que em rios classe 1 a turbidez deverá ser até 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT), nos rios classes 2 e 3, turbidez de até 100 UNT. É nesse parâmetro normativo (UNT) que se insere o problema central desta dissertação, visto que as cargas de sedimentos em suspensão lançadas pela atividade garimpeira alteram drasticamente a reflectância da água. Daí decorre a viabilidade de estimar os níveis de turbidez por meio de índices espectrais como o NDTI e o NDSSI, traduzindo dados de satélite em indicadores físicos de qualidade ambiental.

A Outorga é o instrumento que visa o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água (Art. 11). Segundo a Lei das Águas (Art. 12, III), o lançamento de esgotos e demais resíduos em corpos d'água está sujeito à outorga, garantindo que o descarte não comprometa a qualidade da água a jusante.

O Sistema de Informações (Art. 25) refere-se à sistemática de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão. Seu objetivo principal é "reunir, dar consistência e divulgar os dados e informações sobre

a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos no Brasil" (Brasil, 1997).

Segundo o relatório Conjuntura (2024, p. 34) da Agência Nacional de Águas (ANA), “a qualidade da água superficial e subterrânea é um fator que determina sua disponibilidade para os diversos usos, tais como abastecimento humano, recreação, produção de alimentos e a indústria”. O relatório destaca o monitoramento como essencial para a gestão efetiva, citando a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e a Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade de Água (RNQA), que em 2023 contava com 3.021 pontos de controle. Contudo, a imensidão territorial da região amazônica e o caráter dinâmico e muitas vezes clandestino do garimpo impõem limitações ao monitoramento analítico estritamente terrestre. Nesse cenário, o uso de dados derivados de sensores orbitais atua de forma complementar aos dados institucionais da ANA, gerando alertas rápidos de plumas de sedimentos.

A temática hídrica transcende a gestão nacional e ocupa posição relevante na agenda internacional há várias décadas. Em 1977, a Conferência das Nações Unidas sobre a Água, realizada em Mar del Plata, representou um marco inicial ao reconhecer a necessidade de planejamento e cooperação internacional para a gestão dos recursos hídricos. Posteriormente, em 1992, a Declaração de Dublin consolidou princípios fundamentais para a gestão da água, destacando seu caráter finito e vulnerável, a importância da participação social e o reconhecimento de seu valor econômico.

Em 2010, a Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas reconheceu o acesso à água limpa e segura e ao saneamento básico como direitos humanos fundamentais. Esse reconhecimento foi posteriormente incorporado à lógica da Agenda 2030, aprovada em 2015, na qual os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável passaram a orientar compromissos globais voltados à promoção do desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o ODS 6 dedica-se especificamente à água potável e ao saneamento, estabelecendo metas relacionadas à melhoria da qualidade da água, redução da poluição, eliminação do despejo de resíduos perigosos e proteção dos ecossistemas relacionados à água.

Mais recentemente, a Conferência da ONU sobre a Água, realizada em Nova York em 2023, reforçou a urgência de acelerar ações internacionais voltadas ao cumprimento do ODS 6. Assim, a quantificação da perda da qualidade óptica da água e do aumento de sedimentos em suspensão em rios afetados pela mineração ilegal não se relaciona apenas ao cumprimento da legislação brasileira, mas também ao esforço internacional de monitoramento, proteção e recuperação dos recursos hídricos. No caso desta pesquisa, essa articulação é especialmente relevante porque os índices espectrais analisados permitem avaliar alterações na turbidez da água em áreas remotas, contribuindo para a produção de informações ambientais compatíveis com os compromissos

nacionais e internacionais de sustentabilidade hídrica.

Uma introdução sobre os fundamentos da óptica hidrológica: IOPS e AOPS

Conforme Cortivo (2009, pág. 6), a óptica hidrológica é “o campo da Física que estuda o comportamento da luz na água, tentando definir propriedades ópticas do meio aquático tais como: características da água, espelhamento, absorção e comportamento da luz quando penetra na água”.

De acordo com o autor, nomeio aquático, há duas grandezas fundamentais que descrevem o comportamento da luz, sendo elas a radiância (L), que é a energia que viaja em uma direção específica, é o que o sensor do satélite efetivamente detecta ao apontar um pixel na água, e a irradiância (E), que é o fluxo total de energia que incide sobre uma superfície, vindo de todo um hemisfério. Ela é a soma integral das radiâncias.

Conforme Barbosa e outros (2019), A óptica hidrológica estuda como a radiação solar interage com a água. Enquanto o campo de luz pode ser mensurado através das grandezas radiométricas, o desafio central é compreender como a própria água altera essa luz. Quando a luz atravessa a coluna d’água, ela sofre dois fenômenos principais que modificam sua trajetória e intensidade, que são a absorção (a), que é a energia que é capturada pelo meio e transformada em calor ou energia química, e o espalhamento (b) que é a energia que muda de direção ao colidir com partículas. Essas propriedades são denominadas, conforme os autores, como propriedades ópticas inerentes (IOPs, *Inherent Optical Properties*), pois “suas magnitudes dependem somente da composição e da concentração das substâncias particuladas e dissolvidas presentes na água, além da própria água”. Ainda segundo os autores, a medida dos coeficientes das propriedades inerentes é feita por meio de equipamentos com fonte de luz própria, para evitar que sejam afetados por eventos externos. Os parâmetros são medidos tanto *in loco* quanto em laboratório.

Sobre a Irradiância, a fórmula pode ser dada por:

$$E = \Phi/A$$

Onde:

E = Irradiância

Φ = Fluxo radiante total

A: Área da superfície

Já a fórmula da radiância, que é o que o satélite detecta ou que corresponde à intensidade da energia detectada pelo sensor em um determinado ângulo de observação, pode ser dada por:

$$L = \frac{d^2\phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega}$$

Onde:

L = Radiância

$d^2 \phi$ = Fluxo radiante diferencial

dA = Área projetada da fonte na direção do observador.

$\cos\theta$ = Ângulo entre a normal da superfície e a direção da radiação.

$d\Omega$ = Ângulo sólido (estereorradiano), que mede a abertura angular pela qual a radiação está sendo observada.

A seguinte fórmula mostra a relação entre radiância e irradiância em um ângulo (θ):

$$E = \int 2\pi L(\theta, \phi) \cos\theta d\Omega$$

E = irradiância total

$L(\theta, \phi)$ = radiância, ou seja, quantidade de energia luminosa que vem de uma direção específica definida pelos ângulos.

Θ = ângulo zenital (em relação à normal da superfície).

Φ = ângulo azimutal

$\cos\theta$ = corrige o efeito do ângulo de incidência da luz. Quanto mais inclinada a luz chega, menor é sua contribuição efetiva na superfície.

$d\Omega$ = representa um pequeno elemento de ângulo sólido (uma “direção infinitesimal” no espaço).

$\int 2\pi$ = indica que estamos somando (integrando) todas as contribuições de radiância vindas de todas as direções do hemisfério superior (2π esterradianos).

Por outro lado, as propriedades ópticas aparentes (AOPs) estão relacionadas com a utilização de grandezas radiométricas como indicadores da cor e da transparência da água, segundo Barbosa e outros (2019), dessa forma, elas “quantificam e descrevem as mudanças as quais um corpo d’água submete o campo de luz incidentes”.

Segundo os autores, diferentemente das IOPs, as AOPs são definidas sob condições de iluminação natural, onde o fluxo de luz solar incide. Destacam ainda que as AOPs precisam ter estabilidade e características suficientemente regulares para que possam ser usadas como descritoras de um corpo d’água. De acordo com Rodrigues (2014), a reflectância espectral pode ser considerada como a tradução física da percepção humana da cor da água.

Ainda segundo Rodrigues (2014), as reflectância é descrita como a fração do fluxo que irradia sobre uma superfície que é refletida, sendo que o sensoriamento remoto utiliza frequentemente a Reflectância do Sensoriamento Remoto (R_{rs}), que é dada pela relação entre a radiância emergente (L_w) e a irradiância que incide na superfície do corpo d’água (E_d), conforme a seguinte fórmula (Rodrigues 2014, apud. Gordon et al., 1975; Morel & Priénur, 1977):

$$Rrs(\lambda) = Ed(\lambda)/Lw(\lambda)$$

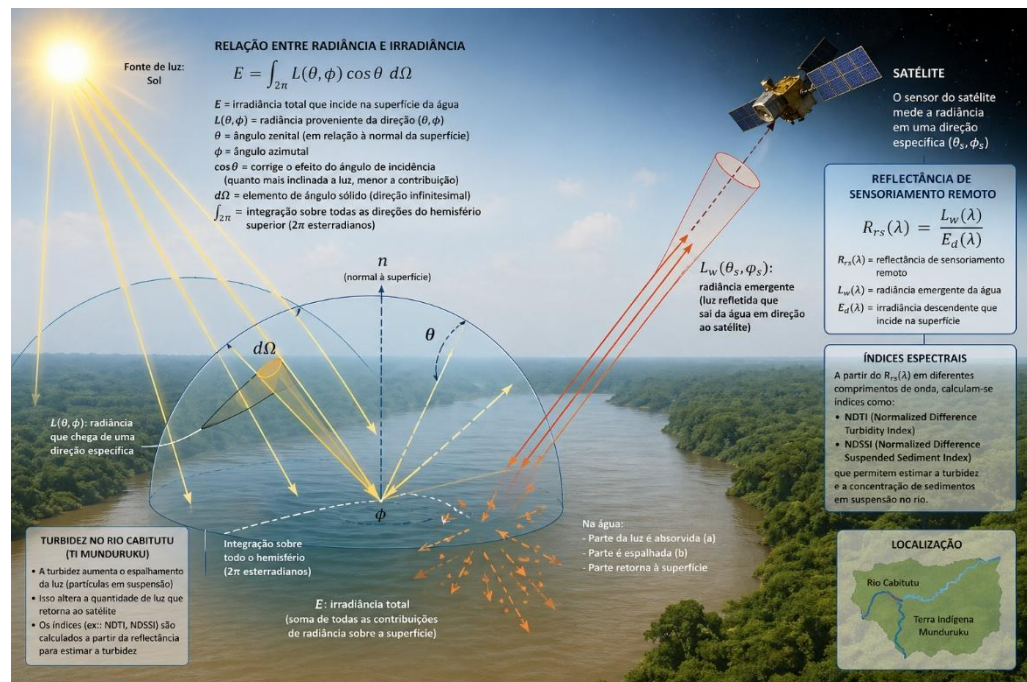
$Rrs(\lambda)$ = reflectância de sensoriamento remoto (em função do comprimento de onda)

$Lw(\lambda)$ = radiância emergente da água (luz que sai da água em direção ao sensor)

$Ed(\lambda)$ = irradiância descendente (luz solar que incide na superfície da água)

As fórmulas, bem como a relação entre radiância e irradiância podem ser explicadas na imagem a seguir:

Figura 1 – Relação entre radiância e irradiância com relação à captura por satélite



Fonte: autoral (2026), baseada em Rodrigues (2014).

A Figura 1 ilustra o processo de interação da radiação solar com o meio aquático, desde a incidência da irradiância, resultante da integração angular da radiância, até a fração de energia que retorna à superfície como radiância emergente. Essa radiação é captada por sensores orbitais e expressa na forma de reflectância de sensoriamento remoto (Rrs). A partir da variação espectral da Rrs , são derivados índices como o NDTI e o NDSSI.

O comportamento espectral da água turva

O sensoriamento remoto atua na obtenção do terreno da seguinte forma:

O sensoriamento remoto consiste na obtenção de informações do terreno, mediante os registros da interação da radiação eletromagnética (REM) com alvos, objetos e fenômenos sem contato com meio imageado. A teoria

corpuscular retrata a REM como a consequência da emissão de pequenos pulsos de energia e/ou formas ondulatórias que se forma pela oscilação do campo elétrico e magnético, que se propagam no vácuo na velocidade da luz. (Tirello, 2024, pág. 27)

A radiação eletromagnética (REM) interage com os diferentes materiais da superfície terrestre por meio de processos de reflexão, absorção e transmissão, os quais variam de acordo com a composição molecular de cada alvo (Tirello, 2024, *apud* Jensen, 2009). Nesse contexto, a assinatura espectral pode ser compreendida como o padrão característico dessa interação, permitindo a distinção e o reconhecimento de diferentes objetos na superfície terrestre por meio do sensoriamento remoto. Além disso, constitui uma ferramenta fundamental para a seleção das bandas espectrais mais adequadas em estudos ambientais (Tirello, 2024, *apud* Moraes, 2002).

De acordo com Barbosa *et al* (2003), o comportamento espectral da água pura é de espelhar mais da região do azul, decrescendo em direção ao vermelho, apresentando, dessa forma, uma coloração mais azulada ao ser observada pelo satélite. Por outro lado, quando há sedimentos em suspensão, a energia refletida migra para comprimentos de onda mais longos, a medida que a concentração dos sedimentos aumenta.

A presença de sedimentos em suspensão exerce papel relevante na qualidade da água, sobretudo por contribuir para o aumento da turbidez (Facco, 2023, *apud* Lima *et al.*, 2011; Somvanshi *et al.*, 2011; Chalov *et al.*, 2015; Trinh *et al.*, 2018). As propriedades ópticas da água são alteradas em função do tamanho, forma e distribuição dessas partículas, influenciando diretamente os processos de absorção e espalhamento da radiação (Facco, 2023, *apud* Bukata *et al.*, 1995).

Nesse sentido, o aumento da concentração de sedimentos em suspensão tende a elevar a turbidez e a reflectância da água, provocando modificações no seu comportamento espectral. Conforme apontado por Fracco (2023 *apud* Jensen (2009)), a resposta espectral permite inferir a presença de sedimentos em suspensão, enquanto a região do infravermelho próximo apresenta maior sensibilidade à detecção de partículas na superfície do corpo hídrico.

Relação entre a turbidez e sólidos suspensos totais

Segundo Olivetti *et al.* (2024), os sólidos suspensos totais (TSS) correspondem às partículas orgânicas e inorgânicas presentes em suspensão na água, sendo quantificados em unidade de massa por volume. Esse parâmetro está diretamente relacionado ao transporte de sedimentos, nutrientes e poluentes, oriundos de processos como erosão do solo, escoamento superficial em bacias hidrográficas e decomposição da matéria orgânica. Ainda conforme os autores, em condições de

alta turbidez, recomenda-se a utilização de bandas na região do vermelho, em função da saturação do sinal no infravermelho próximo.

A dinâmica dos sedimentos pode apresentar comportamento não linear ao longo do tempo. Olivetti (2024, *apud* Villar *et al.*, 2013), ao analisar o Rio Madeira, identificou a ocorrência de histerese, caracterizada pela variação da reflectância para uma mesma concentração de TSS em diferentes períodos. Esse fenômeno indica que a resposta espectral da água não depende apenas da quantidade de sedimentos, mas também de sua composição e da dinâmica temporal de transporte no sistema fluvial.

Conforme Lopardo (2002), os sólidos suspensos alteram as características físicas da água, especialmente sua transparência, constituindo um dos principais fatores associados à turbidez. Nesse sentido, variações na concentração de sedimentos em suspensão impactam significativamente os valores de turbidez detectados por sensores remotos, sendo que concentrações mais elevadas tendem a aumentar a variabilidade desse parâmetro (Sari *et al.*, 2017). Adicionalmente, partículas de menor diâmetro podem provocar maior variação na turbidez em comparação com partículas maiores, em razão das diferenças nos processos de espalhamento da radiação, embora tais variações não sejam sempre estatisticamente significativas.

Classificação limnológica de sioli

Faria Barbosa *et al.* (2003) destacam que Harald Sioli propôs uma das classificações mais tradicionais para as águas amazônicas, baseada em suas propriedades ópticas, físicas, químicas e biológicas, especialmente relacionadas à carga de sólidos em suspensão e matéria orgânica dissolvida. Nessa tipologia, os rios são divididos em três categorias principais: águas brancas, águas claras e águas pretas.

Os rios de águas brancas apresentam coloração turva, barrenta ou amarelada, resultante da alta concentração de sedimentos em suspensão, geralmente provenientes de processos erosivos nas regiões de cabeceira. Já os rios de águas claras caracterizam-se por maior transparência e coloração variando entre verde, verde-amarelado e verde-oliva, refletindo baixas concentrações de sedimentos e matéria orgânica. Por sua vez, os rios de águas pretas apresentam coloração escura, variando entre marrom e preto, associada à elevada presença de matéria orgânica dissolvida.

Essa classificação, originalmente inspirada em conhecimentos empíricos de populações indígenas, foi posteriormente sistematizada por Sioli a partir de investigações sobre fatores como tipo de solo, geomorfologia das áreas de nascente e composição mineral das bacias hidrográficas, permitindo compreender os rios como expressões da paisagem circundante (Da Silva, 2024).

Do ponto de vista limnológico e óptico, essa distinção está diretamente relacionada à

predominância de sedimentos em suspensão ou matéria orgânica dissolvida. Rios de águas brancas apresentam alta concentração de sólidos suspensos, enquanto rios de águas pretas são dominados por matéria orgânica dissolvida, e os rios de águas claras apresentam baixos níveis de ambos (De Moraes Rudorff et al., 2011, apud Sioli, 1984).

Essa diferenciação possui implicações diretas no comportamento espectral da água, influenciando sua reflectância e, conseqüentemente, a resposta captada por sensores remotos. Dessa forma, a classificação de Sioli fornece uma base importante para a interpretação de dados espectrais e para a análise de parâmetros como turbidez e concentração de sedimentos em suspensão.

Figura 2 – Rios de Águas Claras



Fonte: Aliança Águas da Amazônia (Michael Goulding).

Figura 3 – Rios de Águas Pretas



Fonte: Aliança Águas da Amazônia (Michael Goulding).

Figura 4 – Rios de Águas Brancas



Fonte: Aliança Águas da Amazônia (Michael Goulding).

Dos índices de análise de turbidez por sensoriamento remoto (ndti e ndssi)

De acordo com Ardyan (2025), dada a complexidade e a escala dos desafios ambientais, o sensoriamento remoto surgiu como uma ferramenta eficaz para o monitoramento da qualidade da água, pois ela oferece uma abordagem econômica e escalável para avaliar áreas de grandes dimensões. De acordo com o autor o Índice de Turbidez por Diferença Normalizada (NDTI) serve

para avaliar a extensão dos impactos da atividade humana na qualidade da água e apoiar o monitoramento e a gestão ambiental.

De acordo com De Salis *et al.* (2025) o NDTI permite estimar a turbidez de um corpo hídrico de forma periódica, pois fornece dados estratégicos para a gestão da qualidade da água em áreas remotas.

O NDTI, segundo Ardyan (2025) é um indicador amplamente reconhecido e confiável para avaliar a turbidez da água, ele é calculado como a diferença normalizada entre as bandas espectrais vermelha (red) e verde (green) da luz solar refletida na superfície da água, variando entre -1 e 1, sendo valores negativos para a água mais clara e mais positivos para a água mais turva.

De acordo com Castro *et al.* (2024) o valor do NDTI pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$NDTI = \frac{Red - Green}{Red + Green}$$

Almeida e Rocha (2021) trazem que a utilização das imagens satelitais Sentinel-2, disponibilizadas pela Agência Espacial Europeia (ESA), oferece a possibilidade de calcular o Índice de Diferença Normalizada de Sedimentos em Suspensão (NDSSI), o qual é calculado com base nas bandas azuis (blue) e infravermelho próximo (NIR), por meio da seguinte fórmula:

$$NDSSI = \frac{NIR - Blue}{NIR + Blue}$$

Com base no apresentado, os índices NDTI e NDSSI podem ser utilizados como parâmetros objetivos para a avaliação da turbidez hídrica, reduzindo a subjetividade associada à análise visual da coloração da água.

Para os fins desta pesquisa, a análise isolada da turbidez hídrica não é suficiente. Torna-se necessário integrar esses dados com indicadores da atividade garimpeira na região, bem como da estação do ano, a fim de ter uma base para realização de análises estatísticas para verificar a influência do garimpo na alteração da turbidez hídrica.

Do índice composto

A padronização por z-score foi empregada para tornar comparáveis variáveis com diferentes escalas e distribuições, procedimento amplamente utilizado em análises estatísticas (Johnson; Wichern, 2007). Dessa forma, os índices NDSSI e NDTI apresentam escalas, amplitudes e distribuições estatísticas distintas e, portanto, não podem ser combinados diretamente. Para torná-los comparáveis, cada índice foi inicialmente padronizado por meio do cálculo do z-score, definido

pela equação:

$$z_i = \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X}$$

em que X_i representa o valor observado do índice (NDSSI ou NDTI) em um determinado instante, μ_X é a média histórica do índice e σ_X é o respectivo desvio-padrão. Esse procedimento resulta em séries padronizadas com média zero e variância unitária.

Antes da combinação dos índices, foi avaliada a coerência física do sinal de cada métrica, de modo que valores mais elevados estivessem associados a maior grau de alteração ambiental. Quando necessário, o sinal do z-score foi invertido, conforme:

$$z_i^* = -z_i$$

para garantir a mesma direção interpretativa entre NDSSI e NDTI.

O **índice composto** foi então calculado como a média aritmética simples dos z-scores padronizados dos dois índices:

Esse indicador integrado representa o desvio conjunto padronizado do sistema em relação à sua condição média histórica, combinando informações espectrais (NDTI) e estruturais/superficiais (NDSSI). A utilização da média dos z-scores reduz a influência de ruídos específicos de cada índice e evita a dominância de uma única métrica, mantendo a interpretação física do resultado.

Assim, o índice composto pode ser empregado em análises temporais, modelos estatísticos e comparações entre períodos ou áreas, preservando consistência estatística e transparência metodológica, sem a necessidade de técnicas mais complexas de redução de dimensionalidade.

Dos alertas de garimpo e do índice de frente de garimpo

Os alertas de garimpo são gerados por sistemas como o DETER, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), caracterizado como um programa de detecção rápida de evidências de alteração da cobertura florestal na Amazônia. Segundo o INPE, o sistema foi desenvolvido para subsidiar ações de fiscalização e controle do desmatamento e da degradação ambiental, especialmente aquelas conduzidas pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Adicionalmente, imagens de alta resolução espacial, como as do satélite *PlanetScope*, são utilizadas para a identificação detalhada de polígonos de garimpo. De modo geral, a detecção dessas atividades baseia-se na comparação temporal de imagens, permitindo identificar alterações abruptas na superfície terrestre. Entre os principais indícios associados ao garimpo ilegal, destacam-se a exposição do solo nas margens dos rios e o aumento da turbidez da água.

Entretanto, uma limitação desses sistemas de alerta reside no fato de que os registros

correspondem a eventos pontuais no espaço e no tempo, não sendo capazes de indicar com precisão o momento de início da atividade ou sua persistência ao longo do tempo.

Nesse contexto, o Índice de Frente de Garimpo (IFG) foi proposto como uma alternativa para superar essa limitação, ao integrar dimensões espaciais e temporais da atividade garimpeira. Conforme Costa et al. (2025), o IFG constitui uma ferramenta analítica que vai além da simples quantificação de alertas, ao incorporar informações relacionadas à concentração espacial e à persistência temporal das ocorrências, permitindo uma interpretação mais qualificada da dinâmica do garimpo e contribuindo para a priorização de áreas críticas para fiscalização.

De forma geral, o índice considera a soma das áreas associadas aos alertas ao longo de um intervalo temporal, ponderada pela duração da atividade e pela recência dos eventos, podendo ser representado de maneira simplificada como:

$$IFG = \frac{\text{Somadas áreas de alertas}}{\frac{\text{Intervalo entre o primeiro e o último alerta}}{(\text{Data do último alerta}) / (\text{data de hoje})}}$$

Portanto, o IFG incorpora simultaneamente a intensidade da atividade, sua continuidade ao longo do tempo e sua atualidade, constituindo um indicador mais robusto para a análise da dinâmica do garimpo ilegal.

Garimpo ilegal: aspectos jurídicos, associação com organizações criminosas e o seu impacto na organização social e saúde das comunidades indígenas

O Garimpo Ilegal

O garimpo ilegal é definido como a atividade de extração mineral executada sem a devida permissão da União, a qual detém a propriedade de todos os bens minerais por determinação constitucional, ou quando essa prática ocorre em desacordo com a autorização obtida (Ribeiro *et al.*, 2019).

A conduta da garimpagem ilegal se enquadra primariamente no delito ambiental previsto no Art. 55 da Lei nº 9.605/98 (Lei de Crimes Ambientais), com pena de detenção de seis meses a um ano e multa. É crucial notar que a prática frequentemente resulta em concurso formal de crimes (Art. 70 do Código Penal), pois a mesma ação gera o delito ambiental e o crime contra a ordem econômica previsto no Art. 2º da Lei nº 8.176/91, que criminaliza a usuração, ou seja, a exploração de matéria-prima pertencente à União sem a devida autorização legal. A pena para a usuração é mais severa, variando de um a cinco anos de detenção, cumulada com multa.

O Constituinte Originário estabeleceu especial proteção às Terras Indígenas (TIs). O Art. 231 da Constituição Federal reconhece aos povos originários os direitos sobre as terras que

tradicionalmente ocupam, cabendo-lhes o usufruto exclusivo das riquezas do solo, dos rios e dos lagos nelas existentes. Além disso, o § 3º do Art. 231 estabelece que a pesquisa e a lavra de riquezas minerais em TIs só podem ser efetivadas com autorização do Congresso Nacional, ouvidas as comunidades afetadas.

O cerne da questão jurídica é que, na ausência da regulamentação e da autorização do Congresso Nacional para a exploração mineral em TIs, todo e qualquer garimpo realizado nessas terras pode ser legalmente definido como garimpo ilegal, pela leitura da Lei nº 8.176/91 e da Lei nº 9.605/98. No entanto, tramita no Congresso o Projeto de Lei nº 6.050/2023, que regulamenta a exploração econômica em terras indígenas, inclusive a garimpagem, com parecer favorável já aprovado pela Comissão de Direitos Humanos em agosto de 2025.

Associação com Organizações Criminosas

De acordo com Figueiredo *et al.* (2024), há evidências do consorciamento entre o Garimpo Ilegal e organizações criminosas de base prisional, como o Primeiro Comando da Capital (PCC) e o Comando Vermelho (CV), na região norte do Brasil. Segundo os autores, atualmente, a estrutura do garimpo envolve a utilização de maquinários pesados, o que traz a necessidade de investimentos pesados, e, com a baixa fiscalização ambiental e controle do sistema de tributação, atrai grupos que priorizam movimentações financeiras discretas e/ou facilitadas, especialmente para lavar dinheiro.

De acordo com a Lei nº 12.850, de 2 de agosto de 2013, a organização criminosa (OrCrim) pode ser definida como a associação de 4 (quatro) ou mais pessoas estruturalmente ordenada e caracterizada pela divisão de tarefas, ainda que informalmente, com objetivo de obter, direta ou indiretamente, vantagem de qualquer natureza, mediante a prática de infrações penais cujas penas máximas sejam superiores a 4 (quatro) anos, ou que sejam de caráter transnacional.

De acordo com De Castro (2024), o garimpo ilegal não permaneceria viável se, além da rede logística e de colaboradores, não existissem outros atores financiando a prática ilegal. De acordo com o autor, os financiadores vão desde fortes empresários a pessoas públicas detentoras de poder e influência política, mantendo-se o negócio viável devido ao grande retorno financeiro, apesar dos riscos envolvidos em perdas de investimentos e prisões. Isso evidencia que o garimpo ilegal transcende a simples extração mineral clandestina, configurando-se como uma atividade de crime organizado complexa e de colarinho branco, intimamente ligada ao sistema financeiro e político.

Da obrigação de reparar o dano e das medidas cíveis adequadas à contaminação

A proteção jurídica do meio ambiente no Brasil deve ser compreendida, em primeiro lugar, a partir da Constituição Federal de 1988. O art. 225 estabelece que “todos têm direito ao meio

ambiente ecologicamente equilibrado”, qualificando-o como bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, além de impor ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. Trata-se, portanto, de um direito fundamental de natureza difusa, cuja titularidade não pertence a um indivíduo isoladamente, mas à coletividade, incluindo as gerações presentes e futuras.

Nesse sentido, o dano ambiental pode ser compreendido como toda alteração adversa das características do meio ambiente, conceito que se aproxima da definição legal de degradação da qualidade ambiental prevista no art. 3º, II, da Lei nº 6.938/1981. A mesma lei define meio ambiente como o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas, bem como caracteriza a poluição como a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população, criem condições adversas às atividades sociais e econômicas, afetem desfavoravelmente a biota ou as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente.

Embora o meio ambiente seja juridicamente tratado pela Constituição como bem de uso comum do povo, e não necessariamente como sujeito autônomo de direitos no modelo clássico brasileiro, sua proteção não se limita à defesa de interesses patrimoniais individuais. A tutela ambiental possui natureza difusa e transindividual, razão pela qual a degradação de um rio, de uma floresta ou de uma Terra Indígena não representa apenas prejuízo privado, mas lesão a um bem jurídico coletivo, constitucionalmente protegido.

No plano infraconstitucional, o Código Civil, em seus arts. 186 e 927, estabelece a regra geral da responsabilidade civil fundada na prática de ato ilícito e no dever de reparação. Contudo, no Direito Ambiental, essa lógica é substancialmente modificada. A responsabilidade civil por dano ambiental é objetiva, nos termos do art. 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981, segundo o qual o poluidor é obrigado, independentemente da existência de culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros afetados por sua atividade. Assim, a responsabilização ambiental não exige a demonstração de dolo, negligência, imprudência ou imperícia, mas sim a comprovação do dano, da atividade degradadora e do nexo de causalidade entre ambos.

Essa disciplina concretiza o princípio do poluidor-pagador, segundo o qual aquele que causa degradação ambiental deve suportar os custos da prevenção, mitigação, reparação ou compensação dos danos produzidos. Contudo, esse princípio não pode ser interpretado como autorização para poluir mediante posterior pagamento. Ao contrário, ele reforça a necessidade de internalização dos custos ambientais da atividade econômica e de adoção de medidas eficazes para evitar, reduzir ou reparar os impactos ambientais.

No contexto do garimpo ilegal na Amazônia, a responsabilização apresenta dificuldades

adicionais, especialmente em razão da clandestinidade da atividade, da mobilidade dos agentes, da fragmentação das frentes de garimpo e da dificuldade de fiscalização em áreas remotas. Por isso, a identificação do dano e a demonstração de sua associação com a atividade garimpeira tornam-se elementos centrais para a atuação administrativa, cível e penal dos órgãos competentes. O Laudo Pericial Criminal Federal nº 091/2018, por exemplo, apontou que a atividade garimpeira na bacia do rio Tapajós promove alteração expressiva na coloração das águas, em razão do despejo de sedimentos provenientes do desmonte hidráulico em garimpos de aluvião, com formação de plumas de turbidez identificáveis por imagens de satélite e por análises de campo. Esse ponto dialoga diretamente com a proposta desta dissertação, que utiliza índices espectrais como instrumentos auxiliares para a identificação de alterações hídricas associadas ao garimpo ilegal.

A atuação do Ministério Público na defesa do meio ambiente, especialmente por meio de ações civis públicas, denúncias criminais, termos de ajustamento de conduta e pedidos de reparação por danos ambientais, revela a importância institucional da tutela coletiva na Amazônia. Um exemplo dessa atuação é o Processo nº 1037536-26.2024.4.01.3200, no qual o MPF ofereceu denúncia contra investigado acusado de extração ilegal de ouro no rio Puruê, no município de Japurá, Amazonas. Conforme divulgado pelo próprio órgão, o investigado foi flagrado durante fiscalização do Ibama, em agosto de 2024, portando aproximadamente 50 gramas de ouro e mercúrio, além de operar draga sem autorização dos órgãos competentes. Nesse caso, além da responsabilização criminal, o MPF requereu a fixação de indenização por danos ambientais no valor de R\$ 67,9 mil, o pagamento de R\$ 5 mil por danos morais coletivos e a perda dos bens utilizados na prática criminosa.

Embora o caso envolva um episódio específico de flagrante, o valor de R\$ 5 mil requerido a título de danos morais coletivos merece reflexão crítica quando analisado à luz da gravidade potencial do garimpo ilegal em ambientes amazônicos. A utilização de mercúrio, a operação de dragas em cursos d'água e a exploração mineral sem autorização não representam apenas infrações patrimoniais contra a União, mas condutas com potencial de afetar a qualidade da água, a fauna aquática, a saúde humana, os modos de vida de comunidades ribeirinhas e indígenas e a integridade dos ecossistemas. Nessa perspectiva, valores reduzidos podem ter baixa capacidade compensatória e pedagógica, sobretudo quando comparados aos custos ambientais, sociais e sanitários associados à atividade garimpeira ilegal. A crítica não se dirige à atuação institucional do Ministério Público, mas à necessidade de que a valoração do dano moral coletivo ambiental seja compatível com a extensão, a gravidade, a persistência e a função dissuasória da responsabilização ambiental.

Além da responsabilidade do poluidor direto, deve-se considerar também o papel do Estado. A Constituição atribui ao Poder Público o dever de defender e preservar o meio ambiente, o que

inclui fiscalizar, prevenir danos, reprimir atividades ilícitas, restaurar áreas degradadas e proteger populações vulneráveis. A omissão estatal diante de atividades degradadoras conhecidas pode ensejar responsabilização, especialmente quando demonstrado que havia dever jurídico de agir e possibilidade concreta de prevenção ou mitigação do dano.

Em casos recentes relacionados ao garimpo ilegal, o Ministério Público Federal tem incluído entes públicos no polo passivo de ações civis públicas quando identifica possível omissão fiscalizatória. No caso do rompimento de barragem de rejeitos no Igarapé Água Preta, no Amapá, o MPF requereu indenização de R\$ 51,6 milhões e apontou omissão da União, da Agência Nacional de Mineração, do Estado e do Município na fiscalização da área impactada. Esse exemplo demonstra que a responsabilidade ambiental pode alcançar não apenas o poluidor direto, mas também o Poder Público quando sua omissão contribui para a ocorrência, continuidade ou agravamento do dano.

Diante desse cenário, a utilização de indicadores robustos e verificáveis torna-se essencial para fortalecer a responsabilização ambiental. No caso desta pesquisa, os índices espectrais de turbidez e os indicadores de atividade garimpeira não substituem a perícia ambiental ou a instrução judicial, mas podem contribuir para demonstrar a ocorrência de alterações ambientais, sua distribuição espacial, sua evolução temporal e sua associação com frentes de garimpo. Assim, mesmo em um regime de responsabilidade objetiva, no qual não se exige prova de culpa, permanece indispensável produzir evidências consistentes sobre o dano, a atividade degradadora e o nexo causal.

Dos meios de prova para caracterização do dano ambiental

Embora a responsabilidade civil por dano ambiental seja objetiva, isso não significa que a reparação possa ser imposta sem demonstração mínima dos elementos que estruturam o dever de indenizar ou reparar. A objetividade da responsabilidade afasta a necessidade de comprovação de dolo ou culpa, mas não elimina a exigência de comprovação do dano ambiental, da atividade potencialmente degradadora e do nexo de causalidade entre ambos. Essa lógica decorre do art. 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981, segundo o qual o poluidor é obrigado, independentemente de culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros afetados por sua atividade.

A partir da matriz constitucional, a prova do dano ambiental assume função não apenas processual, mas também institucional, pois permite transformar a degradação ambiental em fato tecnicamente demonstrável, subsidiando medidas de prevenção, reparação, compensação e responsabilização.

No processo judicial, os meios de prova são disciplinados pelo Código de Processo Civil, que admite todos os meios legais e moralmente legítimos para demonstrar a verdade dos fatos. Em

matéria ambiental, essa abertura probatória permite o uso de laudos técnicos, perícias judiciais e extrajudiciais, relatórios de fiscalização, autos de infração, imagens de satélite, séries temporais, dados georreferenciados, análises laboratoriais de água e sedimentos, registros fotográficos, documentos administrativos, depoimentos e demais elementos capazes de evidenciar a existência, a extensão e a origem provável do dano.

A responsabilidade pela produção e utilização desses meios de prova varia conforme a esfera de atuação. Na esfera administrativa, cabe aos órgãos ambientais e fiscalizatórios, como Ibama, ICMBio, órgãos estaduais e municipais de meio ambiente, Agência Nacional de Mineração e demais instituições competentes, realizar vistorias, lavrar autos de infração, produzir relatórios técnicos, coletar amostras e adotar medidas cautelares ou sancionatórias. Na esfera judicial coletiva, o Ministério Público, a Defensoria Pública, os entes federativos, autarquias, empresas públicas, fundações, sociedades de economia mista e associações legitimadas podem propor ação civil pública para a proteção do meio ambiente, nos termos da Lei nº 7.347/1985.

O Ministério Público exerce papel especialmente relevante nesse contexto, pois atua como legitimado para a tutela de direitos difusos e coletivos, podendo instaurar procedimentos investigatórios, requisitar informações, celebrar termos de ajustamento de conduta, ajuizar ações civis públicas e requerer provas técnicas destinadas à demonstração da degradação ambiental. No entanto, a atuação probatória não se limita ao Ministério Público: o Estado, por meio de seus órgãos ambientais e instituições técnicas, também possui o dever constitucional e legal de produzir informação ambiental qualificada, especialmente quando se trata de áreas remotas, de difícil fiscalização e sujeitas a ilícitos ambientais persistentes.

No caso do garimpo ilegal em recursos hídricos amazônicos, os meios de prova devem buscar demonstrar não apenas a presença física da atividade minerária, mas também seus efeitos ambientais. Assim, imagens de satélite e dados de sensoriamento remoto podem indicar abertura de frentes de garimpo, supressão de vegetação, exposição de solo, formação de cavas, presença de balsas ou dragas e alteração da coloração da água. Quando associados a índices espectrais de turbidez, dados hidrológicos, laudos periciais e análises químicas, esses elementos podem contribuir para demonstrar a relação entre a atividade garimpeira e a degradação da qualidade hídrica.

Nesse ponto, a presente pesquisa se insere como contribuição técnico-científica à produção de prova ambiental. Os índices NDTI, NDSSI, o índice composto e o Índice de Frente de Garimpo não substituem a perícia judicial nem a análise laboratorial, mas podem funcionar como evidências complementares para indicar padrões espaciais e temporais de alteração da turbidez associados à dinâmica do garimpo ilegal. Essa função é particularmente relevante em áreas como a Terra Indígena Munduruku, em que a limitação de acesso, a ausência de monitoramento contínuo in situ

e a mobilidade das frentes garimpeiras dificultam a produção tradicional de prova ambiental.

Portanto, a prova do dano ambiental em casos de garimpo ilegal deve ser compreendida de forma integrada e multidisciplinar. A responsabilização objetiva dispensa a prova da culpa, mas não dispensa a construção de um conjunto probatório robusto, capaz de demonstrar a ocorrência do dano, sua extensão, sua persistência, sua reversibilidade ou irreversibilidade e sua associação com determinada atividade degradadora. É nesse espaço que o sensoriamento remoto, a inteligência geoespacial e os indicadores espectrais podem fortalecer a atuação administrativa, pericial e judicial na defesa do meio ambiente.

Dessa forma, a utilização de indicadores ambientais verificáveis fortalece a capacidade do Estado e dos legitimados coletivos de demonstrar tecnicamente o dano ambiental, reduzindo a dependência exclusiva de flagrantes presenciais e ampliando a eficiência da tutela ambiental em áreas de difícil acesso.

Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (censipam)

Surgimento e Contexto Estratégico

A necessidade de implementar políticas regionais e de defesa para a Amazônia, visando combater ilícitos, proteger o bioma, fomentar o desenvolvimento sustentável e elevar a qualidade de vida da população, foi identificada por volta de 1980. Essa necessidade decorria da grave vulnerabilidade da região, manifestada por questões de segurança e soberania (De Melo Nogueira, 2023).

A fragilidade era notória, impulsionada por uma vigilância aérea deficiente e pela ausência de uma rede de vigilância eficaz, o que facilitava atividades ilegais como o tráfico de drogas, agravado pela proximidade com grandes produtores de cocaína (Colômbia, Bolívia e Peru) (De Melo Nogueira, 2023).

Neste contexto, surge o projeto do Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM), originado pela Exposição de Motivos nº 194 do Ministério da Aeronáutica em 1990 (De Resende Fagundes, 2013). “O fim da Guerra Fria e a reconfiguração da segurança internacional impulsionaram o projeto como uma tentativa de responder às “novas ameaças”, como o narcotráfico, o terrorismo e o crime organizado” (De Resende Fagundes, 2013, p. 3).

Entre os objetivos do SIVAM destacavam-se: a geração de conhecimentos sobre a Amazônia brasileira; integrar órgãos setoriais do Governo; a fiscalização, controle, vigilância e monitoramento sistemático da região; e o aprimoramento e expansão dos meios de comunicação (De Melo Nogueira, 2023).

Em 2002, surge o Censipam, vinculado inicialmente à Casa Civil e, posteriormente,

transferido para o Ministério da Defesa (2011). O Censipam foi criado com a finalidade de gerenciar o Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), e sua estrutura atual é regida pelo Decreto nº 11.337/2023. No âmbito normativo atual, as competências do órgão ganham contornos estratégicos voltados diretamente à inteligência geográfica e ao monitoramento espacial. Conforme o Art. 53 do referido Decreto, cabe ao Censipam a atribuição de integrar informações oriundas de diversos órgãos e gerar conhecimento atualizado para fins de articulação, planejamento e coordenação de ações globais de governo, focando na proteção ambiental, no desenvolvimento sustentável e na repressão aos ilícitos na região (Brasil, 2023). Adicionalmente, a autoria legal delega ao Centro a função de realizar o levantamento sistemático de dados de monitoramento para subsidiar tanto ações governamentais, nas esferas federal, estadual, municipal e distrital, quanto as operações de defesa da Amazônia Legal, estendendo essa vigilância de interesse estratégico também ao mar territorial e à Zona Econômica Exclusiva (Brasil, 2023).

Figura 5 – Turbidez da água após ações de desintrusão



Fonte: Censipam (2025)

Questões logísticas da região amazônica

A Logística, embora originada no contexto militar (Magalhães, 2011), é um fator primordial para a sustentação tanto das operações estatais quanto das atividades ilícitas na Amazônia Legal. A origem dos estudos logísticos, aprofundados na esfera militar, demonstra que os deslocamentos visavam escolher e montar acantonamentos onde as colunas de marcha pudessem se sustentar (Magalhães, 2011).

O General de Divisão R1 Neiva Filho (2025) afirma que a integração entre estratégia e logística foi um fator fundamental para a sustentação de tropas em campanha. O General argumenta que, durante o combate, a logística deve suprir 3 (três) bocas, a do homem, a do tanque e a do cano (Neiva Filho, 2025).

Durante muito tempo, a Logística esteve associada apenas às atividades militares. Os principais acontecimentos históricos eram as guerras e delas surgiram as grandes inovações tecnológicas, principalmente, no campo da logística. Os estrategistas militares se depararam com a necessidade de fazer fluir a

s informações, além de prever e transportar mantimentos, combustíveis e munições, cada vez em maior volume e para maiores distâncias, como forma de propiciar maior operacionalidade aos exércitos envolvidos nas batalhas (Magalhães, 2011, p. 39).

O Desafio Logístico da Amazônia

Com a precária rede de rodovias atendendo a região, a maior parte do transporte de cargas depende dos modais fluvial e aéreo. A dependência da navegação e a escassez de estradas trafegáveis são as principais características da infraestrutura amazônica.

A Logística como Condição para a Ilegalidade

A fragilidade logística da Amazônia é explorada por grupos criminosos, transformando-se na condição de possibilidade para a sustentação do garimpo ilegal. O garimpo em Terras Indígenas ocorre em áreas remotas, sem acesso rodoviário ou mesmo hidroviário eficiente, tornando o transporte aéreo indispensável para a cadeia produtiva ilegal.

As pistas de pouso clandestinas são feitas para o suporte logístico da região garimpeira, sendo que gêneros alimentícios e combustível para as máquinas utilizadas no garimpo são transportados de aviões de pequeno porte (The New York Times, 2022).

“Grupos criminosos financiados por uma malha corruptiva, utilizam as pistas de pouso para a apropriação e extração de recursos minerais, o transporte de equipamentos e combustível até áreas onde não existem estradas, para suprir atividades criminosas” (Buzato e Mengue, 2025, p. 670 e 671).

Estado da Arte

A intensificação das atividades antrópicas na Amazônia brasileira tem produzido alterações significativas nos sistemas ambientais, especialmente nos recursos hídricos. Entre essas atividades, destacam-se o desmatamento, a conversão de florestas em áreas agropecuárias, a abertura de novas frentes de ocupação territorial e a expansão da atividade garimpeira ilegal. Tais processos modificam

a paisagem, alteram o regime hidrossedimentológico das bacias hidrográficas e comprometem a qualidade da água, com efeitos diretos sobre ecossistemas aquáticos e populações humanas dependentes desses recursos.

A literatura recente aponta que as mudanças no uso e na cobertura do solo na Amazônia constituem uma das principais pressões sobre a conservação dos recursos hídricos. Barros et al. (2023), ao analisarem a microbacia do rio Professora Cleci, na Amazônia Ocidental, verificaram expressiva redução da cobertura florestal ao longo de 39 anos. Em 1984, a microbacia possuía 88,56% de floresta nativa, enquanto em 2023 esse percentual foi reduzido para 14,41%, com aumento da área agropecuária para 84,58%. Na zona ripária, a floresta nativa também sofreu forte redução, passando de 88,72% para 18,68%. Os autores destacam que a supressão da vegetação nativa, sobretudo em áreas ripárias, tende a reduzir a disponibilidade e a qualidade da água, ampliando a suscetibilidade à escassez hídrica em períodos de estiagem.

De modo semelhante, França e Deus (2021) demonstram que o sensoriamento remoto associado a modelos de tendência constitui importante instrumento para avaliar transformações no uso e cobertura do solo e subsidiar a gestão ambiental na Amazônia. Ao analisarem o município de Capixaba, no Acre, os autores observaram redução da vegetação em torno de 15% entre 2007 e 2017, acompanhada pelo aumento de áreas antropizadas. O estudo evidencia que a análise espaço-temporal da paisagem permite compreender a dinâmica de ocupação territorial e sua relação com processos de desmatamento, solo exposto e expansão de usos produtivos.

Essas alterações na cobertura vegetal são relevantes para a qualidade dos recursos hídricos, pois a retirada da vegetação nativa favorece a erosão, o carreamento de sedimentos e o aumento da carga de material particulado nos cursos d'água. Barbino et al. (2023), ao analisarem o Índice de Área Foliar (IAF) em áreas de floresta e pastagem na Amazônia Ocidental, destacam que a conversão de florestas em sistemas agropecuários altera propriedades do solo, fluxos de energia, evapotranspiração e padrões microclimáticos. O estudo reforça que áreas florestadas apresentam maior capacidade de regulação ambiental, enquanto áreas convertidas em pastagem respondem de maneira mais imediata a eventos extremos, como secas e cheias.

No contexto dos ambientes aquáticos, a supressão de vegetação e a intensificação de atividades antrópicas contribuem para o aumento da turbidez, do assoreamento e da perda de qualidade ecológica dos rios. De Sousa et al. (2022), ao estudarem rios amazônicos na região do Xingu, relacionaram uso do solo, qualidade da água, biodiversidade de invertebrados aquáticos e comportamento de peixes. Os autores identificaram que, desde 1985, houve redução expressiva da cobertura florestal nas áreas analisadas, com aumento de atividades agropecuárias e áreas impactadas. O rio mais impactado apresentou valores de sólidos totais e turbidez muito superiores

aos do rio mais preservado, sendo observados $147,90 \text{ mg.L}^{-1}$ de sólidos totais e $116,44 \text{ UT}$ de turbidez no ponto impactado, contra $25,25 \text{ mg.L}^{-1}$ e $3,35 \text{ UT}$ no ponto mais preservado.

Esse resultado demonstra que alterações no uso do solo podem produzir efeitos mensuráveis sobre a qualidade da água e a estrutura ecológica dos ambientes fluviais. O estudo de De Sousa et al. (2022) também aponta que parâmetros como turbidez e sólidos totais apresentaram forte relação com áreas mais impactadas, enquanto os indicadores de abundância, diversidade e preferência comportamental dos peixes estiveram associados ao ambiente mais preservado. Assim, a degradação da qualidade da água não se limita a um problema físico-químico, mas também afeta a biodiversidade e a disponibilidade de habitats aquáticos.

Entre as atividades antrópicas associadas à degradação hídrica na Amazônia, o garimpo ilegal de ouro ocupa posição central. Marinho e Ribeiro (2023), em estudo sobre a bacia do rio Amanã, situada entre Amazonas e Pará, demonstraram que a atividade garimpeira provocou impactos ambientais significativos, incluindo redução de vegetação nativa, diminuição dos corpos d'água e aumento de 459% da área de garimpo entre 2010 e 2020. Os autores também indicaram que a mineração ilegal pode ter provocado aumento de duas a três vezes na turbidez do rio Amanã em comparação com rios próximos, como o Paracuí e o Maués-Açú.

A dinâmica descrita por Marinho e Ribeiro (2023) é especialmente relevante porque o rio Amanã e seus afluentes possuem, naturalmente, características de águas pretas, com baixa carga de sedimentos suspensos. Nesse tipo de ambiente, a introdução de sedimentos oriundos do garimpo tende a produzir alterações espectrais e visuais mais evidentes. Os autores destacam que o lançamento de sedimentos provenientes da atividade garimpeira modifica a qualidade da água nas regiões a jusante e que o monitoramento por satélite se apresenta como ferramenta fundamental para avaliar esses impactos em sistemas fluviais com presença de garimpo.

Cabral, Miranda e Gomes (2023), em relato de experiência sobre a situação ambiental do rio Amanã na Floresta Nacional do Pau-Rosa, também observaram impactos físicos decorrentes da atividade garimpeira. Durante percurso fluvial, os autores identificaram pontos de garimpo ilegal com presença de dragas, trechos assoreados, estreitamento do rio e aumento visível de sólidos em suspensão. Segundo os relatos locais registrados no estudo, águas antes consideradas cristalinas passaram a apresentar elevada turbidez, além de preocupação da população tradicional quanto à possível contaminação por mercúrio.

A relação entre garimpo, turbidez e mercúrio é amplamente discutida na literatura. Gray et al. (2002), ao investigarem áreas de mineração artesanal de ouro no Suriname, verificaram que águas provenientes de áreas mineradas apresentaram concentrações elevadas de mercúrio total e metilmercúrio em comparação com áreas de referência não contaminadas. O estudo demonstrou que

o aumento da turbidez estava correlacionado ao aumento do transporte de mercúrio, indicando que parte significativa desse contaminante é transportada aderida a partículas suspensas.

Esse achado é relevante para estudos em rios amazônicos, pois indica que a turbidez não deve ser interpretada apenas como uma alteração física da água, mas também como possível indicador indireto de transporte de contaminantes associados aos sedimentos. Em áreas de garimpo, a remobilização do leito fluvial, a erosão de margens, o lançamento de rejeitos e o uso de mercúrio na amalgamação do ouro criam condições para o aumento simultâneo de sedimentos suspensos e contaminantes metálicos. Gray et al. (2002) destacam ainda que ambientes com maior estagnação, matéria orgânica e sedimentos podem favorecer processos de metilação do mercúrio, ampliando o risco ecológico e sanitário.

Na Amazônia brasileira, Kehrig, Howard e Malm (2008) analisaram concentrações de metilmercúrio em peixes predadores do gênero *Cichla* em rios e reservatórios. Os autores verificaram que esses peixes podem atuar como bioindicadores da contaminação por metilmercúrio, pois integram a exposição ao contaminante ao longo do tempo. No rio Tapajós, onde garimpo de ouro e desmatamento contribuem para elevada turbidez, foram observadas concentrações relevantes de metilmercúrio nos peixes analisados. O estudo também reforça que a exposição humana ao metilmercúrio ocorre principalmente pelo consumo de pescado, o que torna populações ribeirinhas e indígenas particularmente vulneráveis.

Os impactos do garimpo sobre povos indígenas também aparecem de forma consistente na literatura. Miranda et al. (2024), em revisão sistemática sobre os impactos da mineração nos povos Yanomami, identificaram como principais consequências do garimpo ilegal o desmatamento, a turbidez e sedimentação dos rios, a poluição por mercúrio em solo e água, a contaminação de fontes alimentares, a disseminação de doenças infectocontagiosas e o aumento de conflitos e violência. Os autores concluem que a morbimortalidade indígena associada ao garimpo decorre de um conjunto de fatores ambientais, sanitários e sociais, entre os quais se destacam a contaminação ambiental por mercúrio e a redução da segurança alimentar.

Esses estudos evidenciam que o garimpo ilegal deve ser analisado como um fenômeno multidimensional. A atividade não apenas altera propriedades físicas da água, como turbidez e sólidos suspensos, mas também introduz contaminantes, modifica habitats, afeta cadeias tróficas e compromete a saúde de populações humanas. Em Terras Indígenas, esses impactos assumem maior gravidade, pois os rios exercem função central no abastecimento, na alimentação, na mobilidade, na cultura e na reprodução social das comunidades.

Do ponto de vista limnológico e ecológico, a turbidez exerce influência direta sobre a disponibilidade de luz na coluna d'água. Huszar et al. (2022), ao analisarem o lago Batata, no Pará,

impactado historicamente por rejeitos de mineração de bauxita, demonstraram que a turbidez inorgânica reduziu a penetração de luz e afetou a biomassa fitoplanctônica. Embora se trate de mineração de bauxita, e não de garimpo aurífero, o estudo contribui para compreender os efeitos ecológicos do aumento de partículas suspensas em ambientes aquáticos amazônicos. A pesquisa mostra que a redução da turbidez e da atenuação luminosa residual pode favorecer a recuperação gradual da biomassa fitoplanctônica em áreas impactadas.

Essa relação entre sedimentos, turbidez e resposta ecológica reforça a importância de métodos capazes de acompanhar variações espaciais e temporais da qualidade da água. Nesse sentido, o sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado para monitorar ambientes aquáticos, sobretudo em áreas extensas, remotas e de difícil acesso, como a Amazônia. A utilização de imagens de satélite permite identificar mudanças na cobertura do solo, expansão de áreas de garimpo, alterações na superfície da água e variações espectrais associadas à presença de sedimentos suspensos.

Dutra, Tavares e Ribeiro (2019), ao analisarem o uso combinado de imagens Sentinel-2 MSI e Landsat-8 OLI em um lago de abastecimento público em Belém, Pará, ressaltam que o regime de nuvens constitui uma das principais limitações ao sensoriamento remoto óptico na Amazônia. Ainda assim, os autores concluem que a integração entre diferentes sensores amplia a disponibilidade temporal de imagens e pode subsidiar estudos sobre clorofila-a, matéria orgânica dissolvida, sólidos suspensos totais e turbidez. O estudo também destaca a necessidade de validação *in situ* para o fortalecimento de programas de monitoramento ambiental baseados em sensoriamento remoto.

A literatura internacional também confirma a aplicabilidade de índices espectrais para o monitoramento de ambientes lacustres e da qualidade da água. Rawat e Singh (2024), ao estudarem um lago de altitude na Índia com imagens Sentinel-2 A/B, utilizaram índices como NDVI, NDWI e NDTI para monitorar a vegetação aquática, a extensão da superfície hídrica e a turbidez associada à presença de partículas suspensas. Os autores destacam que os dados orbitais são úteis para superar limitações da amostragem *in situ*, geralmente trabalhosa, demorada e restrita no tempo e no espaço, especialmente em ambientes onde o monitoramento frequente e abrangente demanda elevados custos operacionais.

Das et al. (2022), ao analisarem a qualidade da água do rio Ganges com imagens Sentinel-2 e Landsat-8, utilizaram o NDTI para avaliar alterações na turbidez em diferentes períodos associados à pandemia de COVID-19. O estudo demonstrou que variações nos índices espectrais podem refletir mudanças na pressão antrópica sobre corpos hídricos. Embora realizado fora da Amazônia, o trabalho contribui metodologicamente ao demonstrar a utilidade do NDTI para análise temporal de turbidez em sistemas fluviais.

A fundamentação física desses índices está associada à óptica hidrológica. Pinet et al. (2017), ao investigarem rios da bacia amazônica, demonstraram que as propriedades ópticas aparentes e inerentes da água possuem relação com a concentração de sedimentos suspensos. O estudo mostrou que variações na granulometria, composição mineralógica e índice de refração dos sedimentos influenciam a reflectância da água, especialmente nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo. Essa contribuição é fundamental para compreender por que ambientes impactados por sedimentos oriundos do garimpo podem apresentar resposta espectral distinta em imagens orbitais.

No caso específico da atividade garimpeira, o revolvimento do leito dos rios, a abertura de cavas e o lançamento de rejeitos elevam a concentração de sedimentos em suspensão. Esses sedimentos alteram a forma como a radiação eletromagnética interage com a superfície da água, aumentando o espalhamento da luz e modificando a reflectância registrada pelos sensores orbitais. Assim, índices espectrais como o NDTI podem funcionar como indicadores indiretos de alterações físicas da água associadas à atividade minerária.

A revisão dos estudos analisados permite identificar uma convergência importante: os impactos do garimpo ilegal sobre a qualidade da água são detectáveis tanto por observações de campo quanto por técnicas de sensoriamento remoto. Os relatos e estudos empíricos no rio Amanã evidenciam aumento de turbidez, assoreamento e presença de dragas; os estudos sobre mercúrio demonstram que sedimentos suspensos podem atuar como meio de transporte de contaminantes; e os estudos de sensoriamento remoto demonstram que a turbidez e os sólidos suspensos podem ser inferidos por meio da resposta espectral da água.

Dessa forma, a literatura sustenta a pertinência de pesquisas que integrem indicadores de atividade garimpeira, índices espectrais de turbidez e análise espaço-temporal da dinâmica territorial. Essa integração é particularmente relevante para regiões como a Terra Indígena Munduruku, onde a dificuldade de acesso, a ausência de monitoramento in situ contínuo e a expansão do garimpo ilegal exigem instrumentos complementares de vigilância ambiental. A aplicação de geotecnologias pode contribuir não apenas para a identificação de áreas impactadas, mas também para a produção de evidências técnicas capazes de subsidiar políticas públicas, fiscalização ambiental, gestão de recursos hídricos e análise da associação entre atividade ilícita e dano ambiental.

Assim, a revisão da literatura demonstra que a relação entre garimpo ilegal e turbidez da água deve ser compreendida dentro de um sistema mais amplo, que envolve alterações de uso do solo, supressão de vegetação, erosão, transporte de sedimentos, contaminação por mercúrio, impactos ecológicos e vulnerabilidade de populações indígenas e tradicionais. Nesse cenário, o sensoriamento remoto emerge como ferramenta estratégica para o monitoramento ambiental

amazônico, especialmente quando associado a dados geoespaciais, séries temporais e indicadores territoriais de pressão antrópica.

Síntese conceitual: garimpo ilegal, logística ilícita, impacto hídrico e responsabilização

A partir do referencial teórico analisado, é possível estabelecer uma articulação sistêmica entre o crime ambiental organizado, a logística ilícita, os impactos sobre os recursos hídricos e os mecanismos jurídicos de responsabilização. Nesse contexto, o garimpo ilegal na Amazônia deve ser compreendido não apenas como uma atividade extrativista irregular, mas como um sistema criminoso estruturado, cuja manutenção depende de cadeias logísticas complexas e da atuação coordenada de múltiplos agentes.

A logística ilícita configura-se como elemento central desse sistema, viabilizando o transporte contínuo de maquinário pesado, combustíveis e mercúrio, bem como a ocupação de áreas remotas e de difícil acesso. É por meio dessa estrutura que a atividade garimpeira se instala e se perpetua nos leitos dos rios, promovendo a mobilização de sedimentos, a alteração do regime hidrossedimentológico e a introdução de contaminantes nos corpos d'água.

Sob a perspectiva físico-ambiental, esses processos resultam em modificações mensuráveis nas propriedades ópticas da água, especialmente no aumento da turbidez e na concentração de sólidos suspensos. Tais alterações afetam diretamente a interação da radiação eletromagnética com o meio aquático, modificando sua assinatura espectral e permitindo a detecção indireta desses impactos por meio de técnicas de sensoriamento remoto. Nesse sentido, índices espectrais como o NDTI e o NDSSI constituem instrumentos relevantes para a identificação de alterações na qualidade da água, funcionando como indicadores indiretos da atividade garimpeira.

A integração desses indicadores com métricas da dinâmica do garimpo, como alertas de desmatamento e índices espaço-temporais (a exemplo do Índice de Frente de Garimpo – IFG), possibilita o fortalecimento da análise da associação entre a conduta ilícita e o dano ambiental. Essa relação é central no âmbito jurídico, uma vez que, embora a responsabilidade civil ambiental seja de natureza objetiva, exige-se a demonstração do vínculo entre a atividade do agente e o prejuízo causado ao meio ambiente.

Nesse cenário, a dificuldade de identificação direta dos responsáveis, associada à natureza difusa e cumulativa dos danos ambientais, pode resultar na responsabilização subsidiária do Estado, especialmente em hipóteses de omissão no dever de fiscalização. Tal situação evidencia um deslocamento do ônus da reparação, no qual os custos ambientais e sociais decorrentes da atividade ilegal acabam sendo suportados pela coletividade.

Assim, estabelece-se uma cadeia lógica em que a estrutura logística do garimpo ilegal viabiliza a degradação ambiental, esta produz alterações detectáveis nos sistemas hídricos, as quais podem ser monitoradas por meio de ferramentas tecnológicas, e cuja adequada interpretação é fundamental para a consolidação da associação e a efetivação da responsabilização civil. Na ausência dessa capacidade de monitoramento e comprovação, há o risco de perpetuação da atividade ilícita e de socialização dos prejuízos, comprometendo não apenas os ecossistemas aquáticos, mas também a saúde das populações locais e a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Dessa forma, o enfrentamento ao garimpo ilegal deve ser compreendido não apenas como uma ação repressiva pontual, mas como uma estratégia integrada de governança ambiental e hídrica, que articula instrumentos tecnológicos, jurídicos e institucionais para a prevenção de danos, a responsabilização dos agentes e a proteção do interesse coletivo.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, tendo em vista que busca analisar, por meio de dados numéricos derivados de sensoriamento remoto, a relação entre a dinâmica da atividade garimpeira ilegal e a resposta espectral da água. Quanto aos objetivos, o estudo apresenta caráter exploratório e explicativo, uma vez que visa identificar padrões empíricos e compreender relações entre variáveis ambientais e antrópicas. No que se refere aos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa documental e observacional, fundamentada na análise de dados secundários provenientes de sistemas institucionais de monitoramento ambiental.

Base de Dados e Fontes de Informação

Os dados utilizados nesta pesquisa são provenientes de diferentes fontes institucionais, integrando informações ambientais e de garimpo ilegal. Os dados relativos à atividade garimpeira foram extraídos de sistemas operados pelo Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam), incluindo alertas derivados de sensores orbitais, como aqueles utilizados pelos sistemas DETER (do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE) e imagens de alta resolução da constelação PlanetScope. Esses alertas representam registros pontuais de detecção de alterações na superfície terrestre associadas à atividade mineral ilegal.

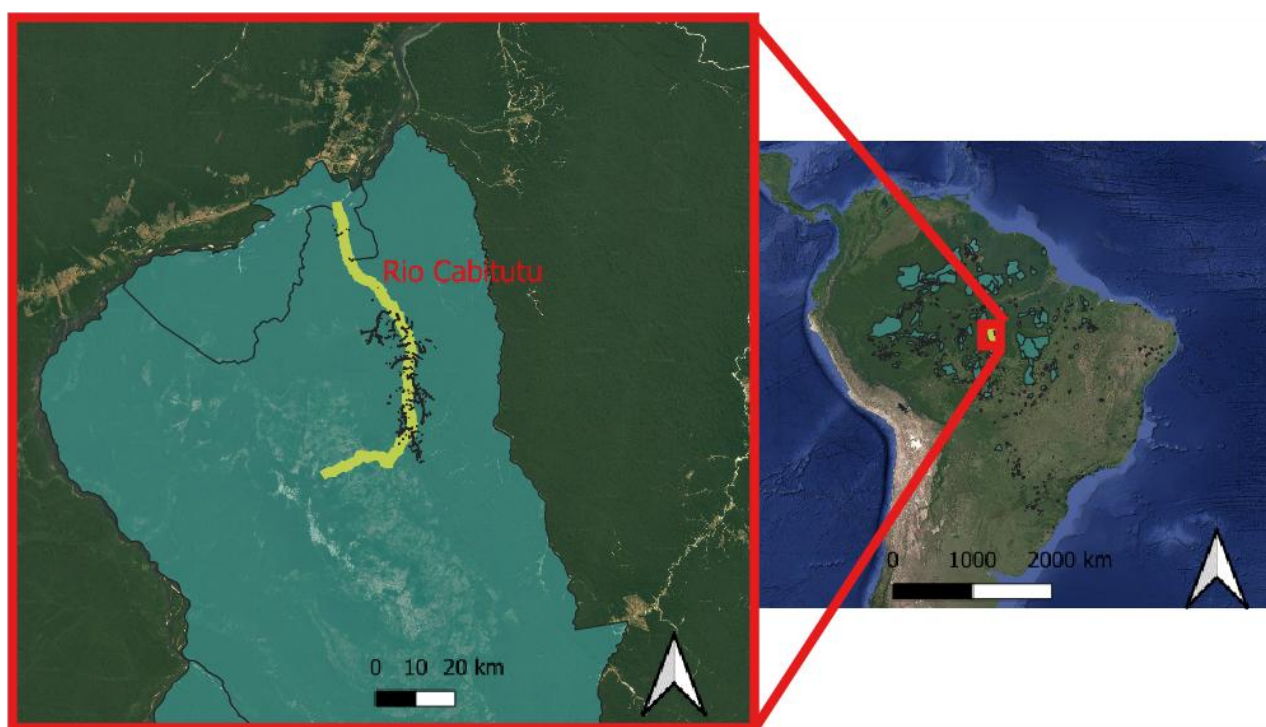
Adicionalmente, foi empregado o Índice de Frente de Garimpo (IFG), construído a partir da agregação dos alertas, incorporando simultaneamente dimensões espaciais e temporais da atividade. Esse indicador permite representar não apenas a ocorrência pontual do garimpo, mas também sua persistência e intensidade ao longo do tempo. Os dados espectrais da água foram obtidos por meio de imagens de satélite multiespectrais, previamente submetidas a procedimentos de pré-processamento, incluindo correção atmosférica, recorte da área de interesse e exclusão de pixels contaminados por nuvens e sombras. A partir dessas imagens, foram extraídas bandas espectrais utilizadas no cálculo de índices relacionados à turbidez e à presença de sedimentos em suspensão, com destaque para o Índice de Turbidez por Diferença Normalizada (NDTI) e o Índice de Sedimentos em Suspensão por Diferença Normalizada (NDSSI).

No que tange ao tratamento dos dados, optou-se pela utilização das variáveis in natura para as análises estatísticas por meio de Modelos Lineares Generalizados (GLM), sem a aplicação prévia de padronização ou normalização escalar. Esta escolha metodológica baseou-se no fato de que o objetivo central da pesquisa consistiu em avaliar a relação estatística direta entre a ocorrência da atividade garimpeira, representada tanto por registros pontuais de alertas quanto pelo Índice de Frente de Garimpo (IFG), e os índices espectrais de turbidez (NDTI) e de sedimentos em suspensão (NDSSI), bem como seu índice combinado. Foram realizadas diversas combinações analíticas entre

essas fontes de dados (IFG/Alertas cruzados com NDTI, NDSSI e índice combinado), e a análise dos resultados indicou que a manutenção das escalas originais foi suficiente para captar a significância estatística das correlações buscadas, preservando a variabilidade e a interpretabilidade dos parâmetros ambientais e da intensidade da atividade garimpeira sem a introdução de vieses decorrentes de transformações matemáticas de escala. Área de Estudo

O estudo foi conduzido no rio Cabitutu, localizado na Terra Indígena Munduruku (TIMU), no estado do Pará, nas coordenadas geográficas -6.578069766342357, -57.651954718631416. A escolha da área fundamenta-se em sua elevada incidência de atividade garimpeira e na relativa ausência de afluentes significativos no trecho analisado, o que reduz interferências hidrológicas externas e favorece a análise da relação entre a atividade a montante e as alterações observadas a jusante, conforme (Figura 6):

Figura 6 - Rio Cabitutu.



Fonte: Autoral, 2026.

Legenda: Localização do rio Cabitutu na Terra Indígena Munduruku (TIMU) e distribuição dos alertas de garimpo. À esquerda, apresenta-se o detalhamento da área de estudo, com a identificação do curso do rio Cabitutu e dos alertas de garimpo (em preto) ao longo do trecho a montante. À direita, observa-se a localização da área no contexto da Amazônia Legal. Verifica-se que o trecho analisado possui baixa influência de afluentes significativos, o que permite associar as alterações de turbidez observadas a jusante à atividade garimpeira identificada a montante. **Fonte:** Autoral, elaborado no QGIS (2026).

A escolha do rio Cabitutu como objeto de estudo para esta dissertação fundamenta-se na sua relevância para a compreensão da dinâmica hidrossedimentar da bacia do Tapajós, sendo um dos pontos críticos identificados pelo monitoramento do MapBiomass. Conforme documentado na Nota Técnica sobre os sedimentos em suspensão na bacia do Tapajós, este rio caracteriza-se por apresentar uma dinâmica específica de transporte de sedimentos, permitindo analisar os impactos da atividade garimpeira. As análises dos índices espectrais foram realizadas no Rio Cabitutu a jusante dos focos de garimpo ilegal (pontos pretos na Figura 6), buscando-se identificar se a alteração da atividade minerária a montante iria influenciar a turbidez da água.

Processamento e Integração dos Dados

Os dados espectrais foram organizados em séries temporais, correspondentes às datas disponíveis de aquisição das imagens. Os dados de atividade garimpeira (alertas e IFG) foram integrados aos dados espectrais com base em critérios temporais diretos, associando-se, para cada data de observação espectral, os registros de atividade garimpeira correspondentes ao mesmo período.

Essa integração resultou em uma base de dados unificada, na qual cada observação contém: (i) os índices espectrais calculados, (ii) os indicadores de atividade garimpeira e (iii) variáveis temporais associadas ao período de observação, divididas em seca e cheia.

Construção do Índice Composto

Considerando-se que os índices NDTI e NDSSI apresentam escalas e distribuições distintas, foi realizada a padronização das variáveis por meio do cálculo do *z-score*, conforme procedimento amplamente adotado em análises estatísticas multivariadas. Esse processo resultou em séries com média zero e variância unitária, permitindo sua comparabilidade.

Após a padronização, foi avaliada a coerência interpretativa dos sinais, de modo que valores mais elevados estivessem associados a maior grau de alteração ambiental. Quando necessário, os sinais foram invertidos para garantir consistência semântica entre os indicadores.

O índice composto foi então construído a partir da média aritmética simples dos valores padronizados, com o objetivo de integrar informações espectrais distintas, reduzir a influência de ruídos específicos de cada índice e aumentar a robustez da análise.

Modelagem Estatística

Para analisar a relação entre a atividade garimpeira e a resposta espectral da água, foram utilizados Modelos Lineares Generalizados (GLM), assumindo distribuição gaussiana e função de ligação identidade, o que os torna equivalentes a modelos de regressão linear.

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_t + \beta_2 \text{Tempo}_t + \beta_3 \text{Tempo}_t^2 + \varepsilon_t$$

em que:

- Y_t representa a variável resposta (NDTI, NDSSI ou índice composto);
- X_t corresponde ao indicador de atividade garimpeira (alertas ou IFG);
- Tempo_t representa a variável temporal;
- Tempo_t^2 foi incluído para capturar possíveis relações não lineares;
- ε_t é o termo de erro aleatório.

A escolha do GLM gaussiano com ligação identidade justifica-se pelo fato de as variáveis dependentes serem contínuas e apresentarem comportamento compatível com modelagem linear após inspeção exploratória. Além disso, essa abordagem permite interpretação direta dos coeficientes, facilita a comparação entre modelos e é adequada ao tamanho amostral disponível.

A inclusão dos termos temporais tem como finalidade controlar tendências sazonais e estruturais nos dados, reduzindo o risco de associações espúrias decorrentes de padrões temporais não modelados.

Avaliação e Seleção dos Modelos

Os modelos ajustados foram avaliados com base nos seguintes critérios:

- coeficientes de regressão (β);
- erro-padrão das estimativas;
- significância estatística (valores de p);
- estatística F do modelo;
- coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado).

A seleção do modelo mais adequado considerou simultaneamente a significância estatística dos coeficientes e a capacidade explicativa global.

Adicionalmente, foram analisados os resíduos dos modelos, com o objetivo de verificar a adequação dos pressupostos de normalidade, homoscedasticidade e independência.

Análise das Relações e Interpretação dos Resultados

A partir dos modelos selecionados, foram realizadas análises gráficas e estatísticas complementares, incluindo gráficos de dispersão e ajustes de regressão, utilizando o software estatístico R. Também foram consideradas possíveis variações sazonais, com o intuito de avaliar a influência da dinâmica hidrológica sobre as relações observadas.

Os resultados foram interpretados à luz dos fundamentos da óptica hidrológica, especialmente no que se refere aos processos de absorção e espalhamento da radiação

eletromagnética em função da presença de sedimentos em suspensão.

Limitações Metodológicas e Implicações Jurídicas

Este estudo apresenta limitações inerentes à abordagem metodológica adotada, as quais devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Em primeiro lugar, destaca-se a ausência de validação empírica direta por meio de dados coletados *in situ*. A análise baseou-se exclusivamente em dados de sensoriamento remoto e indicadores derivados, o que implica que os resultados obtidos representam inferências indiretas acerca da dinâmica da turbidez hídrica, não sendo possível aferir com precisão absoluta os valores reais desse parâmetro no ambiente analisado.

Por fim, ressalta-se que o estudo foi aplicado a uma área específica e em um recorte temporal delimitado, o que limita a generalização dos resultados para outras regiões ou contextos ambientais sem a devida adaptação metodológica. Nesse sentido, recomenda-se que futuras pesquisas incorporem dados de monitoramento *in situ*, ampliem o conjunto de variáveis explicativas e testem a replicabilidade do modelo em diferentes bacias hidrográficas, a fim de aprimorar sua robustez e aplicabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise comparativa de modelos (Objetivo Específico I)

Na análise dos índices mais adequados a serem utilizados para a pesquisa chegou-se à seguinte tabela:

Tabela 1 - Desempenho Estatístico dos Modelos de Regressão entre Atividade Garimpeira e Índices de Turbidez

Resposta	Preditor Principal	β (Estimativa)	Erro-padrão	p-valor (Preditor)	p-valor (Modelo)	F-valor	R ² ajustado	Variáveis significativas (p < 0,05)
Índice Composto	Alertas	0,00758	0,00442	0,09	<0.001	6,25	0,26	tempo, tempo ²
NDSSI	Alertas	0,00045	0,00104	0,66	<0.001	8,25	0,33	tempo, tempo ²
NDTI	Alertas	0,00062	0,00036	0,09	<0.001	9,99	0,38	tempo ²
Índice Composto	IFG	0,00234	0,00121	0,06	<0.001	6,44	0,27	tempo, tempo ²
NDSSI	IFG	0,00111	0,00190	0,56	<0.001	4,54	0,19	tempo, tempo ²
NDTI	IFG	0,00023	0,00010	0,02	<0.001	10,71	0,40	IFG

Legenda: A tabela apresenta os resultados dos modelos de regressão linear utilizados para avaliar a relação entre os indicadores de atividade de garimpo (Alertas e IFG) e as respostas espectrais de turbidez (NDTI, NDSSI e Índice Composto), sendo:

β (Estimativa): Representa o coeficiente de inclinação da reta, indicando a magnitude e a direção do impacto do preditor principal sobre a variável resposta.

Erro-padrão: Mede a precisão da estimativa do coeficiente; valores menores indicam estimativas mais confiáveis.

p-valor (Preditor): Indica a significância estatística do indicador de garimpo. O modelo NDTI + IFG é o único com significância estatística isolada (p = 0,02) para o preditor.

p-valor (Modelo): Avalia a significância global do modelo. Todos os modelos apresentaram significância elevada (p < 0,001), refletindo a influência conjunta das variáveis.

F-valor: Estatística de teste que mede a robustez global do modelo; o valor de 10,71 destaca o modelo NDTI + IFG como o mais robusto do conjunto.

R² ajustado: Coeficiente de determinação que indica o poder explicativo do modelo. O destaque é a combinação NDTI + IFG, que explica 40% (0,40) da variabilidade da turbidez.

Variáveis Significativas: Identifica quais componentes do modelo possuem p-valor inferior a 0,05. Observa-se que, no modelo de melhor desempenho, o IFG atua como o principal fator determinante para a variação da resposta espectral.

Fonte: Autoral (2026).

A tabela revela que o IFG (Índice de Frente de Garimpo) é o preditor mais robusto entre os testados, apresentando uma possível relação de causa e efeito estatisticamente validada quando cruzado com o NDTI (*Normalized Difference Turbidity Index*). Enquanto outros cruzamentos apresentam p-valores elevados (acima de 0,05), o que indica que os resultados podem ser fruto do acaso ou apenas da variação temporal, a interação entre IFG e NDTI atingiu um p-valor de 0,02. O que pode indicar que as variações na turbidez da água não são aleatórias, mas sim influenciadas diretamente pela dinâmica de fluxo representada pelo IFG.

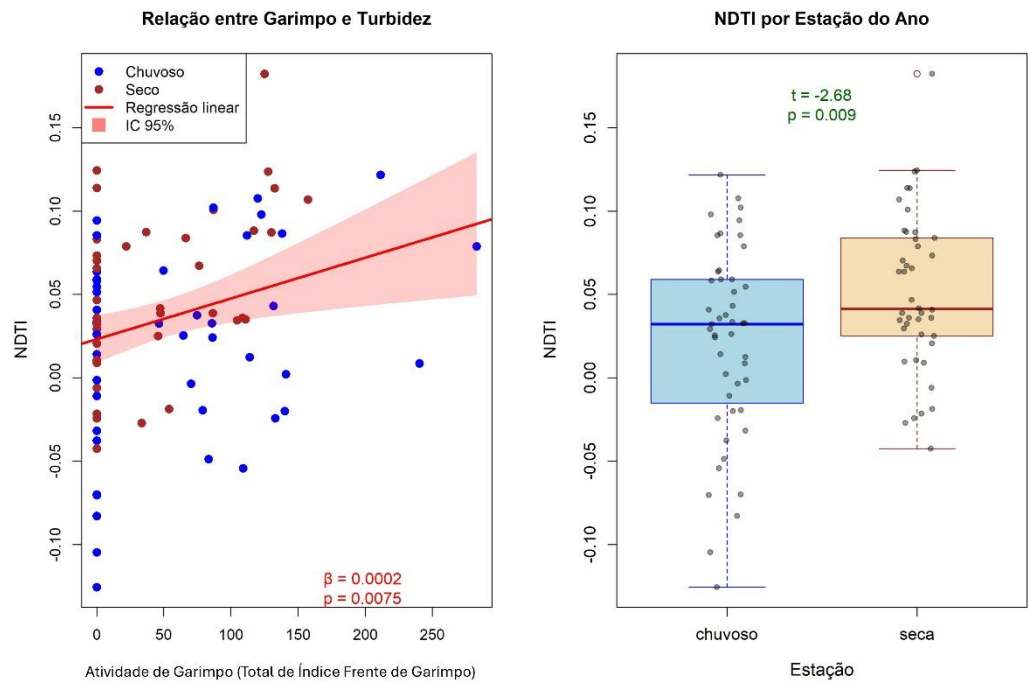
Além da significância estatística, o modelo que combina IFG e NDTI apresenta o maior R^2 ajustado da tabela, chegando a 0,40. Isso significa que essa combinação consegue explicar 40% da variabilidade dos dados observados, o maior poder explicativo entre todas as linhas apresentadas. Em termos práticos de gestão de recursos hídricos, isso demonstra que o NDTI é o sensor remoto mais sensível às alterações de fluxo, permitindo um monitoramento mais preciso e confiável do que os índices compostos ou o NDSSI, que apresentaram ajustes bem inferiores (0,27 e 0,19, respectivamente).

Outro ponto crucial é a exclusividade da variável significativa na última coluna. Para quase todos os outros índices, o "tempo" e o "tempo²" são os únicos fatores que explicam os resultados, sugerindo que o modelo é refém da sazonalidade cronológica. No entanto, para o NDTI sob influência do IFG, o tempo deixa de ser o protagonista e o próprio IFG aparece como a única variável significativa. Isso deixa o fenômeno físico da passagem do tempo em segundo plano. Portanto, a escolha dessa combinação é a mais acertada, pois ela oferece a menor margem de erro ($p = 0,02$) e o maior fôlego explicativo ($R^2 = 0,40$). Utilizar o NDTI.

Análise da relação entre variáveis (Objetivo específico II)

Com base no cruzamento dos dados advindos do NDTI (*Normalized Difference Turbidity Index*), em anos diferentes, com base na sazonalidade dividindo-se os meses das coletas entre meses de chuva e de seca, bem como no Índice de Frente de Garimpo (IFG), chegou-se aos seguintes gráficos:

Gráficos 1 e 2 – Relação entre Garimpo e Turbidez e NDTI por Estação do Ano



Legenda: O conjunto de gráficos apresenta a análise estatística da influência do garimpo na qualidade da água do Rio Cabitutu entre 2020 e 2025.

Gráfico de Dispersão (Esquerda) – Relação entre Garimpo e Turbidez:

Eixo X: Representa a intensidade da atividade garimpeira consolidada pelo Total de Índice de Frente de Garimpo (IFG), que integra a expansão espacial e a persistência temporal dos alertas.

Eixo Y: Indica o NDTI (Índice de Turbidez por Diferença Normalizada) como variável resposta da qualidade da água.

Simbologia: Os pontos diferenciam os registros nas estações chuvosa (azul) e seca (marrom).

Análise de Tendência: A linha de regressão (vermelha) com Intervalo de Confiança de 95% (sombreado) demonstra uma correlação positiva significativa ($\beta = 0,0002$; $p = 0,0075$), confirmando que o avanço da frente de garimpo eleva a turbidez à jusante.

Boxplot (Direita) – NDTI por Estação do Ano:

Distribuição Sazonal: Compara a variabilidade da turbidez entre os regimes hidrológicos, apresentando a mediana, quartis e a densidade dos dados individuais (jitter points).

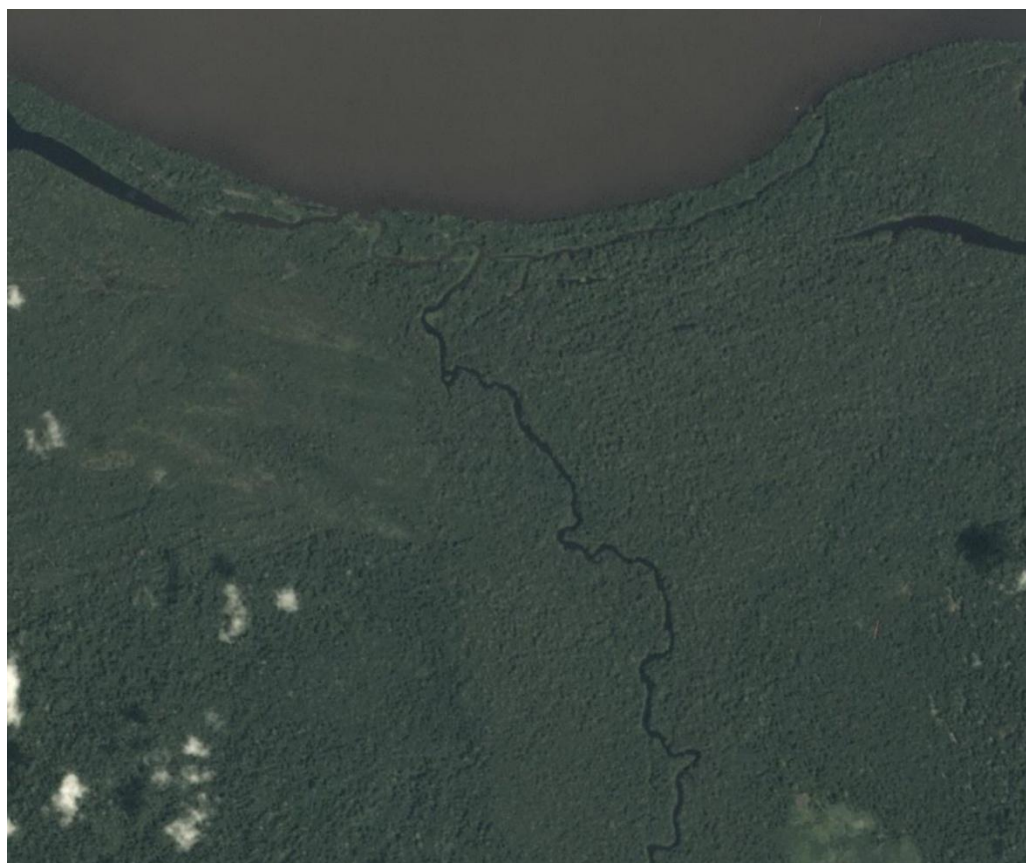
Significância: O resultado do teste t ($t = -2,68$; $p = 0,009$) comprova que as variações de turbidez são estatisticamente distintas entre as estações.

Interpretação: Embora o regime de chuvas influencie a carga de sedimentos, a atividade garimpeira permanece como um fator de impacto significativo, com níveis de turbidez acentuados no período seco devido à menor capacidade de diluição do corpo hídrico.

Fonte: Autoral, processado em R (2026).

Preliminarmente, deve-se mencionar que a alteração da vazão do rio está diretamente relacionada com a coloração da água, tendo em vista que há mais quantidade de água para carregar os sedimentos, conforme se observa abaixo:

Figura 7 – Rio Cabitutu em Janeiro de 2019 Demonstrando uma Coloração Mais Clara, indicando uma Menor Presença de Sedimentos em Suspensão Devido ao Período de Cheia do Rio, Momento do qual a Vazão é Maior.



Fonte: Autoral, *PlanetScope* (2026).

Figura 8 – Rio Cabitutu em Agosto de 2019 Demonstrando uma Coloração Mais Avermelhada, indicando uma Maior Presença de Sedimentos em Suspensão Devido ao Período de Seca do Rio, Momento do qual a Vazão é Menor.



Fonte: Autoral, *PlanetScope* (2026).

A análise comparativa das Figuras 7 e 8 revela o impacto direto do regime hidrológico sazonal sobre a dinâmica da turbidez nos corpos d'água monitorados. Observa-se que, nos períodos de cheia, o incremento substancial na vazão dos rios atua como o principal vetor de alteração das propriedades ópticas da água, promovendo o revolvimento de sedimentos de fundo e a intensificação do carreamento de material particulado em suspensão oriundo do escoamento superficial terrestre. Esse comportamento hidrodinâmico justifica os picos nos índices espectrais (NDTI e NDSSI) registrados na Figura 7, nos quais a alta energia do fluxo hídrico maximiza a presença de sedimentos, mascarando ou potencializando as plumas de poluição antrópica. Em contrapartida, conforme ilustrado na Figura 8, o período de estiagem e a consequente redução da vazão favorecem a decantação natural dos sólidos suspensos devido à perda de competência do canal fluvial. Sob esse regime de águas baixas, a turbidez natural declina significativamente, permitindo que as anomalias espectrais remanescentes sejam mais fidedignamente associadas a fontes pontuais de perturbação constante, como a atividade de mineração e garimpo na bacia.

Partindo para a análise dos dados obtidos por meio da regressão linear entre o Índice de Frente de Garimpo (IFG) e a turbidez mensurada pelo NDTI revela uma correlação positiva e direta entre a atividade antrópica e a degradação da qualidade da água no Rio Cabitutu. O coeficiente de

inclinação ($\beta = 0,0002$) demonstra que o incremento na contagem de atividades de garimpo resulta em um aumento proporcional na concentração de sedimentos em suspensão. Embora o coeficiente apresente um valor absoluto pequeno, a trajetória ascendente da linha de tendência confirma que o impacto ambiental é cumulativo, indicando que a pressão constante da atividade mineradora altera de forma sistemática as propriedades ópticas da coluna d'água.

A robustez estatística desse modelo é confirmada pelo p-valor de 0,0075, situado significativamente abaixo do limite crítico de 0,05. Este resultado permite rejeitar a hipótese nula e afirmar que a variação da turbidez no Rio Cabitutu não decorre de eventos aleatórios, mas está intrinsecamente vinculada à expansão das frentes de garimpo registradas entre 2020 e 2025. A validação do IFG como preditor principal demonstra a eficácia da metodologia de cruzamento entre imagens de alta resolução da constelação *PlanetScope* e os alertas de desmatamento.

Ao segmentar a análise pela sazonalidade, o gráfico de dispersão indica que a estação seca (pontos em vermelho) apresenta uma densidade de valores de NDTI mais elevados em comparação ao período chuvoso. Essa percepção é corroborada pelo teste de comparação de médias apresentado no gráfico de *Boxplot*, onde a mediana da turbidez na seca é visualmente e estatisticamente superior. O p-valor de 0,009 e o valor de $t = -2.68$ confirmam que existe uma diferença significativa entre os regimes hidrológicos, validando a premissa de que a redução do volume de água durante a estiagem potencializa a concentração de partículas sólidas no leito do rio.

A interpretação conjunta dos dados sugere que o período de cheia exerce um efeito de diluição nos sedimentos, o que pode mascarar momentaneamente a magnitude do impacto ambiental. Em contrapartida, nos meses de agosto e setembro, a vazão reduzida do Rio Cabitutu aliada à continuidade da exploração mineral faz com que os picos de turbidez sejam mais acentuados. A metodologia de distribuir a coleta de dados de forma equânime entre os dois regimes climáticos foi fundamental para mitigar o viés sazonal, garantindo que a correlação identificada reflita o impacto real do garimpo e não apenas o ciclo hidrológico natural.

Em última análise, os resultados estatísticos obtidos via RStudio fundamentam a viabilidade do monitoramento remoto como ferramenta de fiscalização e gestão de recursos hídricos. A combinação entre o NDTI e o IFG mostrou-se o modelo de maior rigor científico, capaz de identificar a "assinatura" do garimpo na água com alta precisão. Conclui-se, portanto, que a alteração do estado trófico e da transparência do Rio Cabitutu no recorte temporal analisado é uma consequência da dinâmica de avanço das frentes de exploração mineral na bacia hidrográfica, superando as variações naturais de turbidez do ecossistema.

Interpretação físico-ambiental dos resultados (Objetivo específico III) - Discussões

Os resultados obtidos evidenciaram a existência de associação estatisticamente significativa entre a intensificação da atividade garimpeira a montante e a resposta espectral da água observada a jusante, expressa especialmente pelos índices derivados do sensoriamento remoto. Essa relação pode ser compreendida à luz dos fundamentos da óptica hidrológica e encontra respaldo na literatura recente sobre monitoramento remoto da qualidade da água, particularmente em estudos que utilizam índices espectrais para avaliar turbidez, sedimentos suspensos e alterações ambientais em corpos hídricos.

Do ponto de vista físico, a resposta espectral da água é determinada pela interação da radiação eletromagnética com os componentes opticamente ativos presentes na coluna d'água. De acordo com Cortivo (2009) e Barbosa et al. (2019), o comportamento da luz no meio aquático é governado por propriedades ópticas inerentes, como absorção e espalhamento, as quais dependem da composição e da concentração de substâncias dissolvidas e particuladas. Assim, a presença de sedimentos em suspensão altera a trajetória e a intensidade da radiação, modificando a reflectância registrada por sensores orbitais.

No caso de ambientes impactados por atividade garimpeira, a mobilização do leito, o revolvimento de margens e o lançamento de rejeitos tendem a aumentar a concentração de sólidos suspensos totais, elevando a turbidez da água. Essa dinâmica é compatível com o comportamento espectral descrito por Facco (2023), Tirello (2024) e Olivetti et al. (2024), segundo os quais o aumento da carga de sedimentos provoca maior espalhamento da radiação e elevação da reflectância, sobretudo nas faixas do vermelho e, em determinadas condições, do infravermelho próximo.

Essa interpretação também dialoga com a literatura internacional. Rawat e Singh (2024), ao analisarem um lago de altitude na Índia com imagens Sentinel-2, demonstraram a aplicabilidade de índices como NDVI, NDWI e NDTI para o monitoramento de vegetação aquática, extensão da superfície hídrica e turbidez associada a partículas suspensas. Embora o ambiente analisado por esses autores seja lacustre e distinto do contexto amazônico, o estudo reforça a utilidade dos índices espectrais como ferramentas de baixo custo e ampla cobertura espacial para avaliar alterações em corpos hídricos, especialmente em áreas onde o monitoramento in situ é limitado, oneroso ou descontínuo.

De modo semelhante, Das et al. (2022), ao avaliarem a qualidade da água do rio Ganges durante períodos associados à pandemia de COVID-19, utilizaram imagens Sentinel-2 e Landsat-8 para analisar alterações em parâmetros de qualidade da água, incluindo o NDTI. O estudo demonstrou que a variação desse índice pode refletir mudanças nas condições de turbidez em

sistemas fluviais, especialmente quando associada à redução ou intensificação de pressões antrópicas. Essa contribuição é relevante para a presente pesquisa, pois evidencia a aplicabilidade do NDTI em análises temporais de rios, aproximando-se metodologicamente da proposta adotada no rio Cabitutu.

No contexto amazônico, Dutra, Tavares e Ribeiro (2019) ressaltam que o uso combinado de imagens Sentinel-2 MSI e Landsat-8 OLI pode ampliar a disponibilidade temporal de dados úteis para o monitoramento de ambientes aquáticos, mesmo diante da elevada cobertura de nuvens característica da região. Os autores destacam que esses sensores podem subsidiar estudos sobre clorofila-a, matéria orgânica colorida dissolvida, sólidos suspensos totais e turbidez, desde que acompanhados de validação *in situ*. Essa observação é especialmente importante para a presente pesquisa, pois confirma tanto o potencial quanto as limitações do sensoriamento remoto óptico em ambientes amazônicos.

Nesse sentido, os resultados encontrados nesta dissertação se inserem em uma tendência metodológica já observada na literatura: o uso de dados orbitais como instrumentos complementares de monitoramento da qualidade da água. A contribuição específica deste estudo está em integrar índices espectrais de turbidez, especialmente NDTI, NDSSI e índice composto, com indicadores de atividade garimpeira, como alertas e Índice de Frente de Garimpo. Essa integração permite não apenas observar a alteração espectral da água, mas também relacioná-la à dinâmica espaço-temporal de uma pressão antrópica específica.

A cadeia físico-ambiental que fundamenta essa interpretação pode ser descrita da seguinte forma: a intensificação da atividade garimpeira promove maior mobilização de sedimentos; o aumento de sedimentos em suspensão altera as propriedades ópticas da água; essa alteração modifica a reflectância registrada pelos sensores orbitais; e tais modificações são captadas por índices espectrais relacionados à turbidez. Portanto, a associação estatística identificada entre IFG e NDTI apresenta coerência física com os processos descritos na literatura.

Apesar disso, é necessário reconhecer que a resposta espectral da água não depende exclusivamente da atividade garimpeira. Fatores como sazonalidade hidrológica, precipitação, vazão, erosão natural das margens, entrada de sedimentos por tributários, composição granulométrica das partículas e variações na profundidade também podem influenciar os valores dos índices. Olivetti et al. (2024), por exemplo, destacam que a relação entre sedimentos em suspensão e reflectância pode apresentar efeitos de histerese, indicando que uma mesma concentração de sedimentos pode gerar respostas espectrais distintas em diferentes momentos hidrológicos.

Essa ressalva é relevante para a interpretação dos resultados da presente pesquisa. Embora o

modelo com NDTI e IFG tenha apresentado capacidade explicativa relevante, o percentual de variabilidade não explicado indica que outros fatores ambientais também influenciam a turbidez estimada. Assim, os resultados não devem ser interpretados como prova isolada de causalidade direta, mas como evidência estatística e físico-ambiental de associação entre a dinâmica garimpeira e alterações espectrais compatíveis com aumento de turbidez.

A literatura também reforça essa cautela. Dutra, Tavares e Ribeiro (2019) destacam a necessidade de validação *in situ* para fortalecer programas de monitoramento baseados em sensoriamento remoto. De modo semelhante, estudos como os de Rawat e Singh (2024) e Das et al. (2022) demonstram a utilidade dos índices espectrais, mas não afastam a importância da contextualização ambiental, da calibração local e da interpretação integrada com outras fontes de informação.

Sob a perspectiva jurídica e institucional, essa limitação não reduz a relevância da metodologia, mas delimita corretamente seu alcance. No campo da responsabilização ambiental, a análise espectral não substitui a perícia de campo, a coleta de amostras, a identificação direta dos responsáveis ou a análise físico-química da água e dos sedimentos. Conforme apontado no Laudo nº 091/2018-UTEC/PF/SNM/PA, o sensoriamento remoto é eficaz para identificar plumas de sedimentos, alterações na paisagem e áreas impactadas, mas não permite, isoladamente, atribuir autoria específica ou estabelecer associação definitiva sem complementação pericial.

Dessa forma, a contribuição dos índices espectrais deve ser compreendida como parte de um conjunto probatório e técnico mais amplo. Em regiões de difícil acesso, como a Amazônia, esses indicadores podem auxiliar na identificação de áreas prioritárias para fiscalização, na seleção de pontos para coleta de campo, na produção de evidências preliminares de alteração ambiental e no fortalecimento de sistemas de informação sobre recursos hídricos.

No âmbito da gestão de recursos hídricos, os resultados também dialogam com os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, especialmente com o sistema de informações, o monitoramento da qualidade da água e a identificação de pressões antrópicas sobre corpos hídricos. A utilização integrada de sensoriamento remoto, índices espectrais e indicadores de geointeligência pode subsidiar a atuação de instituições como Censipam, ANA, órgãos ambientais e forças de fiscalização, ampliando a capacidade de acompanhamento de áreas remotas e ambientalmente sensíveis.

Portanto, os resultados desta pesquisa corroboram a literatura ao demonstrar que índices espectrais podem funcionar como ferramentas indiretas, complementares e de baixo custo para o monitoramento da turbidez e da qualidade da água. Ao mesmo tempo, o estudo avança ao aplicar essa abordagem a um contexto de garimpo ilegal em Terra Indígena amazônica, integrando variáveis

ambientais e indicadores de atividade antrópica. Essa articulação reforça o potencial da geointeligência como instrumento de apoio à gestão, à fiscalização ambiental e à análise técnica de impactos sobre os recursos hídricos.

Em síntese, a associação observada entre a atividade garimpeira e a resposta espectral da água no rio Cabitutu apresenta consistência estatística, plausibilidade físico-ambiental e aderência à literatura nacional e internacional. Contudo, seus resultados devem ser interpretados como evidências complementares, dependentes de validação e integração com outras metodologias, e não como substitutos de medições diretas ou de perícias ambientais completas. Essa leitura equilibrada fortalece a robustez científica da pesquisa e amplia sua utilidade para a gestão e regulação dos recursos hídricos em áreas de difícil monitoramento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação demonstrou que existe uma relação positiva, estatisticamente significativa e fisicamente coerente entre a dinâmica da atividade garimpeira e a resposta espectral da água no rio Cabitutu, localizado na Terra Indígena Munduruku (PA). Os resultados confirmam a hipótese inicial de que índices derivados do sensoriamento remoto podem atuar como indicadores auxiliares de impactos ambientais, especialmente em regiões de difícil acesso como a Amazônia Legal.

Quanto ao objetivo específico I, a comparação entre diferentes combinações de indicadores revelou que o modelo composto pelo Índice de Frente de Garimpo (IFG) e pelo Índice de Turbidez por Diferença Normalizada (NDTI) apresentou desempenho estatisticamente superior às demais combinações testadas. Esse modelo alcançou o maior coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado = 0,40) e o único p-valor do preditor abaixo de 0,05 ($p = 0,02$), indicando que 40% da variabilidade da turbidez é explicada diretamente pela dinâmica espaço-temporal do avanço do garimpo.

Em relação ao objetivo específico II, a análise da relação entre as variáveis confirmou uma correlação positiva e significativa entre a intensificação da atividade garimpeira e o aumento da turbidez ($\beta = 0,00023$; $p = 0,0075$). A análise sazonal revelou que, embora o regime hidrológico influencie a concentração de sedimentos ($p = 0,009$), com maior intensidade na estação seca, a atividade garimpeira mantém-se como fator de impacto detectável independentemente do período do ano, afastando a hipótese de que a turbidez decorreria exclusivamente de processos naturais.

Quanto ao objetivo específico III, a interpretação físico-ambiental confirmou que os resultados são coerentes com os fundamentos da óptica hidrológica: o aumento da concentração de sedimentos em suspensão, causado pelo garimpo, eleva o coeficiente de espalhamento da luz e, conseqüentemente, a reflectância da água nas bandas do vermelho, captada pelo NDTI. Essa cadeia física confere plausibilidade mecânica à associação estatística identificada e demonstra que os índices espectrais podem subsidiar, de forma indireta, a análise da associação em casos de responsabilização ambiental objetiva, atuando como evidência técnica complementar.

Conclui-se, portanto, que o garimpo ilegal no rio Cabitutu pode ter aumentado a turbidez da água de forma mensurável por sensoriamento remoto, e que a combinação IFG + NDTI constitui a ferramenta mais robusta entre as testadas para monitoramento ambiental na região. Os produtos gerados pela pesquisa, especialmente a referida combinação de indicadores e a proposta de Acordo de Cooperação Técnica entre Censipam e ANA, oferecem subsídios concretos para o aprimoramento da gestão de recursos hídricos, da fiscalização e da responsabilização ambiental na Amazônia.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram o potencial do sensoriamento remoto orbital como ferramenta de comando e controle ambiental na Amazônia, mas também sinalizam caminhos promissores para o aprimoramento do monitoramento hídrico. Como desdobramento deste estudo, identificam-se duas frentes prioritárias para investigações futuras: a automação dos processos analíticos e a validação empírica dos dados espectrais.

Em primeiro lugar, aponta-se a necessidade de desenvolver e implementar rotinas de automação para a análise espectral da água. A integração dos índices de turbidez (NDTI) e de sedimentos em suspensão (NDSSI) a algoritmos de machine learning (aprendizado de máquina) e plataformas de processamento em nuvem, como o Google Earth Engine, viabilizaria a criação de sistemas de alerta em tempo quase real. Essa automação permitiria que órgãos de fiscalização processassem volumes massivos de imagens da constelação PlanetScope de forma contínua, gerando relatórios automáticos de plumas de poluição por garimpo logo após a sua detecção, otimizando o poder de resposta do Estado.

Em segundo lugar, ressalta-se a importância da realização de campanhas amostrais em campo na Terra Indígena Munduruku e, especificamente, no rio Cabitutu, para a validação bioóptica dos modelos gerados. Embora os índices espectrais utilizados possuam forte lastro metodológico, a coleta de dados *in situ*, como a medição direta da turbidez em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT), a quantificação de Sólidos Suspensos Totais (SST) e a coleta de assinaturas espectrais com radiômetros de campo, é fundamental. Esse cruzamento empírico permitirá calibrar com precisão matemática os coeficientes estatísticos do modelo linear generalizado (GLM) aqui proposto, refinando a correlação exata entre os valores de reflectância do satélite e a real concentração física de sedimentos na água.

Adicionalmente, verifica-se a necessidade de transpor os parâmetros teóricos de qualidade da água para o campo da governança ambiental e da regulação jurídica, mediante a positivação do controle de qualidade hídrica por meio de índices de sensoriamento remoto. Estudos futuros devem debruçar-se sobre a viabilidade de integrar métricas espectrais aos instrumentos normativos de enquadramento dos corpos d'água e de estabelecimento de padrões de lançamento de efluentes. Investigar os meios formais para conferir validade jurídica e administrativa a esses indicadores geoespaciais permitirá que a detecção remota da degradação da qualidade da água não seja apenas uma evidência circunstancial, mas sim um critério objetivo e positivado para a aplicação de sanções, formulação de políticas públicas de mitigação e consolidação de um compliance ambiental robusto na Amazônia.

PRODUTOS DO MESTRADO

A celebração de um Acordo de Cooperação Técnica (ACT) entre o Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) revela-se não apenas pertinente, mas estratégica diante dos desafios contemporâneos relacionados ao monitoramento e à gestão dos recursos hídricos na Amazônia. Ambas as instituições possuem competências complementares: enquanto o Censipam dispõe de avançada infraestrutura de sensoriamento remoto e monitoramento territorial, a ANA é responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, com foco na regulação, planejamento e gestão da água em âmbito nacional.

Nesse contexto, a integração entre essas capacidades institucionais permitiria a construção de um sistema mais robusto e eficiente de monitoramento ambiental, especialmente no que se refere à detecção e análise de impactos decorrentes de atividades antrópicas, como o garimpo ilegal. Os resultados desta pesquisa evidenciam que índices espectrais derivados de imagens de satélite, quando associados a indicadores da dinâmica garimpeira, possuem potencial significativo para identificar alterações na qualidade da água, como o aumento da turbidez. No entanto, para que esses dados sejam efetivamente incorporados à gestão pública, é fundamental que haja articulação entre os órgãos responsáveis pela produção e pela aplicação dessas informações.

Um ACT entre Censipam e ANA possibilitaria o compartilhamento sistemático de dados, metodologias e tecnologias, promovendo maior sinergia entre o monitoramento ambiental e a gestão dos recursos hídricos. Essa cooperação permitiria, por exemplo, que informações geradas a partir de sistemas como o LOGAR e o uso de índices espectrais fossem integradas aos sistemas de informação da ANA, contribuindo para o aprimoramento de diagnósticos sobre a qualidade da água e subsidiando a tomada de decisão em diferentes escalas.

Além disso, a formalização dessa parceria contribuiria para o fortalecimento de ações de fiscalização e controle ambiental, ao permitir a identificação mais precisa de áreas críticas e a priorização de esforços operacionais. A utilização de indicadores indiretos, como os analisados nesta dissertação, pode atuar como ferramenta complementar na identificação de possíveis nexos entre atividades ilegais e impactos ambientais, oferecendo suporte técnico a órgãos de controle e ao sistema de justiça.

Do ponto de vista institucional, o ACT também representa uma oportunidade de otimização de recursos públicos, evitando a duplicidade de esforços e promovendo o uso mais eficiente das capacidades já existentes. Em um cenário de crescente demanda por respostas rápidas e eficazes frente à degradação ambiental, a cooperação interinstitucional se mostra essencial para ampliar a capacidade de resposta do Estado.

Por fim, destaca-se que a consolidação de um acordo dessa natureza está alinhada com os princípios da gestão integrada e descentralizada dos recursos hídricos, conforme preconizado pela Política Nacional de Recursos Hídricos. Ao promover a articulação entre diferentes órgãos e níveis de governo, o ACT entre Censipam e ANA pode contribuir significativamente para o avanço de uma governança ambiental mais eficiente, baseada em evidências técnicas e no uso estratégico da informação.

MINUTA**ACORDO DE COOPERAÇÃO TÉCNICA****Acordo de Cooperação Técnica entre Censipam e Agência Nacional de Águas**

ACORDO DE COOPERAÇÃO TÉCNICA QUE ENTRE SI CELEBRAM A UNIÃO, por intermédio do CENTRO GESTOR E OPERACIONAL DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE AMAZÔNIA E AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS PARA OS FINS QUE ESPECIFICA.

A UNIÃO, por intermédio do CENTRO GESTOR E OPERACIONAL DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE AMAZÔNIA, com sede em Brasília, no endereço SPO - Área 5 - Quadra 3 - Bloco K - Setor Policial Sul, CEP 70.610-200, inscrito no CNPJ/MF nº 07.129.796/0001-26, neste ato representado pelo **XXXXXXXXXXXXXXXXXX**, nomeado por meio de Decreto, publicado no Diário Oficial da União em **xx** de **xxxxx** de 20**xx**, portador da matrícula funcional nº **xxxxxxx** (ou inscrito no CPF sob o nº **xxxx**); e

A AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, autarquia sob regime especial, com sede em Brasília-DF, no Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco B, CEP 70610-200, inscrita no CNPJ/MF sob o nº 03.946.015/0001-00, neste ato representada pelo **Ministro de Estado ou (Autoridade máxima) da Entidade xxxxxxxxxxxx**, nomeado por meio de Decreto, publicado no Diário Oficial da União em **xx** de **xxxxx** de 20**xx**, portador da matrícula funcional nº **xxxxxx** (ou inscrito no CPF sob o nº **xxxx**).

RESOLVEM celebrar o presente **ACORDO DE COOPERAÇÃO TÉCNICA** com a finalidade de estabelecer mecanismos de mútua cooperação para o monitoramento e a fiscalização de atividades de garimpo ilegal na Amazônia Legal, utilizando como indicador técnico a análise da turbidez hídrica e a detecção de sedimentos via sensoriamento remoto e redes de monitoramento in situ, visando a proteção dos corpos d'água e a manutenção da qualidade dos recursos hídricos, tendo em vista o que consta do Processo n. **xxxxxx** e em observância às disposições da Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021, do Decreto nº 11.531, de 16 de maio de 2023, da Portaria SEGES/MGI nº 3.506, de 8 de maio de 2025, à Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelecendo o controle de qualidade da água e a integração da gestão de bacias hidrográficas com a gestão ambiental, à Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, estabelecendo padrões rigorosos para o parâmetro de turbidez de acordo com a classe do corpo d'água, à Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, visando à preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida; e suas alterações, mediante as cláusulas e condições a seguir:

CLÁUSULA PRIMEIRA – DO OBJETO

O objeto do presente Acordo de Cooperação Técnica é a execução de ações integradas de monitoramento, detecção e alerta de atividades de garimpo ilegal na Amazônia Legal, por meio da correlação de dados de sensoriamento remoto (CENSIPAM) e indicadores de qualidade de água, com foco específico na análise da turbidez hídrica e transporte de sedimentos (ANA), a ser executado na região da Amazônia Legal, abrangendo as bacias hidrográficas sob jurisdição federal, conforme especificações estabelecidas no plano de trabalho.

CLÁUSULA SEGUNDA - DO PLANO DE TRABALHO

Para o alcance do objeto pactuado, os partícipes buscarão seguir o plano de trabalho que, independentemente de transcrição, é parte integrante do presente Acordo de Cooperação Técnica, bem como toda documentação técnica que dele resulte, cujos dados neles contidos acatam os partícipes.

CLÁUSULA TERCEIRA - DAS OBRIGAÇÕES COMUNS

Constituem obrigações comuns de ambos os partícipes:

- a) elaborar o Plano de Trabalho relativo aos objetivos deste Acordo;
- b) executar as ações objeto deste Acordo, assim como monitorar os resultados;
- c) responsabilizar-se por quaisquer danos porventura causados, dolosa ou culposamente, por seus colaboradores, servidores ou prepostos, ao patrimônio do outro partícipe ou terceiros, quando da execução deste Acordo;
- d) analisar resultados parciais, reformulando metas quando necessário ao atingimento do resultado final;
- e) cumprir as atribuições próprias conforme definido no instrumento;
- f) realizar vistorias em conjunto, quando necessário;
- g) disponibilizar recursos humanos, tecnológicos e materiais para executar as ações, mediante custeio próprio;
- h) permitir o livre acesso a agentes da administração pública (controle interno e externo), a todos os documentos relacionados ao acordo, assim como aos elementos de sua execução;
- i) fornecer ao parceiro as informações necessárias e disponíveis para o cumprimento das obrigações acordadas;
- j) manter sigilo das informações sensíveis (conforme classificação da Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011 - Lei de Acesso à Informação - LAI) obtidas em razão da execução do acordo, somente divulgando-as se houver expressa autorização dos partícipes;
- k) Observar os deveres previstos na Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018 (Lei Geral de Proteção de Dados - LGPD), adotando medidas eficazes para proteção de dados pessoais a que tenha acesso por força da execução deste acordo; e
- l) obedecer às restrições legais relativas à propriedade intelectual, se for o caso.

Subcláusula única. Os partícipes concordam em oferecer, em regime de colaboração mútua, todas as facilidades para a execução do presente instrumento, de modo a, no limite de suas possibilidades, não faltarem recursos humanos, materiais e instalações, conforme as exigências do Plano de Trabalho.

CLÁUSULA QUARTA - DAS OBRIGAÇÕES DO PARTÍCIPE 1

Para viabilizar o objeto deste instrumento, são responsabilidades do **CENTRO GESTOR E OPERACIONAL DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA**:

- **a)** Disponibilizar e processar imagens de satélite (ópticas e de radar) para a identificação de plumas de sedimentos e alterações na coloração dos corpos d'água na Amazônia Legal;
- **b)** Desenvolver e manter algoritmos de processamento digital de imagens capazes de estimar o nível de turbidez a partir da reflectância da água;
- **c)** Fornecer à ANA o acesso às plataformas de monitoramento do SIPAM que contenham dados geoespaciais relevantes sobre focos de garimpo e desmatamento associado;
- **d)** Elaborar relatórios de inteligência geográfica que cruzem os dados de turbidez com a localização de áreas degradadas e pistas de pouso clandestinas;
- **e)** Capacitar técnicos da ANA na utilização das ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas de visualização de dados do CENSIPAM;
- **f)** Emitir alertas antecipados sempre que a análise espectral indicar anomalias hídricas compatíveis com o revolvimento de leito por atividade minerária.

CLÁUSULA QUINTA - DAS OBRIGAÇÕES DO PARTÍCIPE 2

Para viabilizar o objeto deste instrumento, são responsabilidades da **AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO**:

- **a)** Disponibilizar dados históricos e em tempo real da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) relativos aos parâmetros físico-químicos (turbidez, sólidos suspensos e condutividade) para fins de calibração dos modelos de satélite;
- **b)** Apoiar tecnicamente na definição dos limites de tolerância para o parâmetro de turbidez, com base no enquadramento dos corpos d'água previsto na **Resolução CONAMA nº 357/2005**;
- **c)** Validar, por meio de vistorias técnicas ou análise de estações telemétricas, os alertas de anomalia hídrica gerados pelo CENSIPAM;
- **d)** Integrar os resultados do monitoramento conjunto ao **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**, garantindo a transparência dos dados de qualidade da água;
- **e)** Fornecer apoio logístico e técnico para a instalação de novos sensores de monitoramento de qualidade de água em áreas críticas de garimpo identificadas estrategicamente;
- **f)** Articular com os Comitês de Bacias Hidrográficas e órgãos estaduais de recursos hídricos a divulgação de informações sobre os impactos do garimpo na disponibilidade e qualidade hídrica da região.

CLÁUSULA SEXTA – DO ACOMPANHAMENTO DA EXECUÇÃO DO ACORDO DE COOPERAÇÃO TÉCNICA

No prazo de 30 dias a contar da assinatura do presente Acordo, cada partícipe designará formalmente o responsável titular e respectivo suplente, preferencialmente servidores públicos, para acompanhar a execução e o cumprimento do objeto do Acordo de Cooperação Técnica.

Subcláusula primeira. Competirá aos responsáveis a comunicação com o outro partícipe, bem como transmitir e receber solicitações; marcar reuniões, devendo todas as comunicações serem documentadas.

Subcláusula segunda. Sempre que o indicado não puder continuar a desempenhar a incumbência, este deverá ser substituído. A comunicação deverá ser feita ao outro partícipe, no prazo de até **XX** dias da ocorrência do evento, seguida da identificação do substituto.

CLÁUSULA SÉTIMA – DOS RECURSOS FINANCEIROS E PATRIMONIAIS

Não haverá transferência de recursos financeiros ou doação de bens entre os partícipes para a execução do presente Acordo de Cooperação Técnica. As despesas necessárias à plena consecução do objeto acordado, tais como: pessoal, deslocamentos, comunicação entre os órgãos e outras que se fizerem necessárias, correrão por conta das dotações específicas constantes nos orçamentos dos partícipes.

Subcláusula primeira. As ações que implicarem repasse de recursos serão viabilizadas por intermédio de instrumento específico.

Subcláusula segunda. Os serviços decorrentes do presente Acordo serão prestados em regime de cooperação mútua, não cabendo aos partícipes quaisquer remunerações.

CLÁUSULA OITAVA – DOS RECURSOS HUMANOS

Os recursos humanos utilizados por quaisquer dos PARTÍCIPIES, em decorrência das atividades inerentes ao presente Acordo, não sofrerão alteração na sua vinculação nem acarretarão quaisquer ônus ao outro partícipe.

Subcláusula única. As atividades não implicarão cessão de servidores, que poderão ser designados apenas para o desempenho de ação específica prevista no acordo e por prazo determinado.

CLÁUSULA NONA - DO PRAZO E VIGÊNCIA

O prazo de vigência deste Acordo de Cooperação Técnica será de **36 meses** a partir da assinatura, podendo ser prorrogado, mediante a celebração de aditivo.

CLÁUSULA DÉCIMA - DAS ALTERAÇÕES

O presente Acordo poderá ser alterado, no todo ou em parte, mediante termo aditivo, desde que mantido o seu objeto.

CLÁUSULA DÉCIMA PRIMEIRA- DO ENCERRAMENTO

O presente Acordo de Cooperação Técnica será extinto:

- a) por advento do termo final, sem que os partícipes tenham até então firmado aditivo para renová-lo;
- b) por denúncia de qualquer dos partícipes, se não tiver mais interesse na manutenção da parceria, notificando o parceiro com antecedência mínima de 30 dias;
- c) por consenso dos partícipes antes do advento do termo final de vigência, devendo ser devidamente formalizado; e
- d) por rescisão.

Subcláusula primeira. Havendo a extinção do ajuste, cada um dos partícipes fica responsável pelo cumprimento das obrigações assumidas até a data do encerramento.

Subcláusula segunda. Se na data da extinção não houver sido alcançado o resultado, os partícipes entabularão acordo para cumprimento, se possível, de meta ou etapa que possa ter continuidade posteriormente, ainda que de forma unilateral.

CLÁUSULA DÉCIMA SEGUNDA - DA RESCISÃO

O presente instrumento poderá ser rescindido justificadamente, a qualquer tempo, por qualquer um dos partícipes, mediante comunicação formal, com aviso prévio de, no mínimo, 30 dias, nas seguintes situações:

- a) quando houver o descumprimento de obrigação por um dos partícipes que inviabilize o alcance do resultado do Acordo de Cooperação Técnica; e
- b) na ocorrência de caso fortuito ou de força maior, regularmente comprovado, impeditivo da execução do objeto.

CLÁUSULA DÉCIMA TERCEIRA – DA PUBLICAÇÃO

A eficácia do presente Acordo de Cooperação Técnica fica condicionada à publicação do respectivo extrato no Diário Oficial da União, a qual deverá ser providenciada pelo Censipam no prazo de até 20 (vinte) dias a contar da respectiva assinatura.

Subcláusula única. Os PARTÍCIPIES deverão publicar o inteiro teor deste Acordo de Cooperação Técnica na página de seus respectivos sítios oficiais na internet, no prazo de 20 (vinte) dias, a contar da sua assinatura.

CLÁUSULA DÉCIMA QUARTA – DA PUBLICIDADE E DIVULGAÇÃO

A publicidade decorrente dos atos, programas, obras, serviços e campanhas, procedentes deste Acordo de Cooperação Técnica deverá possuir caráter educativo, informativo, ou de orientação social, dela não podendo constar nomes, símbolos ou imagens que caracterizem promoção pessoal de autoridades ou servidores públicos, nos termos do art. 37, §1º, da Constituição Federal.

CLÁUSULA DÉCIMA QUINTA – DA AFERIÇÃO DE RESULTADOS

Os partícipes deverão aferir os benefícios e alcance do interesse público obtidos em decorrência do ajuste, mediante a elaboração de relatório conjunto de execução de atividades relativas à parceria, discriminando as ações empreendidas e os objetivos alcançados, no prazo de até 30 dias após o encerramento.

CLÁUSULA DÉCIMA SEXTA - DOS CASOS OMISSOS

As situações não previstas no presente instrumento serão solucionadas de comum acordo entre os partícipes, cujo direcionamento deve visar à execução integral do objeto.

CLÁUSULA DÉCIMA SÉTIMA - DA CONCILIAÇÃO E DO FORO

Na hipótese de haver divergências, que não puderem ser solucionadas diretamente por consentimento, os partícipes solicitarão à Câmara de Mediação e de Conciliação da Administração Pública Federal - CCAF, órgão da Advocacia-Geral da União, a avaliação da admissibilidade dos pedidos de resolução de conflitos, por meio de conciliação.

Subcláusula única. Não logrando êxito a tentativa de conciliação e solução administrativa, será competente para dirimir as questões decorrentes deste Acordo de Cooperação Técnica o foro da Justiça Federal da Seção Judiciária do Distrito Federal, nos termos do inciso I do art. 109 da Constituição Federal.

E, por assim estarem plenamente de acordo, os partícipes obrigam-se ao total e irrenunciável cumprimento dos termos do presente instrumento, o qual lido e achado conforme, assinam eletronicamente por meio de seus representantes, para que produza seus legais efeitos, em Juízo ou fora dele.

Local/UF, XX de XXXX de 20XX

Partícipe 1
(nome e cargo)

Partícipe 2
(nome e cargo)

5. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Italo Bernardes et al. Nem tudo que reluz é história do garimpo na Amazônia brasileira. **Espacio abierto: cuaderno venezolano de sociología**, v. 34, n. 4, p. 77-95, 2025. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10361779.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.
- ARDYAN, Putu Abel Nugraha. Water Quality Analysis Using NDTI and TSS Parameters Based on Sentinel Image Data in Jakarta Bay Waters. *Maritime Technology and Society*, v. 4, n. 2, p. 103-109, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.62012/mp.vi.43831>. Acesso em: 3 abr. 2026.
- BARBOSA, Cláudio Clemente Faria et al. Caracterização espectral das massas d'água amazônicas. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 11, p. 1099-1106, 2003. Disponível em: https://www.academia.edu/download/96690707/18_329.pdf. Acesso em: 1º de maio de 2026.
- BARBOSA, Claudio Clemente Faria; DE MORAES NOVO, Evelyn Marcia Leão; MARTINS, Vitor Souza (Ed.). **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. Disponível em: <https://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=pX2cDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=barbosa+2019+iops+aops+%C3%B3ptica+hidrol%C3%B3gica+&ots=ZSGw7zFtak&sig=25GGSJjW7rJd5Xe8XX7LoWyiRq4>. Acesso em: 1º de maio de 2026.
- BARBINO, Gutieres Camatta; ANDRADE, Nara Luísa Reis de; WEBLER, Alberto Dresch; SANCHES, Luciana; AGUIAR, Renata Gonçalves; ANTONUCCI, Barbára. **Índice de área foliar e sua relação com o microclima em floresta e pastagem na Amazônia Ocidental**. *Revista Brasileira de Climatologia*, Dourados, v. 32, p. 311-335, jan./jun. 2023. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/download/16296/9302>. Acesso em: 5 maio 2026.
- BARROS, Afonso Henrique Rodrigues de Oliveira et al. **Análise da cobertura do solo como ferramenta para o planejamento e a gestão ambiental na microbacia do Rio Professora Cleci, Amazônia Ocidental, Brasil**. *Revista Caderno Pedagógico*, Curitiba, v. 20, n. 10, p. 4388-4407, 2023. DOI: 10.54033/cadpedv20n10-005. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Wanderson-Cavaleiro/publication/376868389_Analise_da_cobertura_do_solo_como_ferramenta_para_o_planejamento_e_a_gestao_ambiental_na_microbacia_do_Rio_Professora_Cleci_Amazonia_Ocidental_Brasil/links/665897870b0d2845747394a1/Analise-da-cobertura-do-solo-como-ferramenta-para-o-planejamento-e-a-gestao-ambiental-na-microbacia-do-Rio-Professora-Cleci-Amazonia-Ocidental-Brasil.pdf. Acesso em: 5 maio 2026.
- BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, [2016]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.
- BRASIL. Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002]. **Código Civil**. Brasília, DF: Presidência da República, [2002]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/110406compilada.htm. Acesso em: 1 maio 2026.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 2.848, de 7 de dezembro de 1940.** Código Penal. Brasília, DF: Presidência da República, 1940. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del2848compilado.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. Decreto nº 79.367, de 9 de março de 1977. Dispõe sobre normas e o padrão de potabilidade de água. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 10 mar. 1977. Disponível em: [D79367](#). Acesso em: 1º de maio de 2026.

BRASIL. Exposição de Motivos Interministerial nº 194, de 14 de setembro de 1990. [Assunto: Criação do Sistema de Vigilância da Amazônia - Sivam e do Sistema de Proteção da Amazônia - Sipam]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 184, p. 9, 24 set. 1990. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=9&data=24/09/1990>. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 8.176, de 8 de fevereiro de 1991.** Define crimes contra a ordem econômica e cria o Sistema de Estoques de Combustíveis. Brasília, DF: Presidência da República, 1991. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8176.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.850, de 2 de agosto de 2013.** Define organização criminosa e dispõe sobre a investigação criminal, os meios de obtenção da prova, infrações penais correlatas e o procedimento criminal; altera o Decreto-Lei nº 2.848, de 7 de dezembro de 1940 (Código Penal); revoga a Lei nº 9.034, de 3 de maio de 1995; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2013. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/112850.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 11.337, de 1º de janeiro de 2023.** Aprova a Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e das Funções de Confiança do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - Censipam, e remaneja cargos em comissão e

funções de confiança. Brasília, DF: Presidência da República, [2023]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/d11337.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 053, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Defesa. Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM). **BDI Censipam nº 8: Boletim de Desmatamento e Ilícitos Ambientais: JUL-AGO 2025**. Brasília, DF: CENSIPAM, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/censipam/pt-br/central-de-conteudos/boletins/bdi_censipam/BDICensipamN8JULAGO2025.pdf. Acesso em: 1 maio 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2024: informe anual**. Brasília, DF: ANA, 2024. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura2024_04122024.pdf. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. Polícia Federal. *Laudo pericial: impactos da mineração no rio Tapajós*. São Paulo: Instituto Escolhas, 2020. Disponível em: <https://www.escolhas.org/wp-content/uploads/2020/05/Laudo-pericial-Tapaj%C3%B3s.pdf>. Acesso em: 1º de maio 2026.

BRASIL. Tribunal Regional Federal da 1ª Região (TRF1). *Processo nº 1037536-26.2024.4.01.3200*. Ação civil pública. Ministério Público Federal versus réus não especificados. 2024.

BRASIL. Ministério Público Federal. *MPF ajuíza ação por danos ambientais decorrentes de garimpo ilegal no Amapá (Igarapé Água Preta)*. 2025. Disponível em: <https://www.mpf.mp.br/o-mpf/unidades/pr-ap/noticias/mpf-requer-indenizacao-de-r-51-6-mi-e-descontaminacao-de-rios-apos-rompimento-de-barragem-de-garimpo-ilegal-no-amapa>. Acesso em: 1 maio 2026.

BRUNCKHORST, André. **Relação entre as atividades de mineração e a saúde de recém-nascidos na bacia hidrográfica do rio Tapajós**. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/Pos-Graduacao/profagua/dissertacoesdefendidas/unb_2022_andrebrunckhorst.pdf. Acesso em: 22 jan. 2026.

DA SILVA, André Felipe Cândido. Dos lagos temperados às águas amazônicas: a constituição histórica da limnologia como saber ecológico entre a Alemanha e o Brasil. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 17, n. 1, p. 243-275, 2024. Disponível em: <https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/1016>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

CABRAL, Lorena de Paula; MIRANDA, Jarbas Honorio de; GOMES, Jacqueline Martins. **A conjuntura atual ambiental do rio Amana, Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazônia, Brasil: impactos físicos do garimpo de ouro.** *Nexus Revista de Extensão do IFAM*, n. 13, ano 9, p. 108-117, dez. 2023. Disponível em: <https://nexus.ifam.edu.br/index.php/revista-nexus/article/download/199/178>. Acesso em: 5 maio 2026.

CASTRO, J. B. de; PINHEIRO, R. de S.; LOPES, S. F. S. Análise da variabilidade espacial da qualidade da água na Baía de Jacarta utilizando sensoriamento remoto. *Maritime Technology and Society*, v. 3, n. 2, p. 51-58, jun. 2024.

COLOMBO, Silvana. *Aspectos conceituais do princípio do poluidor-pagador*. Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental (REMEA), Rio Grande, v. 13, jul./dez. 2004. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/remea/article/view/2720/1555>. Acesso em: 1 maio 2026.

CORTINHAS FERREIRA NETO, Luiz et al. Uncontrolled illegal mining and Garimpo in the Brazilian Amazon. *Nature communications*, v. 15, n. 1, p. 9847, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-54220-2>. Acesso em: 22 jan. 2026.

CORTIVO, Fábio Dall. **Reconstrução de termo fonte e condições de contorno em óptica hidrológica com séries de Fourier**. 2009. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/bitstreams/c7783142-0246-441c-a8b9-bc047695d765/download>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

COSTA, L. S., Albuquerque, G. H. Q., Oliveira, S., & Beneditti, C. A. (2025). Indicador geoespacial de Frentes de Garimpo a partir do Sistema de Alertas de Garimpo (LOGAR) do CENSIPAM. *REVISTA DE SEGURANÇA, DESENVOLVIMENTO E DEFESA*, 2(2), 91-102.

DAS, Nilendu; BHATTACHARJEE, Rajarshi; CHOUBEY, Abhinandan; AGNIHOTRI, Ashwani Kumar; OHRI, Anurag; GAUR, Shishir. **Analysing the change in water quality parameters along river Ganga at Varanasi, Mirzapur and Ghazipur using Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data during pre-lockdown, lockdown and post-lockdown associated with COVID-19.** *Journal of Earth System Science*, v. 131, n. 102, 2022. DOI: 10.1007/s12040-022-01825-0. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12040-022-01825-0>. Acesso em: 5 maio 2026.

DE CASTRO, Francisco Xavier Medeiros. A rede logística-criminal do narcogarimpo e do garimpo ilegal em terras indígenas Yanomami: evidências e proposta de neutralização pelo poder público. *Pro Lege Vigilanda*, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 36-72, 2024. Disponível em: <https://periodicos.esbm.org.br/index.php/prolegevigilanda/article/view/29>. Acesso em: 22 jan. 2026.

DE CASTRO, Luís Felipe Perdigão; ALVES, Fernando Casqueiro. Mineração em terra indígena e o estado de coisas inconstitucional: aspectos jurisprudenciais, conflitos e (in) segurança dos povos indígenas. *Revista de Direito Econômico e Socioambiental*, v. 15, n. 3, p. e279-e279, 2024.. Disponível em: <https://periodicos.pucpr.br/direitoeconomico/article/view/30135>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

DE CAMPOS, Roger Francisco Ferreira; PAVELSKI, João Vitor. **Análise da interação antrópica com o Índice da Qualidade da Água (IQA) do Rio do Peixe no perímetro do município de Caçador (Santa Catarina).** Meio Ambiente (Brasil), [S. l.], v. 7, n. 3, p. 66-81, 2025. Disponível em: <https://www.meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/519>. Acesso em: 22 jan. 2026.

DE MELO NOGUEIRA, Edileuza. **Atuação do Censipam na proteção, conservação e desenvolvimento sustentável da Amazônia Legal e Amazônia Azul.** *Diálogos Soberania e Clima*, [S. l.], v. 2, n. 8, p. 64-72, 2023. Disponível em: <https://soberaniaeclima.org.br/wp-content/uploads/2023/08/06-Atuacao-do-Censipam-na-protecao-conservacao-e-desenvolvimento-sustentavel-%E2%80%94-Edileuza-de-Melo-Nogueira.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.

DE MORAES RUDORFF, Natália et al. Classificação de águas da planície de inundação do Rio Amazonas, com uso do Spectral Angle Mapper (SAM) e uma biblioteca espectral. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.11.18.36/doc/p0169.pdf>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

DE SALIS¹, Hugo Henrique Cardoso; FRÁGUAS, Lauro Magalhães; RODRIGUES, Ramon Neto. Sensoriamento Remoto da Turbidez: Análise do NDTI no Reservatório de Retiro Baixo após o Rompimento da Barragem da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho–MG. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/marte2/2025/08.16.17.01.43/doc/@individualPDF.pdf>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

DE SOUSA, Rodrigo Silva et al. **Connections among land use, water quality, biodiversity of aquatic invertebrates, and fish behavior in Amazon rivers.** *Toxics*, v. 10, n. 182, 2022. DOI: 10.3390/toxics10040182. Disponível em: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/214293/CONICET_Digital_Nro.960636e8-58ae-4deb-a67f-f97f0cc2eb91_B.pdf?sequence=2. Acesso em: 5 maio 2026.

DUTRA, Vítor Abner Borges; TAVARES, Paulo Amador; RIBEIRO, Hebe Morganne Campos. **Analysis of cloud condition on Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI images of a public supply lake in Belém-Pará-Brazil.** *Revista Ambiente & Água*, v. 14, n. 4, e2375, 2019. DOI: 10.4136/ambi-agua.2375. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/MZtBHQkHrdgqfWtTS8jrDwb/abstract/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 5 maio 2026

FACCO, Douglas Stefanello. Dinâmica espaço-temporal da turbidez no reservatório de Itaipu, na região sul do Brasil, utilizando dados de sensoriamento remoto. 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/264363>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

FAGUNDES, Flávia Carolina de Resende. **O SIVAM e a cooperação na Amazônia.** 2004. Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/RelacoesInternacionais_FagundesFC_1.pdf. Acesso em: 22 jan. 2026.

FIGUEIREDO, Ana; GUIMARÃES, Ryanny. Esquemas criminais: a emergência do Primeiro Comando da Capital no garimpo ilegal da Terra Indígena Yanomami. **Boletim de Análise Político-Institucional:** dinâmicas da violência na região norte, Brasília, DF, n. 36, p. 101-111, jan.

2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/bapi36art8>. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/13594>. Acesso em: 22 jan. 2026.

FILHO, Silva; ERIVALDO, Cavalcanti e. **Impactos ambientais na Bacia Hidrográfica Amazônica**. Disponível em: <<https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/42340>>. Acesso em: 22 jan. 2026.

FRANÇA, Cynara Alets Sthuaeth Souza de Melo; DEUS, Leandro Andrei Beser de. **Das mudanças de uso e cobertura do solo como instrumento de decisão para a gestão ambiental na Amazônia: estudo de caso no município de Capixaba-Acre**. *Revista de Geografia*, v. 11, n. 2, p. 176-191, 2021.

GOMES, Carla Amado. **O princípio da gestão racional dos recursos hídricos como princípio de Direito Internacional e Ambiental**. *Revista ESMAT*, [S. l.], v. 9, n. 13, p. 61-76, 2017. Disponível em: https://esmat.tjto.jus.br/publicacoes/index.php/revista_esmat/article/view/191. Acesso em: 22 jan. 2026.

GRAY, John E.; LABSON, Victor F.; WEAVER, Jean N.; KRABBENHOFT, David P. **Mercury and methylmercury contamination related to artisanal gold mining, Suriname**. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 23, 2105, 2002. DOI: 10.1029/2002GL015575. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002GL015575>. Acesso em: 5 maio 2026.

HUSZAR, Vera Lúcia de Moraes et al. **Phytoplankton biomass increases in a silt-impacted area in an Amazonian flood-plain lake over 15 years**. *Oecologia Australis*, v. 26, n. 2, p. 199-212, 2022. DOI: 10.4257/oeco.2022.2602.09. Disponível em: <https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/phytoplankton-biomass-increases-in-a-silt-impacted-area-in-an-ama/>. Acesso em: 5 maio 2026.

KEHRIG, Helena do A.; HOWARD, Bruce M.; MALM, Olaf. **Methylmercury in a predatory fish (Cichla spp.) inhabiting the Brazilian Amazon**. *Environmental Pollution*, v. 154, p. 68-76, 2008. DOI: 10.1016/j.envpol.2007.12.038. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749107006197>. Acesso em: 5 maio 2026.

MARINHO, Rogério Ribeiro; RIBEIRO, Diogo Ferreira. **Impactos do garimpo de ouro na bacia do rio Amanã (AM-PA)**. *Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade*, v. 5, n. 2, p. 349-369, 2023. DOI: 10.46551/rvg2675239520232349369. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/verdegrande/article/view/6571>. Acesso em: 5 maio 2026.

MARTOREDJO, Irvin Benito. **Tendências na distribuição da contaminação por mercúrio entre humanos e animais na Amazônia influenciadas pela mineração de ouro em pequena escala.** 2023. 49 f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2023.

MIRANDA, Ana Luisa Albuquerque et al. **Impactos da mineração sobre os povos originários Yanomamis da Amazônia: uma revisão sistemática.** *Revista Foco*, Curitiba, v. 17, n. 4, e4922, p. 1-11, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n4-107.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). **Munduruku.** Terras Indígenas no Brasil, [2026]. Disponível em: <https://terrasindigenas.org.br/pt-br/terras-indigenas/3770>. Acesso em: 22 jan. 2026.

JENSEN, John R. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

JOHNSON, Richard Arnold et al. *Applied multivariate statistical analysis*. 2002. Disponível em: https://www.academia.edu/download/31202179/Dr_Alodat_STAT_459_L01_Spring_2012.pdf. Acesso em: 1º de maio de 2026.

LOPARDO, Nicolas. Estudo hidrodinâmico e correlação com sólidos suspensos e turbidez na Lagoa Itapeva do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul. 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3982>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

MAGALHÃES, José Amarildo Dias. **Políticas de transporte na Amazônia Brasileira:** uma análise dos pontos de vista da logística e do desenvolvimento regional sustentável. 2011. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido) – Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/3432>. Acesso em: 22 jan. 2026.

MESSINA, Leonardo Denardi; TANACA, Aline; PIMENTEL, Andréa Eloisa Bueno. **O Desmonte das Políticas Ambientais no Brasil (2019-2022):** Estratégias e Impactos sob o Governo Bolsonaro. In: JORNADA CIENTÍFICA DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA, 19., 2024, [S. l.]. *Anais [...]*. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://grcmlesydpd.objectstorage.sa-saopaulo-1.oci.customer-oci.com/p/OQwcvnO-c63O08Gc2Kv4OTbJttj5ik60dguiDIyyQ0wuo5SWn-jHOLW9wNbylNqI/n/grcmlesydpd/b/dtysppobjmntbtkp01/o/media/doity/submissoes/artigo-e43a3fbe4b5918a29b0cdcdcaecf8d4fd0e9de5ef0b32fa19c914a4b-arquivo.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Água potável: direito humano fundamental**. Nações Unidas Brasil, 28 jul. 2010. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/55564-%C3%A1gua-pot%C3%A1vel-direito-humano-fundamental>. Acesso em: 22 jan. 2026.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivo 6: Água potável e saneamento**. Nações Unidas Brasil, [2026]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>. Acesso em: 22 jan. 2026.

OLIVETTI, Diogo et al. Desenvolvendo um modelo de sensoriamento remoto para estimativa de sólidos em suspensão em águas turvas complexas: o caso do Rio Madeira. **XVI ENES, Curitiba**, 2024. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/239/II-FLUHIDROS0077-1-20240619-163514.pdf>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

PINET, Sylvain; MARTINEZ, Jean-Michel; OUILLON, Sylvain; LARTIGES, Bruno; ESPINOZA VILLAR, Raul. **Variability of apparent and inherent optical properties of sediment-laden waters in large river basins: lessons from in situ measurements and bio-optical modeling**. *Optics Express*, v. 25, n. 8, p. A283-A310, 2017. DOI: 10.1364/OE.25.00A283.

RAWAT, Kishan Singh; SINGH, Sudhir Kumar. **Monitoring water spread and aquatic vegetation using earth observational data for Nani-High Altitude Lake (N-HAL) of Uttarakhand State, India**. *Journal of Engineering Research*, v. 12, p. 64-74, 2024. DOI: 10.1016/j.jer.2023.10.014.

RIBEIRO, Luiz Gustavo Gonçalves; IASBIK, Thaís Aldred. O garimpo ilegal e sua (in) significância no âmbito do direito penal ambiental. **Revista Argumentum-Argumentum Journal of Law**, v. 20, n. 1, p. 165-184, 2019. Disponível em: <https://ojs.unimar.br/index.php/revistaargumentum/article/view/596>. Acesso em: 22 jan. 2026.

ROCHA, Alan Pierre *et al.* Os impactos socioambientais causados pela mineração em terras indígenas no Brasil. **ARACÊ**, p. 20658–20671, 2025. Acesso em: 3 de abril de 2026.

RODRIGUES, Jeane Patricio. **Caracterização bio-óptica das águas do estuário da Lagoa dos Patos, RS-Brasil**. 2014. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/server/api/core/bitstreams/f2fcf6b4-1805-4dd0-a851-a0f2b76220e9/content>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

SARI, Vanessa et al. Efeitos do tamanho da partícula e da concentração de sedimentos suspensos sobre a turbidez. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 213-219, mar./abr. 2017. DOI:

10.1590/S1413-41522016144228. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/esa/a/6MMPDm9CWSDJXZRpRHcBp5K/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 1º de maio de 2026.

SILVA, D. Sampaio da *et al.* **Mercúrio nos peixes do Rio Tapajós, Amazônia brasileira.** INTERFACEHS: Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente, São Paulo, v. 1, n. 1, art. 6, ago. 2006. Disponível em:
http://www.interfacehs.sp.senac.br/br/artigos.asp?ed=1&cod_artigo=6. Acesso em: 22 jan. 2026.

SILVA, Henrique Matheus Costa. **As falhas na informação aeronáutica através de uma comunicação ineficaz.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Aeronáuticas) – Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/3372>. Acesso em: 22 jan. 2026.

SILVA FILHO, Erivaldo Cavalcanti. **Impactos ambientais na Bacia Hidrográfica Amazônica.** 2024.

Disponível em

<<https://dspace.sti.ufcg.edu.br/bitstream/riufcg/42340/1/IMPACTOS%20AMBIENTAIS%20NA%20BACIA%20-%20-%20PALESTRA%20SINCREP%20UFCG%202024.pdf>> . Acesso em: 20 Dez 2025.

TIRELLO, Thiago Santoro Baptista. Estimativas de parâmetros de qualidade da água (índice de estado trófico–TSI) da Lagoa de Extremoz (RN) a partir do uso do sensoriamento remoto e da computação em nuvem. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/60d34041-2fc8-4c5b-9743-41eb736e86c3>. Acesso em: 1º de maio de 2026.