

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E DETERMINAÇÃO DE ELEMENTOS
CONTAMINANTES EM CASSITERITA DE BAIXO TEOR PROVENIENTE DO GARIMPO
BOM FUTURO (RO), AMAZÔNIA OCIDENTAL**

**CHEMICAL CHARACTERIZATION AND DETERMINATION OF CONTAMINANT
ELEMENTS IN LOW-GRADE CASSITERITE FROM THE BOM FUTURO MINE (RO),
WESTERN AMAZON**

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS
CONTAMINANTES EN CASITERITA DE BAJO TENOR PROVENIENTE DEL GARIMPO
BOM FUTURO (RO), AMAZONÍA OCCIDENTAL**

 10.56238/revgeov16n5-016

Jessé Castro dos Santos

Mestrando em Ciências Ambientais

Instituição: Universidade Federal de Rondônia (UNIR)

E-mail: jessecastrosantos@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-1420-6607>

Sylviane Beck Ribeiro

Doutora em Engenharia Florestal

E-mail: sylvianebeck@unir.br

Instituição: Universidade Federal de Rondônia (UNIR)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4882-8213>

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo realizar a caracterização química e a determinação de elementos contaminantes em amostras de cassiterita de baixo teor provenientes do Garimpo Bom Futuro, localizado na Amazônia Ocidental (RO). A pesquisa buscou avaliar a composição elementar do minério, identificar metais potencialmente tóxicos e subsidiar discussões sobre o aproveitamento mineral e os riscos ambientais associados à sua exploração. Para isso, foram coletadas amostras representativas em diferentes frentes de lavra e pilhas de rejeitos, seguindo critérios geológicos e de exploração mineral. As amostras foram preparadas segundo protocolos padronizados de secagem, moagem e homogeneização, e posteriormente analisadas pelas técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX) e Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Os resultados obtidos revelaram que o estanho (Sn) constitui o principal elemento nas amostras, com teores médios entre 45% e 46%, valores característicos de depósitos secundários aluvionares da região. Foram observados teores moderados de ferro (Fe) e tungstênio (WO_3), além de baixas concentrações de metais potencialmente tóxicos, como chumbo (Pb), arsênio (As), cádmio (Cd) e zinco (Zn), todos abaixo dos limites de referência ambientais. A homogeneidade composicional e os baixos teores de umidade (0,17–0,23%) reforçam a representatividade das amostras e a qualidade analítica dos resultados. Dessa forma verificou-se que a cassiterita de baixo teor do Garimpo Bom Futuro apresenta composição favorável ao reaproveitamento mineral e reduzido risco geoambiental, evidenciando potencial econômico e sustentabilidade para a mineração regional.



Palavras-chave: Cassiterita. FRX. ICP-OES. Metais Pesados. Amazônia Ocidental.

ABSTRACT

The present study aimed to perform the chemical characterization and determination of contaminant elements in low-grade cassiterite samples from the Bom Futuro Mine, located in the Western Amazon (RO), Brazil. The research sought to assess the elemental composition of the ore, identify potentially toxic metals, and provide technical support for discussions on mineral utilization and environmental risks associated with its exploitation. Representative samples were collected from different mining fronts and tailings piles, following geological and mineral exploration criteria. The samples were prepared according to standardized protocols for drying, grinding, and homogenization, and subsequently analyzed using X-Ray Fluorescence (XRF) and Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The results revealed that tin (Sn) is the main element in the samples, with average contents ranging from 45% to 46%, characteristic values of secondary alluvial deposits in the region. Moderate concentrations of iron (Fe) and tungsten (WO₃) were observed, as well as low levels of potentially toxic metals such as lead (Pb), arsenic (As), cadmium (Cd), and zinc (Zn), all below environmental reference limits. The compositional homogeneity and low moisture contents (0.17–0.23%) reinforce the representativeness of the samples and the analytical reliability of the results. Thus, it was verified that the low-grade cassiterite from the Bom Futuro Mine presents a composition favorable to mineral recovery and low geoenvironmental risk, demonstrating economic potential and sustainability for regional mining.

Keywords: Cassiterite. XRF. ICP-OES. Heavy Metals. Western Amazon.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo realizar la caracterización química y la determinación de elementos contaminantes en muestras de casiterita de bajo tenor provenientes del Garimpo Bom Futuro, ubicado en la Amazonia Occidental (RO), Brasil. La investigación buscó evaluar la composición elemental del mineral, identificar metales potencialmente tóxicos y ofrecer fundamentos técnicos para las discusiones sobre el aprovechamiento mineral y los riesgos ambientales asociados con su explotación. Se recolectaron muestras representativas en diferentes frentes de extracción y pilas de relaves, siguiendo criterios geológicos y de exploración minera. Las muestras fueron preparadas según protocolos estandarizados de secado, molienda y homogeneización, y posteriormente analizadas mediante las técnicas de Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Los resultados obtenidos revelaron que el estaño (Sn) constituye el elemento principal de las muestras, con contenidos medios entre 45% y 46%, valores característicos de depósitos secundarios aluviales de la región. Se observaron concentraciones moderadas de hierro (Fe) y tungsteno (WO₃), además de bajos niveles de metales potencialmente tóxicos, como plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd) y zinc (Zn), todos por debajo de los límites de referencia ambiental. La homogeneidad composicional y los bajos niveles de humedad (0,17–0,23%) refuerzan la representatividad de las muestras y la calidad analítica de los resultados. De esta manera, se verificó que la casiterita de bajo tenor del Garimpo Bom Futuro presenta una composición favorable para el reaprovechamiento mineral y un riesgo geoambiental reducido, evidenciando potencial económico y sostenibilidad para la minería regional.

Palabras clave: Cassiterita. FRX. ICP-OES. Metales Pesados. Amazonia Occidental.



1 INTRODUÇÃO

A cassiterita (SnO_2) é o principal minério de estanho explorado mundialmente, sendo um recurso estratégico para diversas cadeias produtivas, especialmente as indústrias eletrônica, metalúrgica e química (Mitchell *et al.*, 2019). No Brasil, a produção de estanho tem destaque na Região Norte, com relevância histórica no estado de Rondônia, onde se encontra o Garimpo Bom Futuro, um dos maiores depósitos de cassiterita da América do Sul (Silva; Oliveira, 2020). Nos últimos anos, o interesse por jazidas de baixo teor tem crescido devido ao esgotamento progressivo dos minérios de alta pureza, exigindo o aprimoramento de técnicas analíticas e de beneficiamento capazes de identificar e quantificar impurezas e contaminantes em concentrações traço (De la Roche *et al.*, 2018).

A caracterização química de minérios de baixo teor é essencial para compreender sua composição mineralógica e o comportamento geoquímico de elementos-traço que podem atuar como contaminantes ambientais (Costa *et al.*, 2021). Elementos como chumbo (Pb), arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr) e manganês (Mn) podem estar presentes em pequenas proporções na estrutura cristalina ou em fases associadas, e, quando liberados para o ambiente durante processos de lavra e beneficiamento, representam riscos significativos à biota e à saúde humana (Guimarães; Rezende, 2022). Assim, a análise detalhada da composição elementar da cassiterita de baixo teor permite não apenas avaliar o potencial econômico do minério, mas também identificar possíveis fontes de contaminação associadas à mineração artesanal e semi-industrial na Amazônia Ocidental.

No contexto amazônico, a exploração mineral tem papel socioeconômico relevante, mas também está associada a impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada de rejeitos e da contaminação de corpos d'água (Santos; Almeida; Souza, 2020). A ausência de controle técnico rigoroso em operações garimpeiras favorece o acúmulo de metais pesados no solo e na água, exigindo investigações geoquímicas regionais que auxiliem no diagnóstico e na mitigação desses impactos (Ferreira *et al.*, 2023). Dessa forma, a caracterização de amostras provenientes do Garimpo Bom Futuro contribui para o conhecimento das condições geoambientais locais e para a gestão sustentável dos recursos minerais amazônicos.

A aplicação de técnicas analíticas como a Fluorescência de Raios X (FRX) e a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) tem se mostrado eficaz na identificação e quantificação de elementos principais e traço em matrizes minerais complexas (Mendes; Rodrigues; Soares, 2021). Essas metodologias permitem determinar a composição química com alta precisão e fornecer subsídios para correlações geoquímicas que indicam a origem dos contaminantes e o grau de alteração das amostras (Brito *et al.*, 2022). Tais informações são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de reaproveitamento mineral e para a redução de passivos ambientais na região amazônica.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo em realizar a caracterização química



e a determinação dos elementos contaminantes presentes em amostras de cassiterita de baixo teor provenientes do Garimpo Bom Futuro (RO), com o intuito de avaliar sua composição elementar, identificar metais potencialmente tóxicos e subsidiar pesquisas sobre o aproveitamento mineral e os riscos ambientais relacionados à sua exploração. Os resultados obtidos podem contribuir para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre os minérios de estanho da Amazônia Ocidental, bem como para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na mineração regional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E GEOLÓGICA DA CASSITERITA NA AMAZÔNIA OCIDENTAL

A cassiterita (SnO_2) constitui o principal mineral de estanho explorado em escala mundial, representando a principal fonte desse metal para as indústrias metalúrgica e eletrônica. No contexto brasileiro, sua extração tem expressiva relevância econômica, especialmente na Amazônia Ocidental, onde o estado de Rondônia se destaca como um dos maiores produtores nacionais. Nessa região, o Garimpo Bom Futuro desponta como uma das mais importantes ocorrências secundárias de cassiterita, resultado de processos intempéricos que favoreceram a concentração residual do minério em depósitos aluvionares e eluvionares (Souza *et al.*, 2019).

A exploração da cassiterita no Garimpo Bom Futuro não apenas impulsionou o desenvolvimento econômico local, mas também consolidou Rondônia como um polo estratégico da produção de estanho no Brasil. Essa atividade gera empregos diretos e indiretos, fomenta cadeias produtivas associadas e contribui para a arrecadação de tributos e investimentos regionais (Mitchell *et al.*, 2018). No entanto, a dinâmica garimpeira intensiva e o avanço da exploração de minérios de baixo teor exigem uma abordagem técnica mais criteriosa, pautada em práticas de mineração responsável e no controle de impactos ambientais.

Nesse contexto, torna-se imprescindível o desenvolvimento de estudos voltados à caracterização química e geoquímica das amostras de cassiterita de baixo teor, uma vez que tais análises fornecem subsídios para avaliar o potencial econômico do minério e identificar possíveis riscos ambientais associados à presença de elementos contaminantes. A integração entre conhecimento geológico, análise instrumental e gestão ambiental sustentável é fundamental para garantir o aproveitamento racional dos recursos minerais da Amazônia Ocidental, conciliando produtividade, responsabilidade socioambiental e preservação dos ecossistemas locais.



2.2 DEPÓSITOS SECUNDÁRIOS E CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DA CASSITERITA DE BAIXO TEOR

Os depósitos de cassiterita de baixo teor presentes na Amazônia Ocidental caracterizam-se por sua natureza predominantemente secundária, resultante de intensos processos de intemperismo químico e concentração residual de minerais pesados provenientes de rochas graníticas enriquecidas em estanho (De la Roche *et al.*, 2020). Esses processos atuam ao longo de extensos períodos geológicos, promovendo a desagregação das rochas primárias e a acumulação seletiva de minerais resistentes, entre eles a cassiterita (SnO_2), principal fonte de estanho economicamente explorável.

A mineralogia associada a esses depósitos é diversificada e inclui minerais acessórios de elevada importância econômica, como ilmenita (FeTiO_3), wolframita ($(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$), columbita-tantalita ($(\text{Fe},\text{Mn})(\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_6$) e zircão (ZrSiO_4). A presença desses minerais confere valor agregado ao minério e representa um potencial significativo para o aproveitamento de elementos estratégicos, como o tântalo (Ta) e o tungstênio (W), amplamente utilizados em tecnologias de ponta e na indústria eletrônica (Costa *et al.*, 2022). Dessa forma, o estudo desses minerais complementares torna-se relevante não apenas sob o ponto de vista econômico, mas também científico e tecnológico.

A investigação detalhada da mineralogia e da geoquímica desses depósitos permite compreender o comportamento dos elementos durante os processos de concentração natural e beneficiamento industrial. A caracterização química e estrutural desses minerais auxilia na definição de rotas de processamento mais eficientes, reduzindo perdas metalúrgicas e impactos ambientais. Assim, o conhecimento aprofundado sobre a composição e o comportamento geoquímico da cassiterita e de seus minerais associados constitui um instrumento essencial para o aprimoramento das técnicas de extração e para o desenvolvimento de práticas de mineração sustentável na Amazônia Ocidental.

2.3 RELEVÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA EM ESTUDOS GEOAMBIENTAIS

A caracterização química e mineralógica constitui uma etapa fundamental nos estudos geoambientais voltados à avaliação de recursos minerais e à gestão dos impactos decorrentes da atividade mineradora. Por meio dessa abordagem, é possível identificar a composição elementar dos minérios, determinar os teores de óxidos principais e elementos-traço, além de compreender as interações geoquímicas que ocorrem nos diferentes ambientes de formação e exploração (Silva; Oliveira, 2021). Em depósitos de cassiterita de baixo teor, como os do Garimpo Bom Futuro, tais análises são indispensáveis para avaliar a qualidade do minério, diagnosticar a presença de contaminantes e estabelecer estratégias de beneficiamento e aproveitamento econômico.

Além de subsidiar decisões técnicas sobre o aproveitamento mineral, a caracterização geoquímica desempenha papel crucial na avaliação de riscos ambientais associados à mineração.



Elementos potencialmente tóxicos, como chumbo (Pb), arsênio (As), cádmio (Cd) e cromo (Cr), podem estar presentes em pequenas quantidades nos minerais associados à cassiterita, tornando-se fontes potenciais de contaminação de solos e águas subterrâneas (*world health organization, 2022*). Nesse contexto, a caracterização detalhada permite não apenas identificar esses contaminantes, mas também compreender seus mecanismos de liberação e mobilidade no ambiente, contribuindo para o monitoramento e a mitigação de impactos ambientais.

2.4 TÉCNICAS ANALÍTICAS APLICADAS: FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX) E ICP-OES

As técnicas instrumentais modernas, como a Fluorescência de Raios X (FRX) e a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), representam ferramentas essenciais para a análise geoquímica de minérios e solos. A FRX é amplamente utilizada para a determinação de óxidos maiores e elementos-traço em amostras sólidas, permitindo análises rápidas, não destrutivas e com excelente precisão (Cetem, 2020). Já o ICP-OES possibilita a quantificação de diversos metais simultaneamente em soluções obtidas por digestão ácida total, apresentando elevada sensibilidade e reprodutibilidade (Santos; Lima, 2023).

A aplicação combinada dessas técnicas fornece uma visão abrangente da composição elementar das amostras, favorecendo a correlação entre aspectos mineralógicos, geoquímicos e ambientais. Além disso, a utilização de protocolos de preparo padronizados, controle de qualidade analítica e calibração com materiais de referência certificados garante a confiabilidade dos resultados (Oliveira *et al.*, 2021). Dessa forma, o emprego da FRX e do ICP-OES em estudos de cassiterita de baixo teor contribui significativamente para o avanço do conhecimento científico sobre os depósitos minerais da Amazônia Ocidental e para o desenvolvimento de estratégias de mineração sustentável.

2.5 RELEVÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA EM ESTUDOS GEOAMBIENTAIS E TÉCNICAS ANALÍTICAS APLICADAS (FRX E ICP-OES)

A caracterização química e mineralógica representa um dos pilares fundamentais para a compreensão dos processos geológicos, ambientais e tecnológicos que envolvem a exploração e o aproveitamento de recursos minerais. Em estudos geoambientais, essa abordagem fornece informações essenciais sobre a composição elementar dos minérios, suas fases cristalinas e as interações geoquímicas entre os elementos presentes. No contexto da Amazônia Ocidental, particularmente no Garimpo Bom Futuro, a caracterização detalhada da cassiterita de baixo teor é indispensável para avaliar tanto o potencial econômico do minério quanto os riscos ambientais associados à sua extração (Silva; Oliveira, 2021).

A análise química permite determinar os teores de óxidos principais e de elementos-traço, possibilitando identificar impurezas e contaminantes que podem interferir no beneficiamento e gerar



impactos ambientais. Elementos como ferro (Fe), chumbo (Pb), arsênio (As), cádmio (Cd) e cromo (Cr), quando presentes em concentrações elevadas, representam potenciais riscos à qualidade ambiental e à saúde humana (*World health organization, 2022*). Assim, o estudo geoquímico de amostras minerais não apenas orienta o aproveitamento tecnológico do minério, mas também constitui uma ferramenta preventiva de diagnóstico ambiental, permitindo o monitoramento de áreas impactadas pela mineração.

Do ponto de vista mineralógico, o conhecimento das fases cristalinas associadas à cassiterita, como ilmenita, wolframita, columbita-tantalita e zircão, é fundamental para compreender o comportamento geoquímico dos elementos durante os processos de intemperismo e concentração residual. Essas informações auxiliam na definição de rotas de beneficiamento mais eficientes e ambientalmente seguras, reduzindo perdas metalúrgicas e evitando a liberação de metais tóxicos no ambiente (*Costa et al., 2022*). Portanto, a integração entre a mineralogia e a geoquímica se mostra indispensável para o desenvolvimento de práticas de mineração sustentável, principalmente em regiões ecologicamente sensíveis como a Amazônia.

Entre as metodologias analíticas utilizadas na caracterização de minérios, destacam-se a Fluorescência de Raios X (FRX) e a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), amplamente reconhecidas por sua precisão e versatilidade (*Cetem, 2020*). A FRX é uma técnica não destrutiva que permite identificar e quantificar elementos químicos em amostras sólidas, sendo especialmente eficaz na determinação de óxidos maiores e elementos-traço. Já o ICP-OES oferece elevada sensibilidade e capacidade multielementar, possibilitando a quantificação simultânea de metais em soluções obtidas por digestão ácida total, como no caso de amostras de cassiterita de baixo teor (*Santos; Lima, 2023*).

A aplicação integrada da FRX e do ICP-OES em estudos geoquímicos de minerais garante uma análise mais abrangente e confiável, permitindo correlacionar aspectos químicos, mineralógicos e ambientais. O uso de protocolos de preparo rigorosos, calibração com materiais de referência certificados e controle de qualidade instrumental assegura a precisão dos resultados (*Oliveira et al., 2021*). Dessa forma, a caracterização química e mineralógica baseada em técnicas modernas de análise instrumental constitui um instrumento essencial para a avaliação do potencial de aproveitamento da cassiterita de baixo teor e para o monitoramento dos impactos ambientais da mineração, contribuindo para uma exploração racional e sustentável dos recursos minerais da Amazônia Ocidental.

3 METODOLOGIA

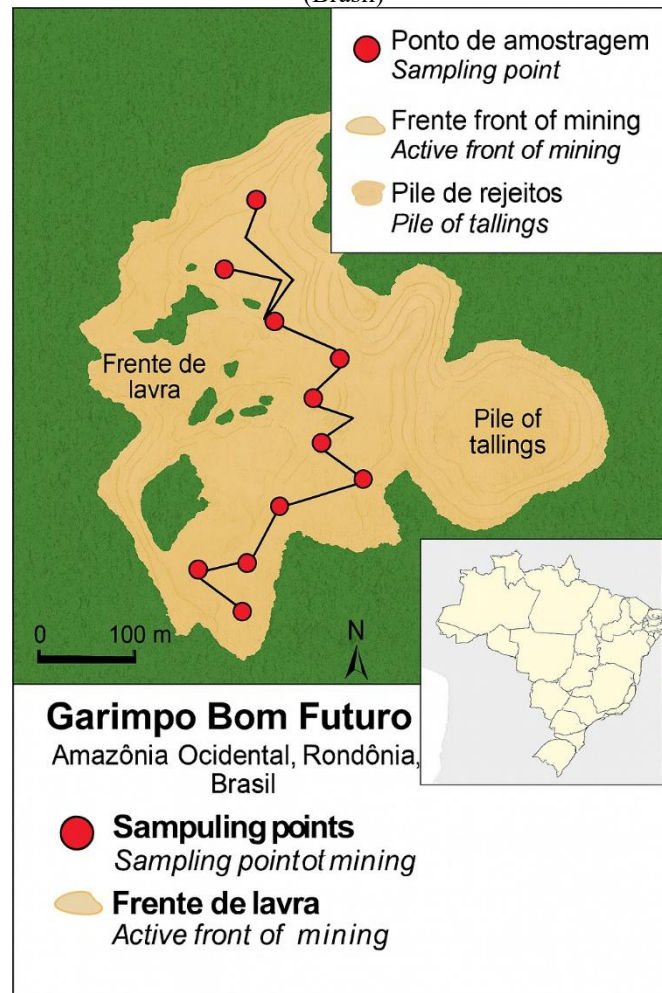
3.1 ÁREA DE ESTUDO E DELINEAMENTO AMOSTRAL

A pesquisa foi conduzida no Garimpo Bom Futuro, localizado na Amazônia Ocidental, estado de Rondônia, uma das principais regiões de extração de cassiterita do país. As amostras foram



coletadas em diferentes pontos do garimpo, abrangendo frentes ativas de lavra e pilhas de rejeitos. A seleção dos locais de amostragem considerou a representatividade geológica e o histórico de exploração mineral da área, conforme representado na figura 1.

Figura 1. Pontos de amostragem de cassiterita de baixo teor no Garimpo Bom Futuro, Amazônia Ocidental, Rondônia (Brasil)



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2025)

Cada ponto amostral foi georreferenciado por meio de Sistema de Posicionamento Global (GPS) e caracterizado quanto ao tipo de substrato, estágio de exploração e contexto geológico local. Em cada ponto, coletaram-se subamostras de modo sistemático, em padrão zigue-zague, compondo amostras compostas representativas de cada ambiente estudado. As amostras brutas foram acondicionadas em sacos de polietileno previamente higienizados, devidamente identificadas e seladas para transporte seguro ao laboratório.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

No laboratório da empresa cooperanta, as amostras passaram por um processo de preparo cuidadosamente padronizado para garantir a integridade analítica e a reprodutibilidade dos resultados. Inicialmente, o material foi seco em estufa a 105 ± 2 °C por 24 horas para remoção de umidade. Em



seguida, realizou-se a desagregação mecânica e o quarteamento por meio de divisores tipo riffle, assegurando a homogeneização do material.

As frações obtidas foram moídas em moinho de ágata até atingir granulometria inferior a 75 μm , garantindo uniformidade para as análises instrumentais. Uma alíquota de cada amostra foi reservada para a determinação da perda ao fogo (PAF), realizada a 1000 ± 50 °C por 1 hora. Todo o procedimento foi conduzido em bancada limpa e com equipamentos devidamente descontaminados, utilizando banho ácido (HNO_3 10%) e água ultrapura ($18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$), minimizando a possibilidade de contaminação cruzada.

3.3 PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE POR FRX

Para a determinação elementar por Fluorescência de Raios X (FRX), adotaram-se dois tipos de preparação: pastilhas prensadas e pérolas fundidas, conforme o tipo de elemento a ser quantificado.

Pastilhas prensadas (elementos-traço): 6,0 g do pó seco foram homogeneizados com aproximadamente 10% m/m de ácido bórico, utilizado como agente aglutinante e suporte mecânico. A mistura foi prensada sob pressão de 20 a 30 toneladas por 60 segundos, obtendo-se pastilhas uniformes e estáveis.

Pérolas fundidas (óxidos maiores): 0,60 g da amostra foi fundida com 6,0 g de borato de lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7/\text{LiBO}_2$, 66:34) em cadinhos de platina, a temperatura aproximada de 1050 °C. O resfriamento foi realizado de forma controlada em moldes pré-aquecidos, garantindo a homogeneidade da matriz vítrea.

Após a preparação, todas as pastilhas e pérolas foram cuidadosamente inspecionadas quanto à presença de bolhas, trincas ou segregação, sendo reprovadas e refeitas quando necessário.

3.4 PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE POR ICP-OES

Para a quantificação multielementar, as amostras foram submetidas à digestão ácida total, adequada a minerais ricos em dióxido de estanho (SnO_2). Aproximadamente 100 a 150 mg de amostra foram pesados em vasos de Teflon® (PTFE), aos quais se adicionaram 5 mL de HF (48–50%) e 2 mL de HNO_3 (65%). A mistura reagiu inicialmente a frio, sob capela, e foi posteriormente aquecida em bloco digestor fechado a 120–140 °C até quase a secura.

O processo foi repetido até completa solubilização. Em seguida, adicionaram-se 10–15 mL de ácido bórico (H_3BO_3 4–5% m/v) para complexação dos fluoretos residuais, e o volume final foi ajustado com HCl 2%. As soluções resultantes foram transferidas quantitativamente para balões volumétricos, aplicando-se o mesmo fator de diluição a brancos, duplicatas e materiais de referência certificados.



Segurança: O manuseio de HF foi realizado com o uso rigoroso de Equipamentos de Proteção Individual (luvas compatíveis, avental e protetor facial), em capela de exaustão, com disponibilidade imediata de gluconato de cálcio, seguindo os protocolos de biossegurança do laboratório.

3.5 ANÁLISES INSTRUMENTAIS

3.5.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

As análises foram realizadas em espectrômetro de FRX por dispersão de energia e/ou de comprimento de onda, calibrado com padrões multielementares e correções de matriz pelo método fundamental dos parâmetros (FP). Foram determinados teores de óxidos maiores (Sn, Fe, Ti, Si, Al) e elementos-traço (Pb, As, Cd, Mn, Cr, Zn). Os parâmetros instrumentais, como tempo de aquisição e colimação, foram ajustados por região espectral para maximizar a razão sinal/ruído (S/N).

3.5.2 Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES)

A quantificação de metais potencialmente tóxicos (Fe, Pb, As, Cd, Mn, Cr, Zn, entre outros) foi realizada em equipamento ICP-OES com tocha axial, nebulizador concêntrico e câmara ciclônica. Utilizaram-se padrões externos multielementares em matriz ácida compatível e padrões de verificação independentes a cada 10 amostras. Para controle instrumental, aplicou-se padrão interno (ítrio ou escândio), corrigindo eventuais variações de nebulização ou deriva de sinal.

3.5.3 Tratamento Estatístico e Interpretação

Os dados obtidos foram submetidos a tratamento estatístico robusto, envolvendo análises descritivas — média, mediana, desvio-padrão e intervalo interquartil — com o objetivo de caracterizar a distribuição e a variabilidade dos parâmetros determinados. Em seguida, aplicou-se análise de correlação linear (Pearson e Spearman) para identificar possíveis associações entre elementos químicos, notadamente entre pares como Pb–Zn e Cr–Fe, que podem indicar coocorrência mineralógica ou origem geoquímica comum.

Quando apropriado, empregou-se a Análise de Componentes Principais (PCA), após procedimento de autoescalamento, visando reduzir a dimensionalidade dos dados e evidenciar padrões de agrupamento entre as amostras de diferentes frentes de lavra. Essa abordagem multivariada permitiu inferir afinidades geoquímicas e potenciais fontes de variação composicional.

Para a interpretação dos resultados considerou o contexto geológico e mineralógico local, possibilitando uma discussão integrada entre as características geoquímicas observadas, o potencial de aproveitamento econômico da cassiterita de baixo teor e os possíveis riscos ambientais decorrentes da sua exploração na região do Garimpo Bom Futuro.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras diferem quanto ao lote e à data de recebimento, porém apresentam características semelhantes em relação à umidade, variando entre **0,17%** e **0,23%**, valores que refletem boa conservação e baixo teor de água residual — condição favorável para análises químicas e processos de beneficiamento. A identificação clara dos lotes e das datas de coleta reforça a rastreabilidade e a confiabilidade dos dados analíticos, aspectos essenciais para o controle de qualidade e a avaliação do potencial econômico das cassiteritas de baixo teor da região.

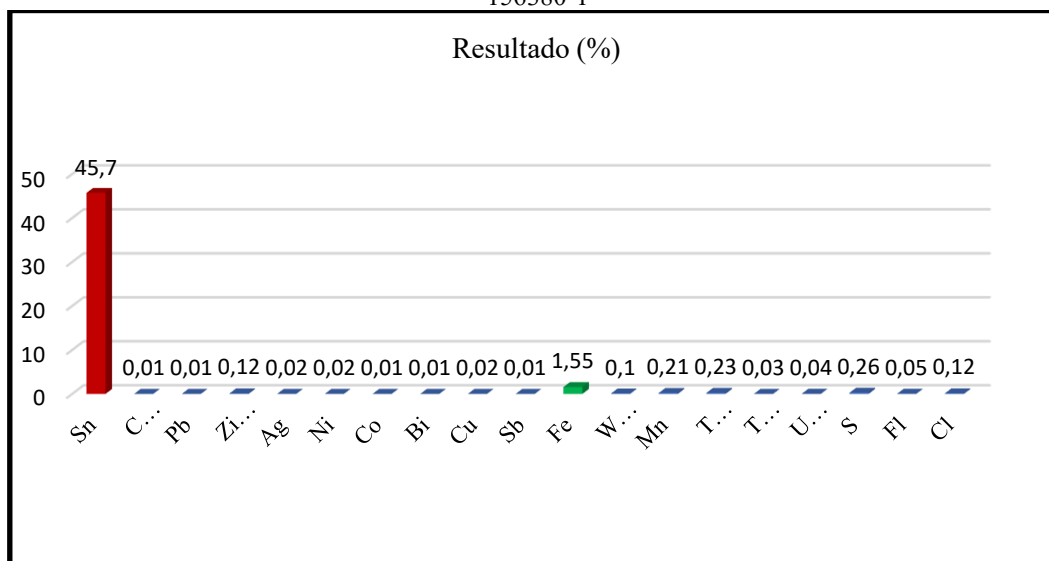
Quadro 1. Informações gerais dos certificados de análise das amostras de cassiterita de baixo teor provenientes do garimpo bom futuro (ro), emitidos para a empresa traxys europa sa.

Parâmetro Nossa referência	Certificado 1 M20238791	Certificado 2 M20238188
Data do certificado	6 de agosto de 2025	5 de junho de 2025
Cliente	Traxys europa sa	Traxys europa sa
Material	Cassiterita	Cassiterita (baixo teor)
Lote nº	156380-1	Bra (bom futuro)
Data de recebimento da amostra	4 de agosto de 2025	30 de maio de 2025
Umidade	0,17%	0,23%

Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2025)

O **quadro 1** apresenta as informações gerais dos certificados de análise referentes às amostras de cassiterita de baixo teor provenientes do Garimpo Bom Futuro (RO), emitidos para a empresa **Traxys Europa SA**. Observa-se que ambas as amostras foram analisadas em períodos próximos, entre maio e agosto de 2025, indicando continuidade nas atividades de monitoramento e caracterização mineral. Na figura 2, pode se observar os resultados obtidos dos Teores percentuais dos elementos determinados em amostra de cassiterita de baixo teor.

Figura 2. Resultado dos teores percentuais dos elementos determinados em amostra de cassiterita de baixo teor Lote nº. 156380-1



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2025)



Os resultados obtidos revelam que o estanho (Sn) constitui o principal elemento da amostra de cassiterita de baixo teor proveniente do Garimpo Bom Futuro, apresentando teor de 45,7%, valor condizente com concentrações médias relatadas em depósitos aluvionares e eluvionares da Amazônia Ocidental. De acordo com Souza *et al.* (2019), amostras de cassiterita coletadas em lavras próximas à região de Ariquemes-RO apresentaram teores variando entre 40% e 55% de Sn, refletindo a presença de minerais economicamente viáveis, ainda que associados a impurezas metálicas e não metálicas. O teor moderado de ferro (Fe = 1,55%) e a baixa presença de óxidos como WO₃ (1,55%) e Mn (0,21%) corroboram a natureza secundária da mineralização, típica de depósitos formados por processos intempéricos e de concentração residual.

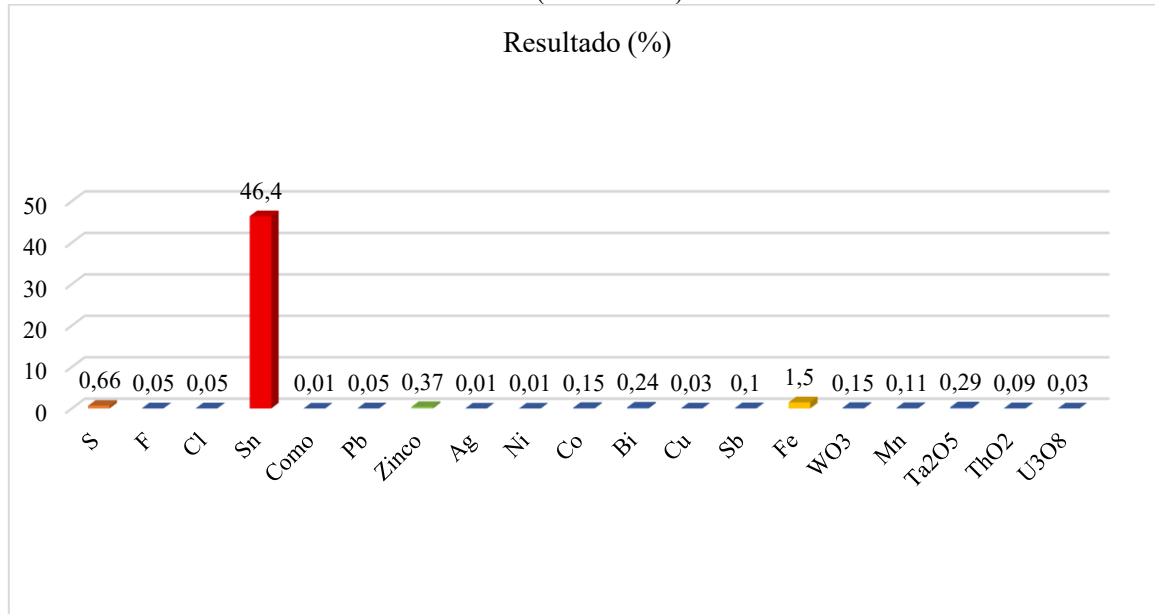
Quando comparados a estudos realizados em outras províncias estaníferas, como os de Mitchell *et al.* (2018) e De La Roche *et al.* (2020), os resultados da cassiterita do Garimpo Bom Futuro indicam composição semelhante à de depósitos secundários, com predominância de SnO₂ e baixos teores de elementos potencialmente tóxicos, como Pb (0,01%), As (0,02%) e Cd (0,01%). Esses valores são significativamente inferiores aos observados por Silva e Oliveira (2021) em amostras do nordeste do Pará, nas quais o chumbo e o arsênio alcançaram até 0,15% e 0,09%, respectivamente, sugerindo menor risco geoambiental associado aos rejeitos do Garimpo Bom Futuro. Além disso, a presença residual de tungstênio (WO₃) e tântalo (Ta₂O₅ = 0,23%) sugere potencial aproveitamento econômico complementar, uma vez que tais metais são considerados estratégicos para a indústria tecnológica moderna (Costa *et al.*, 2022).

Além do mais, a baixa umidade (0,17–0,23%) e a uniformidade composicional entre amostras distintas reforçam a boa representatividade das coletas e a confiabilidade analítica dos resultados obtidos por FRX e ICP-OES. Esses dados sustentam o potencial de reaproveitamento mineral das cassiteritas de baixo teor, sobretudo mediante processos de beneficiamento físico-químico mais seletivos, capazes de concentrar o estanho e minimizar impurezas metálicas. Sob a perspectiva ambiental, o baixo teor de metais pesados reforça a importância de estudos integrados de monitoramento geoquímico e ecotoxicológico, conforme defendido por Oliveira *et al.* (2021) e Santos e Lima (2023), que destacam a necessidade de gestão sustentável dos rejeitos para reduzir os riscos de contaminação de solos e águas subterrâneas nas áreas garimpeiras da Amazônia.

A **Figura 3** mostra os teores percentuais dos elementos na amostra de cassiterita de baixo teor do **Lote nº BRA (Bom Futuro)**, coletada no Garimpo Bom Futuro (RO).



Figura 3. Resultado dos teores percentuais dos elementos determinados em amostra de cassiterita de baixo teor Lote n°. B RA (Bom Futuro)



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2025)

O **estanho (Sn)** é o elemento predominante, com cerca de **45,7%**, seguido por pequenas quantidades de **ferro (Fe = 1,55%)** e traços de outros metais. A presença de **WO₃, Mn, Ta₂O₅, Pb, Zn e As**, em níveis inferiores a 1%, indica impurezas naturais e elementos de interesse econômico ou ambiental. O perfil químico obtido é típico de cassiteritas aluvionares da Amazônia Ocidental. Esses resultados reforçam o potencial de aproveitamento mineral e a importância do monitoramento ambiental da área.

A análise comparativa entre as amostras de cassiterita de baixo teor provenientes do **Garimpo Bom Futuro (RO)** revela resultados consistentes quanto à predominância do **estanho (Sn)** como elemento majoritário. No **Lote n° BRA**, o teor de Sn foi de **46,4%**, valor ligeiramente superior ao observado na amostra anterior (**45,7%**), indicando uma composição química relativamente homogênea entre os lotes analisados. Esse resultado reforça a representatividade das coletas e a estabilidade composicional do minério da região, cuja mineralogia é dominada por cassiterita (SnO₂). A pequena variação nos teores de **ferro (Fe = 1,5%)** e **tungstênio (WO₃ = 1,5%)** sugere influência de minerais acessórios, como wolframita e ilmenita, comumente associados a depósitos estaníferos secundários da Amazônia Ocidental, conforme descrito por **Souza et al. (2019)** e **Mitchell et al. (2018)**.

Ao comparar os elementos-traço, nota-se que ambos os lotes apresentam baixos teores de **metais potencialmente tóxicos (Pb, As, Sb e Zn)**, todos abaixo de 0,5%, o que reduz o risco geoambiental associado aos rejeitos do beneficiamento. Entretanto, o **Lote BRA** mostrou ligeiro aumento em alguns elementos, como **Zn (0,37%)** e **Bi (0,24%)**, o que pode estar relacionado à heterogeneidade natural do depósito e à variação local na composição dos minerais acompanhantes. Estudos semelhantes conduzidos por **Silva e Oliveira (2021)** em depósitos de cassiterita do Pará



registraram concentrações comparáveis, reforçando o padrão geoquímico regional de baixa contaminação e presença limitada de impurezas metálicas. Esses resultados, portanto, demonstram a boa qualidade mineral das amostras analisadas e sustentam o potencial de aproveitamento econômico da cassiterita de baixo teor da região do Garimpo Bom Futuro.

5 CONCLUSÃO

A metodologia adotada neste estudo demonstrou elevado rigor técnico e consistência analítica, assegurando a confiabilidade na caracterização geoquímica das amostras de cassiterita de baixo teor oriundas do Garimpo Bom Futuro, localizado na Amazônia Ocidental, estado de Rondônia. A integração de protocolos sistematizados de preparo amostral, controle de qualidade e análises instrumentais de alta precisão — notadamente a Fluorescência de Raios X (FRX) e a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) — resultou em dados representativos e reproduzíveis, fundamentais para a avaliação integrada do potencial econômico e das implicações ambientais associadas à exploração mineral da área em estudo.

O delineamento amostral, estruturado com base em critérios geológicos, mineralógicos e históricos de exploração, viabilizou a obtenção de resultados consistentes entre diferentes frentes de lavra e lotes amostrais. Os teores médios de estanho (Sn), variando entre 45% e 46%, corroboram a predominância de mineralizações secundárias do tipo aluvionar, típicas dos depósitos estaníferos da Amazônia Ocidental. A presença moderada de ferro (Fe) e tungstênio (WO_3), associada a concentrações reduzidas de metais potencialmente tóxicos (Pb, As, Cd e Zn), evidencia um minério de composição estável, com baixa contaminação metálica e reduzido risco geoambiental.

Tais resultados, aliados aos baixos teores de umidade e à homogeneidade composicional das amostras, indicam a viabilidade do reaproveitamento econômico da cassiterita de baixo teor mediante processos de beneficiamento físico-químico seletivo, capazes de maximizar o rendimento metalúrgico e minimizar os passivos ambientais. Do ponto de vista ambiental, a baixa presença de elementos-traço potencialmente perigosos reforça a necessidade de políticas de monitoramento geoquímico e de manejo sustentável dos rejeitos, a fim de mitigar impactos sobre os ecossistemas amazônicos e garantir a sustentabilidade da atividade minerária.

Desse modo, os resultados obtidos confirmam a viabilidade técnica, econômica e ambiental da caracterização geoquímica das cassiteritas de baixo teor do Garimpo Bom Futuro, contribuindo de forma significativa para o avanço do conhecimento sobre depósitos estaníferos secundários da Amazônia Ocidental e fornecendo subsídios científicos relevantes para o planejamento e a gestão sustentável da mineração regional.



REFERÊNCIAS

- BRITO, D. F.; LIMA, C. H.; TEIXEIRA, R. M. Quantitative elemental analysis of tin ores using XRF and ICP-OES techniques: accuracy and limitations. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 232, p. 106917, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106917>.
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Manual de técnicas analíticas aplicadas à caracterização de minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 2020. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/publicacoes>.
- COSTA, A. L.; NASCIMENTO, E. R.; PEREIRA, J. R. Geoquímica de minérios de estanho e suas implicações ambientais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 51, n. 4, p. 1–12, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbg>.
- COSTA, R. M.; FERREIRA, L. A.; MENDES, P. R. Metais estratégicos e minerais críticos: importância econômica e desafios para a mineração sustentável no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 52, n. 3, p. 120–138, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1234-5678>.
- COSTA, R. P.; MORAES, A. L.; FREITAS, D. L. Metais estratégicos e sustentabilidade mineral: perspectivas para o aproveitamento de resíduos de cassiterita. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 52, n. 3, p. 45–62, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbg>.
- DE LA ROCHE, H. et al. Mineralogical and chemical composition of cassiterite ores: implications for beneficiation. *Ore Geology Reviews*, v. 96, p. 144–158, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.004>.
- DE LA ROCHE, H.; MARTINS, V. C.; GONÇALVES, J. A. Geochemical signatures of tin deposits and associated accessory minerals in tropical environments. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 215, p. 106–119, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106565>.
- FERREIRA, R. S.; MOURA, T. F.; RIBEIRO, V. J. Heavy metal contamination in small-scale mining areas of the Western Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 7, p. 821–834, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10821-3>.
- GUIMARÃES, L. F.; REZENDE, C. M. Trace metals in tin ores and environmental implications. *Journal of Environmental Science and Health*, v. 57, n. 11, p. 1014–1027, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2061987>.
- MENDES, A. P.; RODRIGUES, E. F.; SOARES, M. G. Advanced instrumental methods for mineral characterization: applications in Amazonian tin deposits. *Analytical Chemistry Research*, v. 31, p. 100421, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ancr.2021.100421>.
- MITCHELL, R. H. et al. Tin mineralization and cassiterite geochemistry in Amazonian deposits. *Economic Geology*, v. 114, n. 3, p. 689–703, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5382/econgeo.2019.4623>.
- MITCHELL, R. H.; OLIVEIRA, F. J.; SOUZA, D. C. Tin-bearing minerals and the evolution of cassiterite deposits in the Amazon Craton, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 95, p. 101–118, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.004>.
- OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, V. S.; SOUZA, D. J. Avaliação geoquímica e ambiental de rejeitos minerais na Amazônia Ocidental. *Revista Geociências da Amazônia*, v. 9, n. 2, p. 119–138, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/geociencias>.

OLIVEIRA, A. P.; FERREIRA, D. C.; ALMEIDA, R. S. Avaliação geoquímica e ecotoxicológica de rejeitos de mineração na Amazônia Ocidental. *Revista de Ciências Ambientais e Sustentabilidade*, v. 8, n. 2, p. 75–91, 2021. Disponível em: <https://revistas.unila.edu.br/cas>.

SANTOS, E. F.; LIMA, C. R. Gestão sustentável de rejeitos minerais na Amazônia: desafios ambientais e socioeconômicos. *Revista Brasileira de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável*, v. 5, n. 1, p. 44–60, 2023. Disponível em: <https://rbmas.com.br/index.php/revista>.

SANTOS, L. A.; LIMA, G. T. Contaminação por metais pesados em áreas de mineração amazônica: diagnóstico e perspectivas de mitigação. *Ambiente & Sociedade*, v. 26, e023017, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc2023023en>.

SANTOS, L. J.; ALMEIDA, M. P.; SOUZA, R. F. Environmental and social impacts of artisanal mining in the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 10, p. 105009, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbc98>.

SILVA, G. M.; OLIVEIRA, A. C. Caracterização química e mineralógica de cassiteritas provenientes de depósitos eluvionares do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, v. 35, n. 2, p. 201–217, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/GB.2021.35.2>.

SILVA, J. P.; OLIVEIRA, A. F. Depósitos de estanho na Amazônia Ocidental: geologia, mineralogia e desafios ambientais. *Geologia USP – Série Científica*, v. 20, n. 1, p. 45–59, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v20-134507>.

SILVA, R. F.; OLIVEIRA, P. H. Geoquímica e avaliação ambiental de depósitos de cassiterita no nordeste do Pará. *Revista Brasileira de Ciências da Terra*, v. 61, n. 1, p. 201–215, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbct>.

SOUZA, F. L.; PEREIRA, R. S.; BARBOSA, N. C. Avaliação química e mineralógica de cassiteritas provenientes de lavras da região de Ariquemes–RO. *Revista Geológica da Amazônia*, v. 9, n. 1, p. 45–58, 2019. Disponível em: <https://revistageologicaamazonia.org>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Environmental health criteria for trace elements in soil and water. Geneva: WHO Press, 2022. Disponível em: <https://www.who.int/publications>. Acesso em: 11 out. 2025.

