

Indicador geoespacial de frentes de garimpo a partir do Sistema de Alertas de Garimpo (LOGAR) do CENSIPAM

Geospatial indicator of mining fronts from the Mining Alert System (LOGAR) of CENSIPAM

Indicador geoespacial de frentes de minería ilegal a partir del Sistema de Alertas de Minería (LOGAR) del CENSIPAM

Indicateur géospatial des fronts de l'orpaillage à partir du Système d'Alerte de l'Orpaillage (LOGAR) du CENSIPAM

Lucas Silva Costa¹

Giovanna Henrique Queiroz Albuquerque²

Sandro Oliveira³

Cristina Aparecida Beneditti⁴

Resumo

Este trabalho apresenta uma ferramenta geoespacial para identificar frentes ativas de garimpo na Amazônia Legal, com base em alertas históricos do sistema LOGAR (CENSIPAM). O Índice de Frente de Garimpo (IFG) combina a concentração espacial e a persistência temporal de alertas associados à mineração irregular, permitindo detectar áreas com atividade contínua. A proposta visa otimizar o monitoramento territorial e priorizar ações de fiscalização, especialmente em Terras Indígenas. Os resultados mostram que o IFG é eficaz para captar dinâmicas distintas. Na TI Kayapó, entre 2023 e 2025, mesmo com redução no número de alertas, foram identificadas frentes persistentes e realocação espacial da atividade. Na TI Yanomami, observou-se um pico em fevereiro de 2023, seguido por queda acentuada nas frentes. A metodologia, baseada em sensoriamento remoto e SIG, é prática, replicável e útil para apoiar políticas públicas, coordenar ações interagências e priorizar aquisição de imagens. O IFG contribui para uma vigilância mais inteligente e estratégica, capaz de acompanhar a evolução do garimpo irregular em contextos de alta vulnerabilidade.

Palavras-chave: Amazônia Legal; Ilícitos; sensoriamento remoto; desmatamento; PlanetScope.

Abstract

This study presents a geospatial tool for identifying active illegal mining fronts in the Brazilian Legal Amazon, based on historical alerts from the LOGAR system (CENSIPAM). The Mining Front Index combines the spatial density and temporal persistence of alerts linked to illegal gold mining to detect areas with ongoing activity. The goal is to improve territorial monitoring and prioritize enforcement efforts, particularly in Indigenous Lands. Results demonstrate the index's effectiveness in capturing distinct patterns. In

¹Doutor e Mestre em Ecologia. Analista em Ciência e Tecnologia lotado na coordenação de Geoinformática do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM).

²Mestranda em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Analista em Ciência e Tecnologia com atuação na área de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto na Coordenação Geral de Inteligência (CGINT) do CENSIPAM.

³Mestre em Segurança Pública. Coordenador de Inteligência do Centro Regional de Manaus do CENSIPAM.

⁴Doutora em Geociências e Meio Ambiente. Mestre em Ciências Cartográficas. Analista em Ciência e Tecnologia e coordenadora de Geoinformática do CENSIPAM.

the Kayapó Indigenous Land, from 2023 to 2025, active fronts persisted despite a reduction in the number of alerts, including spatial shifts in activity. In the Yanomami Indigenous Land, the index recorded a peak in February 2023, followed by a sharp and sustained decline, likely reflecting the impact of government-led removal operations. The methodology, based on satellite imagery and GIS, is practical and replicable. It supports public policy, enhances interagency coordination, and guides strategic acquisition of high-resolution imagery. The index enables smarter, more targeted surveillance, and is capable of tracking illegal mining trends across vulnerable regions of the Amazon.

Keywords: Legal Amazon; illegal activities; remote sensing; deforestation; PlanetScope.

Resumen

Este trabajo presenta una herramienta geoespacial para identificar frentes activos de minería ilegal en la Amazonía Legal, basada en alertas históricas del sistema LOGAR (CENSIPAM). El Índice de Frente de Minería (IFM) combina la concentración espacial y la persistencia temporal de alertas asociadas a la minería irregular, lo que permite detectar áreas con actividad continua. La propuesta busca optimizar el monitoreo territorial y priorizar acciones de fiscalización, especialmente en Tierras Indígenas. Los resultados muestran que el IFM es eficaz para captar dinámicas distintas. En la TI Kayapó, entre 2023 y 2025, aun con la reducción en el número de alertas, se identificaron frentes persistentes y reubicación espacial de la actividad. En la TI Yanomami, se observó un pico en febrero de 2023, seguido de una fuerte disminución de los frentes, reflejando el probable efecto de las operaciones de desintrusión. La metodología, basada en teledetección y SIG, es práctica, replicable y útil para apoyar políticas públicas, coordinar acciones interinstitucionales y priorizar la adquisición de imágenes. El IFM contribuye a una vigilancia más inteligente y estratégica, capaz de acompañar la evolución de la minería ilegal en contextos de alta vulnerabilidad.

Palabras clave: minería ilegal; Amazonía; geointeligencia; teledetección; SIG.


Résumé

Ce travail présente un outil géospatial destiné à identifier les fronts actifs d'extraction minière illégale dans l'Amazonie légale, à partir d'alertes historiques du système LOGAR (CENSIPAM). L'Indice de Front de Garimpo (IFG) combine la concentration spatiale et la persistance temporelle des alertes liées à l'exploitation minière irrégulière, permettant ainsi de détecter les zones d'activité continue. La proposition vise à optimiser le suivi territorial et à prioriser les actions de contrôle, en particulier dans les Terres Indigènes. Les résultats montrent que l'IFG est efficace pour capter des dynamiques distinctes. Dans la Terre Indigène Kayapó, entre 2023 et 2025, malgré une diminution du nombre d'alertes, des fronts persistants et une relocalisation spatiale de l'activité ont été identifiés. Dans la Terre Indigène Yanomami, un pic a été observé en février 2023, suivi d'une baisse marquée des fronts. La méthodologie, fondée sur la télédétection et les SIG, se révèle pratique, réplicable et utile pour soutenir les politiques publiques, coordonner les actions interinstitutionnelles et prioriser l'acquisition d'images. L'IFG contribue à une surveillance plus intelligente et stratégique, capable de suivre l'évolution du garimpo illégal dans des contextes de forte vulnérabilité.

Mots-clés: Amazonie légale ; activités illicites ; télédétection ; déforestation ; PlanetScope.

1 INTRODUÇÃO

A mineração no Brasil remonta ao período colonial, com a expedição de Martim Afonso de Sousa enviada por Portugal para buscar ouro, prata e pedras preciosas. Em 1549, o Governador-Geral Tomé de Sousa iniciou a exploração de conchas marinhas na Baía de Todos os Santos, usadas na produção de cal para construção. Nos séculos XVII e XVIII, com a descoberta de ouro em Minas Gerais, o Brasil se destacou globalmente, produzindo cerca de 50% do ouro e diamantes do mundo no chamado Ciclo do Ouro. Em 1728, com o esgotamento das jazidas em Mato Grosso, a exploração avançou para o Alto Amazonas e região Norte. Durante a Segunda Guerra Mundial, o país tornou-se fornecedor de minerais estratégicos como mica, quartzo, tungstênio, tântalo, zircão, berilo, manganês e ferro. Nesse período, foi criada a Companhia Vale do Rio Doce para atender à demanda dos EUA e Reino Unido. Hoje, o Brasil é o sexto maior produtor mundial de minerais não combustíveis (Machado; Figueirôa, 2001).



Paralelamente à extração de minério em grande escala existem a mineração artesanal/pequena escala (MAPE) e o garimpo, que pode ser irregular ou regular, quando realizado sob a Permissão de Lavra Garimpeira-PLG, conforme a Lei n.º 7805/1989. O garimpo apresentou crescimento de 1200% no Brasil nas últimas quatro décadas, sobretudo na Amazônia, onde ocorrem cerca de 91% da atividade de garimpo do Brasil (Siqueira-Gay; Sánchez, 2021; Mataveli et al., 2022; Cortinhas Ferreira Neto et al., 2024). Sob a ótica de legalidade, Cortinhas Ferreira Neto et al. (2024) apresentam que quase 80% do garimpo que ocorreu em 2022 tinham sinais de ilegalidade. O garimpo promove impactos irreversíveis tanto sociais como ambientais. Segundo Lobo et al. (2018) a Amazônia responde por cerca de 80% da poluição sul-americana de mercúrio (Hg) no ambiente, sendo a presença de Hg ubíqua e ao mesmo tempo dinâmica em toda região. Devido à permanência do Hg na cadeia alimentar, a exposição, sobretudo humana, à forma tóxica desse elemento não depende da proximidade da fonte poluidora. O consumo de metilmercúrio é de duas a seis vezes acima das doses seguras em algumas regiões amazônicas.

A Amazônia Legal abriga os menores Índices de Desenvolvimento Humano do Brasil (PNUD, 2013). A condição de vulnerabilidade socioeconômica das populações desta região é agravada com a crescente, e recente, presença do garimpo ilegal. Estima-se que cerca de 40% dos garimpos possuem cinco anos ou menos de criação. Essa porção sobe para 62% quando analisadas as áreas de garimpo dentro de terras indígenas (Cortinhas Ferreira Neto et al., 2024). Com o aumento rápido da extração irregular de minério, principalmente ouro, subiram também os conflitos sociais na Amazônia. Haslam e Tanimoune (2016) encontraram relação entre intensidade de conflitos decorrentes do garimpo e a vulnerabilidade social, em que quando maior a pobreza e precariedade da infraestrutura do local, mais intensos são os efeitos do garimpo. Formada por um mosaico de diferentes contextos sociais como comunidades ribeirinhas, extrativistas, pescadores, agricultores familiares, quilombolas e indígenas, a Amazônia configura-se como área prioritária para o combate e o controle do garimpo irregular.

A exploração mineral irregular em Terras Indígenas (TIs) por invasores constitui uma grave problemática socioambiental que afeta parcela significativa desses territórios no Brasil. Em 2021, atividades de mineração irregular ocorreram em 17 TIs, e representou a conversão direta de uma área de aproximadamente 200 km², o que corresponde a cerca de 5% das 332 terras indígenas oficialmente reconhecidas. Apesar de a conversão direta ser relativamente pequena, os impactos indiretos podem alcançar mais de um terço da área de algumas Terras Indígenas, como 33,4% na TI Kayapó, 31,4% na TI Munduruku e 34,4% na TI Yanomami (Da Silva et al., 2023).

O sensoriamento remoto é o conjunto de técnicas para obter informações da superfície terrestre sem contato direto. Os sensores podem ser ópticos, que operam no visível e infravermelho e são passivos por dependerem da radiação solar, ou de micro-ondas, que são ativos por emitirem sua própria radiação e permitem aquisição de dados mesmo sem luz solar ou em presença de nuvens (Liu, 2015). No contexto do monitoramento ambiental, essas tecnologias desempenham papel fundamental, especialmente em regiões de elevada biodiversidade e ampla extensão territorial, como a Amazônia Legal. A utilização integrada de sensores ativos e passivos permite a detecção, análise e acompanhamento de diversos processos ambientais e antrópicos, tais como desmatamento, queimadas, inundações, construção de pistas de pouso clandestinas, presença de embarcações e atividade de garimpo. Essas tecnologias viabilizam a geração de dados em larga escala, com frequência temporal elevada e acesso a áreas de difícil alcance, contribuindo significativamente para a formulação de políticas públicas, ações de fiscalização e estratégias de conservação ambiental.

O monitoramento de áreas de garimpo irregular apresenta diversos desafios, em especial devido à escala reduzida em que essas atividades ocorrem, frequentemente abrangendo superfícies inferiores a um hectare. Essas dimensões limitadas exigem o uso de imagens de média a alta resolução espacial (igual ou inferior a 20 metros) para que possam ser adequadamente detectadas. Outro fator complicador reside na complexidade das redes hidrográficas amazônicas, nas quais a atividade garimpeira pode ocorrer tanto em ambientes de água limpa quanto em águas turvas, além de se desenvolver nas margens dos rios. Essa variabilidade contribui para a geração de assinaturas espectrais semelhantes às de solos expostos, dificultando a diferenciação precisa entre áreas naturais e áreas impactadas pela mineração, sobretudo quando se utiliza sensoriamento remoto óptico convencional (Lobo et al., 2018).

O LOGAR (Localização de Garimpos) foi criado pelo CENSIPAM para detectar, analisar e monitorar atividades irregulares de mineração na Amazônia Legal, evoluindo a partir do ProAE-Inteligência, iniciado em 2008. Reformulado em 2014 e atualizado em 2018, passou a operar como um Sistema de Informações Geográficas de Inteligência, integrando dados do DETER/INPE e PlanetScope do Programa Brasil MAIS, com base de dados centralizada para identificar padrões típicos de garimpo. O banco de dados do LOGAR, composto por polígonos de atividades de garimpo desde 2005, representa uma base histórica valiosa para o entendimento da evolução espacial e temporal do garimpo na Amazônia Legal. No entanto, a distinção entre garimpos históricos e frentes ativas, isto é, áreas com atividade garimpeira ou emergindo

no presente, é essencial para orientar ações de controle ambiental, segurança pública e gestão territorial de forma estratégica e eficiente.

Do ponto de vista da fiscalização, a identificação de frentes de garimpo permite otimizar recursos humanos e logísticos, priorizando a atuação em áreas onde o impacto ambiental e social está em curso ou prestes a se intensificar. Essa capacidade é crucial para o planejamento de operações de desintrusão, especialmente em Terras Indígenas e Unidades de Conservação, onde a presença de garimpeiros irregulares compromete a integridade de populações tradicionais e ecossistemas sensíveis. Além disso, a informação atualizada sobre frentes ativas subsidia decisões quanto ao uso de imagens comerciais de altíssima resolução e de sensores SAR (Radar de Abertura Sintética), permitindo priorizar a cobertura das regiões mais críticas e reduzir custos com imageamento redundante ou desnecessário.

Outro aspecto relevante é a geração de inteligência geoespacial para ações interagências, como as coordenadas pelo Ministério da Justiça, Ibama, ICMBio e Forças Armadas. Ao antecipar a movimentação das atividades de garimpo, é possível agir preventivamente, evitando a consolidação de infraestruturas ilegais (balsas, pistas de pouso, acampamentos) e a formação de cadeias logísticas de apoio. Também há ganhos para o monitoramento de riscos socioambientais, como a contaminação por mercúrio, o assoreamento de rios e a expansão do desmatamento associado à mineração. Em termos estratégicos, a capacidade de detectar frentes ativas reforça o papel do LOGAR como um instrumento de inteligência territorial voltado à proteção da Amazônia e à governança sobre seus recursos naturais. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia simplificada e acessível para identificação de frentes de garimpo, denominada Índice de Frente de Garimpo – IFG, com base no banco de dados de alertas de desmatamento associados à atividade garimpeira. As Terras Indígenas Kayapó e Yanomami foram utilizadas como áreas piloto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado dentro dos limites da Amazônia Legal (AL), região que compreende nove estados brasileiros e ocupa cerca de 5.015.068,18 km², o equivalente a 59% do território nacional. Em termos de biomas, a AL é composta majoritariamente por floresta Amazônica (aproximadamente 80%), seguida pelo Cerrado com 15% e pelo Pantanal com 1% (IBGE, 2003). Do ponto de vista climático, a região se distribui em três classificações de Köppen: Af (clima equatorial úmido), predominante no noroeste, com temperaturas médias entre 25 °C e 28 °C e precipitação média anual (PMA) acima de 2.000 mm, podendo ultrapassar os 3.000 mm, sem estação seca bem definida; Am (clima de monção), que se estende das porções oeste ao nordeste da AL, apresenta uma curta estação seca (junho a agosto), mas mantém PMA elevada, entre 1.600 mm e 3.000 mm; e Aw (clima tropical de savana), com forte sazonalidade, inverno seco (de maio a setembro) e PMA variando entre 1.000 mm e 1.500 mm (Dubreuil et al., 2018). Essas variações refletem a diversidade ambiental que caracteriza a região.

Socioambientalmente, a Amazônia Legal (AL) detém uma das maiores biodiversidades do planeta e uma ampla diversidade sociocultural. A AL abriga mais da metade da população indígena do país, cerca de 51,2% (IBGE, 2023). São 424 Terras Indígenas na Amazônia onde vivem 46% dos indígenas da AL e que juntas somam cerca de 22% de área da AL (1.153.444 Km²) (IBGE, 2023). Em relação às populações quilombolas, o Censo Demográfico 2022 do IBGE contabilizou 426.449 pessoas quilombolas nos municípios da AL – quase um terço (32,11 %) do total dessa população no país, das quais 80.899 vivem em Territórios Quilombolas oficialmente delimitados, o que representa 48,38 % do total nacional desse grupo. O Censo Demográfico 2022 trouxe também dados robustos sobre povos indígenas e comunidades extrativistas, evidenciando sua relevância significativa para o manejo sustentável dos recursos naturais. Atualmente, existem 41 Reservas Extrativistas federais na Amazônia Legal, habitadas por populações tradicionais como seringueiros, castanheiros e outros grupos vinculados a modos de vida extrativistas.

O levantamento identificou ainda que 11,8 milhões de pessoas vivem em Unidades de Conservação no Brasil, correspondendo a 5,8% da população total. Desse universo, os povos e as comunidades tradicionais representam parcelas significativas: os quilombolas somam 282.258 pessoas (2,39% da população residente em UCs) e os indígenas totalizam 132.804 pessoas (1,12%). Quase a totalidade (98,73%) das pessoas que vivem em UCs está em áreas de uso sustentável, como Áreas de Proteção Ambiental e Reservas Extrativistas. Os dados do Censo 2022 também revelam desafios sociais nessas áreas: a taxa de analfabetismo entre os moradores de UCs é de 8,84%, acima da taxa nacional de 7,00%. Entre os 9.245.172 residentes com 15 anos ou mais nessas áreas, 817.383 são analfabetos (IBGE, 2023). Da mesma forma, destacam-se as populações ribeirinhas, que mantêm forte vínculo com a dinâmica e a “saúde” dos rios, sen-

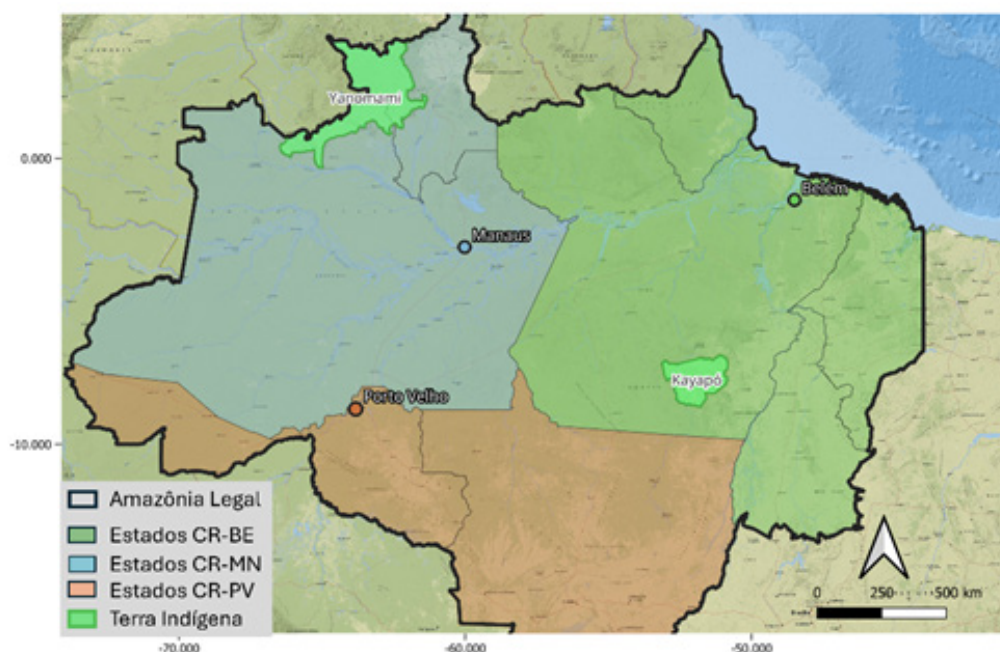
do oficialmente reconhecidas como comunidades tradicionais pelo Decreto n.º 6.040/2007, que institui a Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais (PNPCT).

2.2 DESCRIÇÃO BASE DE DADOS DE ALERTAS E METODOLOGIA LOGAR

O sig_alertas é um banco de dados relacional interno do CENSIPAM, baseado em PostgreSQL e projetado para armazenar e gerenciar dados geoespaciais utilizados pela área operacional dos diferentes Centros da instituição. Implantado em um servidor em rede interna, o sistema permite acesso tanto local quanto externo via VPN, garantindo a confidencialidade e autenticidade dos dados para usuários autorizados. O banco é estruturado para suportar operações analíticas e operacionais relacionadas ao monitoramento territorial da Amazônia Legal, fazendo uso de extensões geográficas como o PostGIS para manipulação avançada de informações espaciais. O sig_alertas é acessado diretamente por ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), especificamente o QGIS, permitindo a visualização, análise e edição dos dados espaciais em tempo real por analistas e técnicos autorizados.

A metodologia aplicada no LOGAR (Localização de Garimpos) é fundamentada na integração de tecnologias de sensoriamento remoto, geoprocessamento e uma rotina analítica estruturada em duas fases principais: validação e revisão. A área de abrangência do LOGAR corresponde à Amazônia Legal brasileira, subdividida para fins operacionais entre os Centros Regionais de Belém (CR-BE), Manaus (CR-MN) e Porto Velho (CR-PV), cada um responsável pelo monitoramento dos estados sob sua jurisdição (Figura 1). Cada analista é designado a um conjunto fixo de cenas satelitais, o que assegura que toda a extensão da Amazônia Legal seja analisada, no mínimo, uma vez por ano.

Figura 1 – Subdivisão da jurisdição dos estados da Amazônia Legal de cada Centro Regional (CR): de Manaus (MN), Belém (BE) e Porto Velho (PV) do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM/MD). Destaca-se as duas Terras Indígenas analisadas neste estudo (Kayapó e Yanomami).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os principais dados de entrada utilizados para detecção de alvos de mineração irregular são os alertas de desmatamento associados à atividade de mineração, oriundos de dois sistemas principais: o DETER (Detecção de Desmatamento em Tempo Real), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e o sistema de alertas baseado na constelação de satélites PlanetScope, vinculado ao programa Brasil MAIS do Ministério da Justiça e Segurança Pública. No Brasil MAIS, o processamento automático utiliza imagens PlanetScope (3 m) para detectar mudanças de cobertura do solo. O fluxo envolve correções radiométricas e geométricas, remoção de nuvens e aplicação do algoritmo de change detection. São calculados índices espectrais como NDVI, NBR e NDWI, comparando séries temporais para identificar quedas abruptas na vegetação e presença de água turva típica de garimpo. O método é orientado ao pixel, com uso predominante de classificação não supervisionada para destacar áreas de mudança e, em seguida, regras espectrais para

refinar os polígonos. As áreas detectadas são transformadas em vetores e classificadas automaticamente, servindo como alertas. Já o DETER do INPE, opera com sensores de média resolução (250 m – MODIS/Terra e Aqua; 64 m – WFI/CBERS-4; 60 m – WFI/Amazonia-1), priorizando a rapidez da detecção em grande escala. O processamento aplica algoritmos de detecção de mudança multitemporal, apoiados em índices como NDVI, EVI e NBR, associados a técnicas de classificação supervisionada e de segmentação orientada a objetos. Esse enfoque orientado ao objeto permite diferenciar padrões geométricos de desmatamento (ex.: polígonos regulares de agricultura versus clareiras irregulares), gerando alertas de maior abrangência espacial e periodicidade quase diária. Apesar da menor resolução, o DETER garante cobertura sistemática e ampla, servindo como ferramenta de fiscalização ágil e complementar ao Brasil MAIS, que se concentra na detecção de mudanças em menor escala. Além dessas duas fontes, o CENSIPAM complementa a cobertura com dados de outros sensores de observação da Terra, como CBERS, LANDSAT, SENTINEL e sensores SAR, permitindo flexibilidade na escolha de imagens conforme as condições de nuvens, resolução espacial e revisita orbital.

O processo analítico segue uma rotina diária, iniciada com a conexão dos analistas ao banco de dados geoespacial por meio da plataforma QGIS. Assim, os alertas recém-gerados são carregados e exibidos como camadas vetoriais, sendo cruzados com a base cartográfica de Terras Indígenas, Unidades de Conservação e títulos minerários da Agência Nacional de Mineração (ANM). Os polígonos identificados com indícios de atividade de garimpo são então classificados quanto à legalidade com base na sobreposição espacial com essas camadas de referência.

A validação inicial é feita com base em interpretação visual de imagens de alta resolução (Planet) considerando características típicas de garimpos, como clareiras com contornos irregulares, presença de estruturas como rampas e balsas e indícios de turbidimetria em corpos hídricos. Os alvos confirmados seguem para a fase de revisão, que consiste na verificação cruzada por um segundo analista. Após esse duplo controle, os registros são consolidados na base de dados definitiva.

O LOGAR também possui capacidade proativa: em regiões sem cobertura contínua ou fora do alcance dos alertas automáticos, o CENSIPAM realiza buscas independentes por meio de análises sistemáticas de imagens, garantindo uma cobertura geoespacial abrangente. Dessa forma, o LOGAR representa um modelo robusto de vigilância territorial e produção de inteligência geoespacial voltada ao combate da mineração ilegal.

2.3 DEFINIÇÃO DE FRENTE DE GARIMPO E DESCRIÇÃO DO ÍNDICE DE FRENTE DE GARIMPO (IFG)

A partir das informações disponibilizadas no LOGAR foi possível propor uma forma simples e acessível de identificação das frentes de garimpo, calculada a partir da estimativa do Índice de Frente de garimpo (Equação 1).

$$\text{Índice de Frente de Garimpo (IFG)} = \frac{\text{Área}/\text{Tempo}}{T - T_{\text{hoje}}} \quad (1)$$

Onde “Área” é soma da área dos alertas, “Tempo” é o intervalo de tempo entre a data do primeiro alerta e do último, enquanto “T” representa a data do último alerta e “Thoje” é a data do dia de hoje.

O código cria uma visão materializada que agrupa alertas de garimpo irregular registrados nos últimos 180 dias e calcula um índice de velocidade de expansão dessas áreas. Utiliza-se um clustering espacial para identificar grupos de alertas próximos e, para cada grupo, calcula a área total, o intervalo de tempo entre os alertas, o tempo desde o último alerta até hoje, e gera uma geometria representativa. A visão destaca os grupos com maior velocidade de crescimento, permitindo priorizar regiões críticas para fiscalização.

Etapas principais (Figura 2):

1. Filtrar os alertas recentes e ilegais (pol): Seleciona apenas os alertas de garimpo com status “ILEGAL”, revisados (revisado = ‘S’), com imagens nos últimos 180 dias. Inclui informações como data do alerta, nome do status, geometria e área;
2. Agrupa espacialmente os alertas (grupos): Usa a função `st_clusterdbscan` para agrupar alertas que estão próximos entre si (distância < 0.00181237 graus ou 200 metros), formando grupos de alertas com pelo menos 2 ocorrências.
3. Resumir os dados por grupo (dados): Para cada grupo,

4. Calcular: A data do primeiro e do último alerta; Área total (soma da área dos alertas); Tempo entre os alertas; Tempo desde o último alerta até hoje; Geometria unificada do grupo;

5. Calcular métricas: Para cada grupo válido ($\text{tempo_diff} > 0$ e grupo IS NOT NULL), calcula: vel: velocidade de aumento do desmatamento associado a garimpo (área por dia). ind_vel: índice de velocidade ajustado pelo tempo desde o último alerta. Geometria envolvente (convex hull) para representar a área total. Os resultados são ordenados pelo índice de velocidade de forma decrescente.

Figura 2 – Fluxograma das etapas utilizadas para a definição das frentes de garimpo e o cálculo do Índice de Frente de Garimpo (IFG).



Fonte: Elaborado pelos autores.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 RESULTADOS

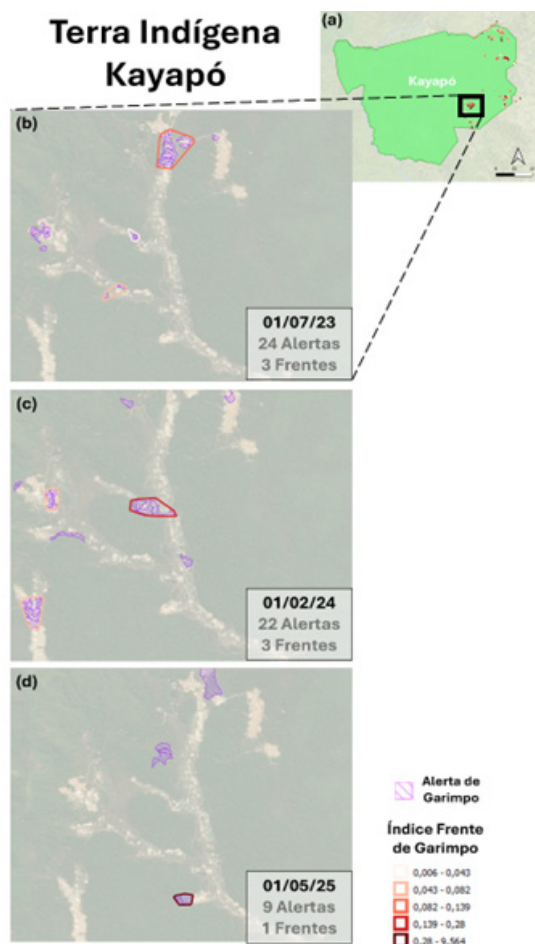
O Índice de Frente de Garimpo (IFG) foi desenvolvido como uma ferramenta analítica para identificar áreas com persistência e concentração de alertas de garimpo irregular recentes, indo além da simples contagem de ocorrências. Ao combinar a densidade espacial e a continuidade temporal dos alertas, o indicador permitiu detectar frentes de atuação garimpeira que se mantêm ativas ao longo do tempo (últimos 180 dias), mesmo que o número bruto de alertas varie. Essa abordagem oferece uma leitura mais qualificada da dinâmica do garimpo, permitindo o monitoramento direcionado e a priorização de áreas críticas para ações de fiscalização.

A sequência de imagens (Figura 3) mostra a dinâmica da atividade garimpeira dentro da Terra Indígena Kayapó (Figura 3a) ao longo de três períodos distintos, destacando tanto o número de alertas quanto a presença e intensidade das frentes de garimpo. Em 1º de julho de 2023 (Figura 3b), foram registrados 24 alertas e três frentes ativas, com áreas demarcadas em diferentes intensidades de vermelho segundo o IFG, ferramenta que sintetiza o grau de concentração espacial e persistência dos alertas. As frentes mais ativas apresentaram valores elevados no IFG (até 9,564), evidenciando áreas de garimpo em crescimento.

No segundo período, em 1º de fevereiro de 2024 (Figura 3c), o número de alertas diminuiu levemente para 22, mantendo-se ainda três frentes identificadas. No entanto, houve uma reorganização espacial dessas frentes, com uma concentração mais destacada na porção central da imagem, associada a um polígono com IFG intermediário-alto (entre 0,139 e 0,28). Esse deslocamento, captado pelo IFG, revela a utilidade da ferramenta para identificar não apenas a quantidade de alertas, mas também padrões de mobilidade e possível expansão ou retração das frentes garimpeiras ao longo do tempo.

A última imagem (Figura 3d), de 1º de maio de 2025, registra uma queda acentuada no número de alertas (nove) e uma redução significativa no número de frentes ativas, restando apenas uma. As áreas marcadas indicam baixa intensidade, com valores situados nas faixas inferiores do IFG. A funcionalidade do IFG torna-se evidente nesse cenário: mesmo com poucos alertas, ele permite diferenciar entre atividades esparsas e aquelas que, ainda que pontuais, concentram esforços contínuos. Essa diferenciação é crucial para orientar estratégias de monitoramento e resposta territorial.

Figura 3 – Evolução dos alertas de garimpo e identificação das frentes de garimpo na Terra Indígena Kayapó (a) em três períodos: (b) 01/07/2023, (c) 01/02/2024 e (d) 01/05/2025. As áreas hachuradas em roxo indicam os alertas detectados, enquanto os contornos sólidos representam as frentes de garimpo identificadas com base no Índice de Frente de Garimpo (IFG). A intensidade da coloração dos polígonos varia conforme o valor do IFG. A intensidade da coloração dos polígonos varia conforme o valor do IFG. A intensidade da coloração dos polígonos varia conforme o valor do IFG. Observa-se uma redução progressiva tanto no número de alertas quanto nas frentes ativas ao longo do período analisado.

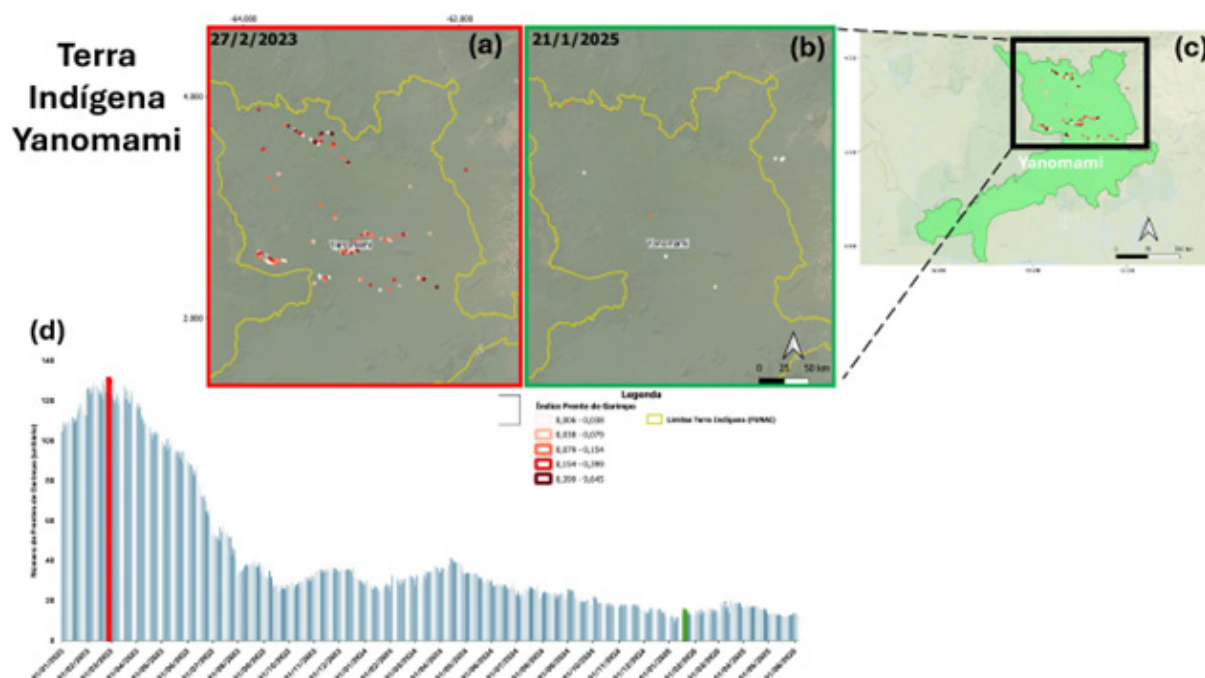


Fonte: Elaborado pelos autores.

Adicionalmente foi feito um estudo de caso histórico durante o período de 2023 a 2025 na Terra Indígena Yanomami (figura 4), conhecida por estar sob forte pressão de garimpo e posterior intensa atividade de repressão a esta atividade ilícita. Na TI Yanomami, os dados temporais revelam um cenário particular, com um máximo da atividade garimpeira em fevereiro de 2023, seguido por uma queda acentuada e contínua. A rápida redução das frentes após o pico indica uma resposta imediata e provavelmente coordenada a uma intervenção governamental, como operações de retirada de invasores amplamente divulgadas na mídia durante esse período. A estabilidade observada nos níveis baixos de atividade a partir do segundo semestre de 2023 sugere eficácia das ações adotadas, ao menos dentro da janela temporal analisada.

Os mapas (figura 4a-b) corroboram essa tendência: em 27 de fevereiro de 2023, as frentes de garimpo estão concentradas principalmente na porção central da TI, com algumas áreas de alta intensidade. Em contraste, no mapa de 21 de janeiro de 2025, praticamente não há registro de frentes ativas. A eliminação quase completa da atividade garimpeira detectável por sensoriamento remoto pode representar um resultado expressivo de controle territorial.

Figura 4 – Mapas comparativos da distribuição espacial das frentes de garimpo referentes ao máximo (a) e mínimo (b) de atividade de garimpo na Terra Indígena Yanomami (c). Os polígonos são classificados de acordo com o índice de frente de garimpo (IFG). Em (d) é apresentada a série temporal do número de frentes de garimpo detectadas na TI Yanomami entre janeiro de 2020 e junho de 2025. A linha vermelha indica a data de pico da atividade garimpeira, e a linha verde a data de menor registro.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2 DISCUSSÃO

O sensoriamento remoto tem sido um aliado estratégico na detecção de mudança de uso do solo, seja o desmatamento para fins madeireiro ou associado ao garimpo irregular. Na revisão feita por Kozinska e Górnica-Zimroz (2021) os autores avaliam métodos para detectar mineração irregular a céu aberto, destacando técnicas baseadas em sensoriamento remoto. As técnicas mais comuns foram a classificação de imagens: supervisionada, não supervisionada e híbrida. Enquanto, as fontes de dados mais usadas foram imagens de satélite gratuitas (Landsat, Sentinel). Porém, a baixa resolução dificultou a detecção de pequenos sítios, característica da mineração e do garimpo irregular, exigindo imagens de maior resolução, por vezes imagens pagas. Por fim, os autores concluem que a escolha do método ideal depende da disponibilidade de dados, características do terreno e recursos tecnológicos, mas os dois mais precisos foram o sistema CLASlite (94%) e a fusão de imagens com índices espectrais (91,1%). O CLASlite depende da qualidade das imagens e apresenta melhor desempenho em regiões tropicais, enquanto a fusão com índices espectrais requer seleção cuidadosa de bandas e pode ser sensível à sazonalidade e ao ruído espectral.

No que diz respeito ao transnacional bioma amazônico, estudos recentes buscam propor e aprimorar métodos de alerta de garimpo. O estudo de Becerra et al. (2024) apresenta um sistema de alertas quase em tempo real para detectar desmatamento por mineração irregular na Amazônia peruana usando dados SAR do Sentinel-1. Neste estudo foram detectados 185.460 alertas de pixel entre fevereiro e dezembro de 2022, totalizando 1.864 ha de mineração, com acurácia de 99,98%. Por fim, os autores concluíram que a plataforma RAMI é eficaz para monitoramento contínuo, mesmo sob nuvens, apoiando ações rápidas de fiscalização. Já em território brasileiro, Mataveli et al. (2022) associam a coleção 6 do projeto MapBiomias, que usa imagens de satélite Landsat classificadas pelo algoritmo Random Forest, com o teste de Mann-Kendall para detectar o crescimento do garimpo dentro de TIs. Os autores encontraram um aumento de cerca de 1200% entre 1985 e 2020 com tendência de crescimento. Por fim, o estudo destaca o desafio da fiscalização e a urgência de investimento em políticas públicas eficazes, apontando que TIs demarcadas estão vulneráveis. Tendo em vista este aumento do garimpo irregular nas TIs, especialmente nas TIs Kayapó, Mundurucu e Yanomami, Da Silva et al. (2023) apontaram as áreas de alto interesse em mineração, estradas e pistas de pouso clandestinas como os principais vetores associados garimpo.

Em termos de desafios e oportunidades na detecção remota e contínua do garimpo na Amazônia Legal, é fundamental dispor de uma base de dados robusta. Especificamente, uma base de alertas de garimpo com série temporal extensa, validação sistemática e múltiplas fontes de informação é crucial para o desenvolvimento de métricas confiáveis e operacionais, como um índice de crescimento do garimpo. A integração de alertas gerados por diferentes métodos de classificação de imagens com inspeções visuais realizadas por analistas permite maior consistência nos registros e maior controle sobre a qualidade dos

dados. A diversidade de fontes reduz a dependência de um único método de detecção, minimizando vieses e aumentando a robustez das análises. Sem uma base de dados com essas características, indicadores derivados tendem a apresentar limitações em termos de precisão temporal, comparabilidade e aplicabilidade.

Devido às condições climáticas atmosféricas das florestas tropicais, sobretudo grande parte da AL, cresce as abordagens de sensoriamento remoto multissensores e particularmente a utilização de sensores ativos como radares. No estudo de Forkuor, Ullmann e Griesbeck (2020), dados de séries temporais obtidos pelo sensor Sentinel-1 foram empregados para o monitoramento de pequenas áreas de garimpo artesanal localizadas no Sudoeste de Gana. O conjunto de dados consistiu em 155 imagens, coletadas entre julho de 2015 e abril de 2019. Contudo, a análise foi parcialmente limitada pela presença de interferência atmosférica, resultando na exclusão de cenas com baixa qualidade. Embora dados de Radar de Abertura Sintética (SAR) apresentem vantagens para o monitoramento em regiões com alta cobertura de nuvens, os resultados de Forkuor, Ullmann e Griesbeck (2020) demonstraram uma sensibilidade da banda C do Sentinel-1 a eventos de nebulosidade intensa.

A nebulosidade na Amazônia varia conforme o clima das sub-regiões (Af, Am e Aw segundo Köppen), afetando diretamente a visibilidade para sensores ópticos. Regiões Af e Am, mais úmidas, apresentam maior cobertura de nuvens, enquanto áreas Aw, mais secas, oferecem melhores condições de observação, especialmente na estação seca. Nesse contexto, os resultados indicam que a eficácia dos sistemas ópticos de detecção, como os utilizados pelo DETER e pelo programa Brasil MAIS, é diretamente limitada pelas condições climáticas, especialmente pela alta nebulosidade associada às regiões classificadas como Af e Am, onde a detecção de alertas é mais lenta ou falha (Silva et al., 2020; Albuquerque et al., 2025). A performance dos alertas Brasil MAIS melhora nos meses secos (maio a setembro), quando há menor atividade convectiva, e piora entre novembro e março, período de chuvas intensas, quando a cobertura de nuvens reduz a quantidade de imagens úteis, mesmo com a alta frequência de revisita dos satélites Planet (Albuquerque et al., 2025). O sistema DETER apresenta limitações similares, enfrentando cobertura persistente de nuvens durante os meses chuvosos, coincidindo com aumento da atividade madeireira ilegal, que acaba não sendo detectada (Silva et al., 2020). Como alternativa, sensores com tecnologia SAR (Radar de Abertura Sintética) sofrem menor interferência atmosférica e conseguem operar em uma variedade maior de condição climática.

A ferramenta de identificação de frentes de garimpo representa um avanço estratégico para o monitoramento e enfrentamento da mineração irregular na Amazônia Legal. Ao integrar alertas geoespaciais e índices de crescimento, ela permite localizar, analisar e acompanhar com maior precisão as áreas ativas ou em expansão. Seus usos vão além da fiscalização, oferecendo suporte a ações táticas, planejamento interagência, estudos acadêmicos e formulação de políticas públicas. A identificação de frentes de garimpo permite direcionar a aquisição de imagens comerciais de altíssima resolução, otimizando recursos e evitando imageamento redundante. Regiões com alta velocidade de crescimento de atividades garimpeiras podem ser priorizadas para coberturas mais frequentes ou com sensores específicos, como radares SAR, ampliando a capacidade de detecção e resposta em tempo quase real. Outra aplicação da ferramenta é no planejamento e a logística de operações de fiscalização em campo. Com dados atualizados sobre as frentes de garimpo, órgãos como Ibama, ICMBio, Polícia Federal e Forças Armadas podem coordenar ações conjuntas de forma mais eficiente, reduzindo riscos e maximizando o impacto das intervenções. Os dados extraídos da ferramenta também servem como base para estudos sobre as dinâmicas espaciais e temporais do garimpo na Amazônia. É possível identificar padrões de expansão, relação com infraestrutura (estradas, rios, pistas clandestinas), ciclos de atividade e perfis territoriais específicos, contribuindo para análises socioambientais e regionais mais aprofundadas.

O Índice de Frente de Garimpo (IFG) apresenta como limitação central a sua dependência direta da qualidade e robustez do banco de dados utilizado. A confiabilidade dos resultados está condicionada tanto à confirmação e aprimoramento do próprio alerta, quanto à possíveis cruzamentos de dados, como no caso da categorização da legalidade do garimpo. Este último depende das informações disponibilizadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM), cuja cruzamento de dados já apresentou inconsistências e encontra-se em processo de aprimoramento, reforçando a necessidade de constante validação e atualização das fontes de referência.

Por fim, entre os próximos desafios estão o aprimoramento da ferramenta, calibrando a janela temporal e o raio de distância para melhor representar a dinâmica de crescimento do garimpo, assim como avaliar qual valor do Índice melhor representa as frentes de garimpo prioritárias para monitoramento. Em médio e longo prazos, o aprimoramento pode ocorrer com o uso de algoritmos preditivos e com a maior integração de dados socioeconômicos, climáticos e geológicos. Perguntas-chave incluem: Quais vetores estão impulsionando novas frentes? Qual a relação entre frentes ativas e territórios protegidos? Como prever áreas sob risco iminente de ocupação ilegal?

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Índice de Frente de Garimpo (IFG) apresentou-se como uma ferramenta eficiente e acessível para o monitoramento espacial e temporal da atividade garimpeira irregular na Amazônia Legal. Ao combinar densidade e permanência de alertas, o índice permite identificar frentes de atuação contínua, mesmo em cenários com baixa frequência de alertas, o que o torna especialmente valioso para ações estratégicas de fiscalização. Os estudos de caso nas Terras Indígenas Kayapó e Yanomami demonstraram a sensibilidade do método em detectar tanto a persistência quanto a retração das atividades ilegais em resposta a políticas de controle. Além disso, a ferramenta pode apoiar decisões interinstitucionais, otimizar o uso de imagens comerciais e subsidiar a alocação de recursos. Embora, o IFG seja limitado pela dependência da qualidade dos bancos de dados, tanto na confirmação dos alertas quanto nos cruzamentos para categorização da legalidade, sua aplicação pode ser expandida para outras regiões da Amazônia, contribuindo para o fortalecimento da governança ambiental e da proteção dos territórios tradicionais frente à pressão crescente do garimpo ilegal.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, G. H. Q. et al. Análise temporal de alertas ambientais na Amazônia Legal: a importância de uma abordagem com multissensores. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 21., 2025, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Galoá, 2025. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2025/trabalhos/analise-temporal-de-alertas-ambientais-na-amazonia-legal-a-importancia-de-uma-abordagem-multissensores>. Acesso em: 6 maio 2025.
- BECERRA, M. et al. Creating near real-time alerts of illegal gold mining in the Peruvian Amazon using Synthetic Aperture Radar. **Environmental Research Communications**, v. 6, p. 125022, 2024. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ad937e>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ad937e>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- CORTINHAS FERREIRA NETO, L. et al. Uncontrolled illegal mining and garimpo in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54220-2>. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54220-2>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- DA SILVA, C. F. A. et al. The drivers of illegal mining on Indigenous Lands in the Brazilian Amazon. **The Extractive Industries and Society**, v. 16, e101354, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101354>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101354>. Acesso em: 4 abr. 2025.
- DUBREUIL, V. et al. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins: Revue franco-brésilienne de géographie**, n. 37, 2018.
- FORKUOR, G.; ULLMANN, T.; GRIESBECK, M. Mapping and monitoring small-scale mining activities in Ghana using Sentinel-1 time series (2015–2019). **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 911, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12060911>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12060911>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- HASLAM, P. A.; TANIMOUNE, N. A. The determinants of social conflict in the Latin American mining sector: new evidence with quantitative data. **World Development**, v. 78, p. 401-419, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X15002429>. Acessado em: 23 set. 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Brasil tem 1,7 milhão de indígenas e mais da metade deles vive na Amazônia Legal**. Censo 2022, 7 ago. 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/noticias-por-estado/37565-brasil-tem-1-7-milhao-de-indigenas-e-mais-da-metade-deles-vive-na-amazonia-legal>. Acesso em: 27 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapeamento de biomas do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2003.

KOZIŃSKA, P.; GÓRNIK-ZIMROZ, J. A review of methods in the field of detecting illegal open-pit mining activities. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 942, e012027, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/942/1/012027>. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/942/1/012027>. Acesso em: 28 maio 2025.

LIU, W. T. H. Aplicações de sensoriamento remoto. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2015.

LOBO, F. L. et al. Mapping mining areas in the Brazilian Amazon using MSI/Sentinel-2 imagery (2017). **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1178, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10081178>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10081178>. Acesso em: 28 maio 2025.

MACHADO, I. F.; FIGUEIRÔA, S. F. de M. 500 years of mining in Brazil: a brief review. **Resources Policy**, v. 27, n. 1, p. 9–24, 2001. DOI: 10.1016/S0301-4207(01)00004-6. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4207\(01\)00004-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4207(01)00004-6). Acesso em: 28 maio 2025.

MATAVELI, G. et al. Mining is a growing threat within Indigenous Lands of the Brazilian Amazon. **Remote Sensing**, v. 14, n. 16, e4092, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14164092>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14164092>. Acesso em: 28 maio 2025.

PNUD; IPEA; FJP. **O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Brasileiro: série Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013**. Brasília: PNUD, IPEA, FJP, 2013.

SIQUEIRA-GAY, J.; SÁNCHEZ, L. E. The outbreak of illegal gold mining in the Brazilian Amazon boosts deforestation. **Regional Environmental Change**, v. 21, art. 28, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01761-7>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01761-7>. Acesso em: 28 maio 2025.

SILVA, C. A. et al. Análise qualitativa do desmatamento na Floresta Amazônica a partir de sensores SAR, óptico e termal. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, p. 18–29, jan. 2020.