BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO DE SUPERFÍCIES IMPACTADAS PELA MINERAÇÃO DE CASSITERITA

Palavras-Chave: Atividade Enzimática, Estanho, Mineração Artesanal e de Pequena Escala (MAPE)

Autoras:

ANDREZA GOMES SILVA, IG – UNICAMP

Drª. JERUSA SCHNEIDER (coorientadora), IG – UNICAMP

Profª. Drª. MARIA JOSÉ MESQUITA (orientadora), IG - UNICAMP

INTRODUÇÃO

A degradação do solo causada pela mineração é um dos principais desafios ambientais enfrentados pela Amazônia brasileira. O processo extrativista impacta significativamente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, comprometendo sua funcionalidade ecológica (Yada et al., 2015). No estado de Rondônia, onde se localiza o depósito do Garimpo Bom Futuro, a extração de cassiterita tem causado severos impactos ambientais (ANM, 2024). Os depósitos primários ocorrem em corpos de greisen e veios de quartzo-topázio associados ao albita-granito, enquanto os secundários concentram cassiterita liberada pelo transporte de minerais pesados e intemperismo das rochas hospedeiras (Ciotta et al., 2024).

Neste contexto, bioindicadores enzimáticos como arilsulfatase e β-glicosidase vêm sendo utilizados como ferramentas promissoras para avaliar a saúde do solo, por refletirem processos essenciais da microbiota e da ciclagem de nutrientes (Mendes et al., 2021). Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar a qualidade do solo em áreas impactadas pela mineração de cassiterita, utilizando a Tecnologia de Bioanálise do Solo (BioAS) da Embrapa como abordagem integrada. A comparação entre uma área degradada e outra em processo de recuperação busca demonstrar o potencial dos bioindicadores enzimáticos na análise da funcionalidade e sustentabilidade dos solos impactados.

METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada para avaliar as alterações em solos degradados pela mineração, conforme detalhado nas seções seguintes.

Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido no Garimpo Bom Futuro, localizado em Ariquemes, cerca de 198 km de Porto Velho, capital do estado de Rondônia. Reconhecido como um dos maiores depósitos de cassiterita a céu aberto do mundo, o local apresenta clima tropical úmido com estação seca (Aw), caracterizado por chuvas intensas (2.200–2.600 mm/ano), temperaturas médias de 24–26°C e umidade

elevada (80–90% no verão). O período seco ocorre, principalmente, entre julho e agosto (Yada et al., 2015).

Amostragem

A coleta de solo foi realizada pela equipe do projeto entre novembro e dezembro de 2024, seguindo o protocolo BioAS da Embrapa (2021). Foram selecionadas duas áreas no garimpo: a Barragem Jacaré Superior (BJS - área degradada) e a Área Piloto de Reflorestamento (APR - em processo de recuperação). Em cada área, foram coletadas dez subamostras da camada superficial (0-10 cm), evitando áreas próximas a estradas ou cercas para prevenir possíveis contaminações. As amostras compostas foram homogeneizadas, peneiradas (malha de 2 mm) e secas ao ar, obtendo-se Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Um volume de 300 g de cada amostra foi enviado ao Laboratório Ribersolo, credenciado pela Embrapa, para análises de fertilidade segundo os padrões da metodologia BioAS.

Parâmetros avaliados

Os resultados laboratoriais foram processados pela plataforma de Interpretação da Qualidade do Solo da Embrapa, que calcula os Índices de Qualidade do Solo (IQS) com base nos parâmetros químicos (pH, nutrientes e matéria orgânica), físicos (densidade e porosidade) e biológicos (atividade enzimática). São consideradas três funções ecológicas principais, a ciclagem de nutrientes (F1), o armazenamento (F2) e a disponibilidade de nutrientes (F3). Os resultados são expressos numa escala numérica de 0 a 1, associada a um sistema visual de cores - semelhante a um semáforo - em que tons verdes (0.81-1.00) indicam condições satisfatórias, amarelos (0.41-0.60) representam situações intermediárias, e vermelhos ou alaranjadas (0-0.20) representam condições desfavoráveis (Quadro 1). Esta metodologia integrada permite uma avaliação abrangente e padronizada da saúde do solo, combinando múltiplos indicadores em um sistema de interpretação claro e objetivo.

Quadro 1 - Valores de referência para índice de qualidade biológica do solo

Classe	**Muito Alto**	**Alto**	**Médio**	**Baixo**	**Muito Baixo**
Faixa	**0,81 a 1,00**	**0,61 a 0,80**	**0,41 a 0,60**	**0,21 a 0,40**	**0 a 0,20**

Fonte: Adaptado de Embrapa, 2021.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

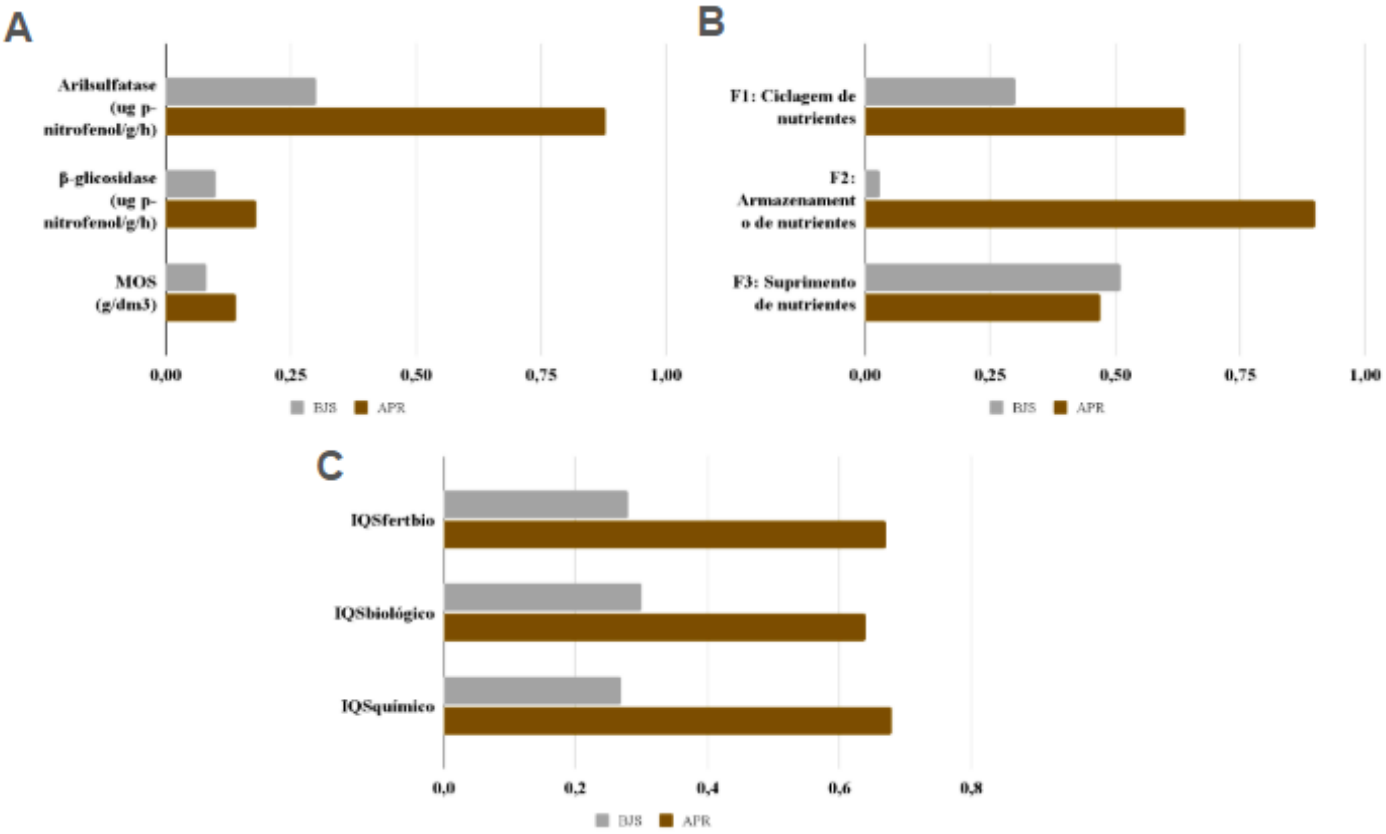
Os resultados indicaram que os solos apresentaram acidez elevada (pH 4,4-4,5) em ambas as áreas, Barragem Jacaré Superior (BJS) mais afetada pela toxidez de alumínio (2,2 mmolc/dm³), uma característica comum em solos amazônicos (Longo et al., 2005). Na Área Piloto de Reflorestamento (APR), observou-se maior teor de matéria orgânica (14 g/dm³), diretamente relacionado às práticas de recuperação que estimularam o aumento da biomassa vegetal, atividade microbiana e proteção contra processos erosivos. A matéria orgânica demonstrou ser um indicador-chave da recuperação, influenciando positivamente a capacidade de troca catiônica (CTC) e disponibilidade de nutrientes (Stieven et al., 2020).

A análise física revelou contraste textural entre as áreas: enquanto a área degradada (BJS) possui solo argiloso, a área em recuperação (APR) apresentou predominância arenosa. Essa variação granulométrica é típica de ambientes minerados (Longo et al., 2005) e interfere diretamente na dinâmica do solo - solos arenosos, geralmente localizados em cabeceiras, são mais permeáveis, porém retém

menos nutrientes; já os argilosos, encontrado em baixadas, apresentam problemas de drenagem e compactação.

No entanto, a atividade enzimática foi um dos parâmetros que mais diferenciaram as áreas. A APR demonstrou valores superiores para as enzimas arilsulfatase e β-glicosidase, conforme ilustrado na Figura 1A. Esse incremento está relacionado ao maior teor de matéria orgânica, responsável por aproximadamente 90% do enxofre total do solo, fundamental para a atividade da arilsulfatase, bem como à presença de serapilheira na APR (Rodrigues et al., 2022). A β-glicosidase, por sua vez, mostrou-se sensível ao aporte de biomassa vegetal, atuando diretamente na decomposição de carboidratos complexos no ciclo do carbono (Paudel et al., 2011).

Figura 1 – Indicadores de qualidade do solo na Barragem Jacaré Superior (BJS) e na Área Piloto de Reflorestamento (APR). A) Atividade enzimática e matéria orgânica, B) Funções do solo (BioAS) e C) Índices de Qualidade do Solo (IQS)



Fonte: Adaptado de Schneider; Mesquita, 2025.

A avaliação das funções ecológicas do solo, representadas pela metodologia BioAS, reforça os contrastes entre as áreas. Na APR, os índices referentes à ciclagem (F1) e armazenamento de nutrientes (F2) foram maiores, indicando solo funcional e com bom desempenho biológico (Figura 1B). Já a BJS apresentou baixos valores para F1 e F2, mas um desempenho pontual em disponibilidade imediata de nutrientes (F3), função independente que não altera o diagnóstico geral da saúde do solo (Mendes et al., 2021).

A metodologia BioAS demonstrou capacidade única em diferenciar solos com características químicas similares, mas distintos em qualidade biológica, destacando a importância de indicadores integrados para avaliação da recuperação ambiental (Stieven et al., 2020). Os resultados dos Índices de Qualidade do Solo (IQS) sintetizam os achados anteriores: na APR, os valores aproximam-se de 1, evidenciando elevada fertilidade biológica, atividade microbiana e equilíbrio químico; enquanto a BJS os índices ficam próximos a zero, sinalizando desequilíbrios profundos e degradação ambiental (Figura 1C).

Dessa forma, confirma-se a eficácia das práticas de recuperação aplicadas na APR e a necessidade de manejo conservacionista na BJS (Mendes et al., 2021). O estudo reafirma evidências de que a atividade enzimática é um dos indicadores mais sensíveis e eficazes na qualidade do solo, fortalecendo o uso do IQS como ferramenta essencial para monitoramento ambiental (Sobucki, 2021).

CONCLUSÕES

O estudo comparativo entre a BJS e a APR evidenciou os impactos negativos da mineração e a eficácia das técnicas de restauração aplicadas. As análises indicaram que a APR apresenta condições mais favoráveis de fertilidade do solo, com destaque para a atividade enzimática avaliada pela metodologia BioAS. Os resultados destacaram a importância da abordagem integrada, combinando indicadores químicos, físicos e biológicos, principalmente com a atividade das enzimas arilsulfatase e β-glicosidase, para uma avaliação mais ampla da qualidade do solo. O trabalho reforça a necessidade de estratégias de recuperação que priorizem a correção da acidez, incremento da matéria orgânica e estímulo à atividade microbiana em áreas mineradas, sendo a metodologia BioAS uma ferramenta promissora para monitorar esses processos de degradação e recuperação ambiental.

BIBLIOGRAFIA

Agência Nacional de Mineração (ANM). **Anuário Mineral Brasileiro (AMB)**. Brasília, DF: ANM, 2024. Disponível em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb. Acesso em: 25 jul. 2025.

CIOTTA, M. R.; LEITE JUNIOR, W. B.; PAYOLLA, B. L.; SILVA, M. A.; MUZZOLON, R.; BETTENCOURT, J. S. **Petrology and metallogeny of the Palanqueta Massif, Bom Futuro Tin mine, Rondônia, Brazil: I – Geology, Petrography, and Geochronology**. Geociências (São Paulo), 43(3):597-618, 2024. DOI: https://doi.org/10.5016/geociencias.v43i3.18546. Acesso em: 25 jul. 2025.

EMBRAPA. **Tecnologia BioAS: Manual de Métodos**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1133431. Acesso em: 30 set. 2024.

LONGO, RM; RIBEIRO, A.Í.; MELO, WJ **Caracterização física e química de áreas mineradas pela destruição de cassiterita**. Bragantia, Campinas, v. 1, p. 127-134, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000100011. Acesso em: 10 dez. 2024.

MENDES, I. C; CHAER, G.M.; REIS JUNIOR, F.B.; SOUSA, D.M.G.; DANTAS, O.D.; OLIVEIRA, M.I.L.; MALAQUIAS, J.V. **Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo**. 50 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081, 369), 2021. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224808/1/Tecnologia-Bioas-Documentos-369.pdf. Acesso em: 10 set. 2024.

PAUDEL, B. R.; UDAWATTA, R. P.; ANDERSON, S. H. **Agroforestry and grass buffer effects on soil quality parameters for grazed pasture and row-crop systems.** Applied Soil Ecology, [s.l.], v. 48, n. 2, p. 125-132, jun. 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.004. Acesso em: 26 jul. 2025

RODRIGUES, R. N; SILVA, T. O. da; CARVALHO, A. J. C. de; SANTOS, L. S. da; FERREIRA, E. J; SOUZA, E. D. de. **Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 52, n. 3, e20200532, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200532. Acesso em: 04 jun. 2025.

SCHNEIDER, J.; MESQUITA, M. J. M. **Dados de replicação para: Edaphic assessment and revegetation strategies at the bom futuro mine: a scientific approach**. Campinas: Repositório de Dados de Pesquisa da Unicamp, 2025. DOI: https://doi.org/10.25824/redu/Y2FTSF. Acesso em: 23 jul. 2025.

SOBUCKI, L.; RAMOS, R. F.; MEIRELES, L. A.; ANTONIOLLI, Z. I.; JACQUES, R. J. S. **Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, [S. l.], v. 45, e0210109, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210109. Acesso em: 17 abr. 2025.

STIEVEN, A. C. et al. **Atributos do solo em sistemas diferenciados de uso e manejo do solo em Mato Grosso, MT, Brasil.** In : Colloquium Agrariae, v. 16, n. 2, p. 1-15, 2020. DOI: https://doi.org/10.5747/ca.2020.v16.n2.a354. Acesso em: 28 fev. 2025.

YADA, M. M.; MINGOTTE, F. L. C.; MELO, W. J. de; MELO, G. P. de; MELO, V. P. de; LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. Í. **Atributos químicos e bioquímicos em solos degradados por mineração de estanho e em fase de recuperação em ecossistema amazônico**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, n. 3, p. 714–724, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140499. Acesso em: 21 dez. 2024.