



ELILSON GOMES DE BRITO FILHO

**POTENCIAL DE PROPAGAÇÃO E EFICIÊNCIA DE
FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM ÁREAS
AFETADOS PELA DEPOSIÇÃO DE REJEITO DE
MINERAÇÃO DE FERRO**

**LAVRAS – MG
2026**

ELILSON GOMES DE BRITO FILHO

**POTENCIAL DE PROPAGAÇÃO E EFICIÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS
ARBUSCULARES EM ÁREAS AFETADOS PELA DEPOSIÇÃO DE REJEITO DE
MINERAÇÃO DE FERRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do Solo, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador
Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro

**LAVRAS – MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Brito Filho, Elilson Gomes de .

Potencial de propagação e eficiência de fungos micorrízicos arbusculares em
áreas afetados pela deposição de rejeito de mineração de ferro / Elilson Gomes de
Brito Filho. - 2025.

60 p. : il.

Orientador: Marco Aurélio Carbone Carneiro

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Reabilitação. 2. Mineração. 3. Fungos Micorrízicos Arbusculares. I. Carneiro,
Marco Aurélio Carbone. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

ELILSON GOMES DE BRITO FILHO

**POTENCIAL DE PROPAGAÇÃO E EFICIÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS
ARBUSCULARES EM ÁREAS AFETADOS PELA DEPOSIÇÃO DE REJEITO DE
MINERAÇÃO DE FERRO**

**PROPAGATION POTENTIAL AND EFFICIENCY OF ARBUSCULAR
MYCORRHIZAL FUNGI IN AREAS AFFECTED BY IRON MINING TAILINGS
DEPOSITION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do Solo, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de julho de 2025.

Dra. Meire Aparecida Silvestrini Cordeiro UFMS

Dr. Jessé Valentim Dos Santos UFMT

Documento assinado digitalmente
 MARCO AURELIO CARBONE CARNEIRO
Data: 09/02/2026 08:38:36-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador
Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro

**LAVRAS – MG
2026**

*Às mulheres da minha vida: Terezinha, Elisônia, Eliana, Rosana, Rosa Laura (in memoria),
Cláudia Taniguchi, Maria Jorrana, vocês são minha inspiração de luta, perseverança e
coragem.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Dona Nega e Seu Didi, ambos exemplos de seres humanos que, apesar do pouco acesso ao ensino formal, acreditaram neste desconhecido, me incentivaram e, com esse incentivo, me trouxeram até onde estou.

A Deus e a Virgem Maria, pois seria impossível chegar onde cheguei sem ser guiado por alguém como eles.

Ao meu orientador, Professor Doutor Marco Aurélio Carbone Carneiro. Como pessoa, é um ser humano incrível, empático, inteligente e assertivo; como pesquisador, é ético, coerente e possui uma capacidade e paciência para orientar que tornaram meu mestrado mais leve. Um grande espelho para mim. Almejo ser como ele: um ser humano e pesquisador excepcional. Muito obrigado, professor.

Ao meu antigo orientador, Prof. Dr. Milton Campos, que me orientou durante toda a graduação, afinal, o pesquisador é um processo de construção e a graduação é a base, muito obrigado, professor.

À Aline Silva e Jessé Valentim (Atual professor Jessé) que, mesmo sem serem oficialmente coorientadores, sempre estiveram presentes, tirando dúvidas e auxiliando em processos complexos ao longo do meu mestrado.

Aos meus irmãos (Eliana, Elisônia, Rosana, Luciano, Euclides) e sobrinhos (Maria, Jorge Neto, Pedro, Davi, Thomas, Arthur, Romeu, Murilo), pois minha família sempre foi unida, e essa união, muitas vezes, me deu forças para seguir em frente e não desistir.

À minha família do coração, Dona Cláudia Taniguchi e Raynner Taniguchi (meu melhor amigo), que me acolheram em Minas Gerais e tornaram meus dias mais felizes. Amo vocês.

Aos amigos que tive a felicidade de conhecer em Lavras através do vôlei e da vida. Em especial: Aron Sjöberg, Giovanna Braga, João V. Pacheco, Tiemi Kagimoto, Gabriela Bruijn, Pedro G. Machado, Letícia Rodrigues, Isaac Orcine, Pedro Rios, Victor Handam, Gustavo Martins, Moisés Feitosa, Gabriely Freire, Janaina Martins, Jennifer Padilha. Amo vocês de todo coração.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Ciência do Solo e ao Setor de Microbiologia e Bioquímica do Solo, que contribuem significativamente para o avanço da pesquisa sobre solos em Minas Gerais, além da formação de profissionais altamente qualificados.

À Universidade Federal do Amazonas, à Universidade Federal da Paraíba e à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, que me deram todo o suporte educacional durante a graduação e me ajudaram a chegar até este momento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento da bolsa durante o curso de pós-graduação.

Por fim, agradeço ao Presidente Luiz Inácio Lula da Silva por todo o incentivo à formação de estudantes e pesquisadores no Brasil.

Meu muito obrigado!

“Seja a história boa a ser contada por alguém”

(Frase autoral)

RESUMO

A mineração de metais no Brasil possui uma importância histórica. Essa atividade, até hoje, ainda segue ativamente em todo o Brasil, que é passível para tais práticas. Nesse viés, destaca-se a Barragem do Fundão no distrito de Bento Rodrigues, da empresa Samarco, que, além de realizar a extração de minério de ferro. O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), ocorreu devido à negligência por parte das empresas responsáveis. A biodiversidade foi severamente impactada, incluindo os fungos micorrízicos arbusculares, de grande importância ambiental e para a manutenção do ecossistema vegetal. Nesse contexto, o estudo objetiva avaliar o potencial de propagação e eficiência de fungos micorrízicos arbusculares em áreas afetadas pela deposição de minério de ferro sob reabilitação. Para isso, foram coletados solos em áreas afetadas com 3, 4 e 5 anos de revegetação e uma área de referência (não afetada), 12 amostras por área. A partir do material do campo, foram realizadas análises de caracterização física e química do solo e densidade de esporos. Para avaliar o potencial de propagação, foi realizada a multiplicação em cultivo-armadilha em vasos com solo inoculado das áreas e iscas vegetais (*Brachiaria brizantha* - BRS Piatã, *Helianthus annuus* L. e *Glycine max* L.). Após 4 meses, houve o desmonte, e foi realizada a análise da densidade de esporos e a colonização micorrízica. O solo-inóculo produzido pelo cultivo-armadilha foi utilizado no teste de eficiência para o crescimento vegetal de uma espécie nativa, o ipê-roxo (*Tabebuia heptaphylla* (Mart.) Mart.), em tecnossolo esterilizado. Os tratamentos foram as diferentes idades de revegetação (3, 4 e 5 anos), a referência e uma testemunha (sem solo inoculado), totalizando 5 tratamentos e 12 repetições. Ao fim de 127 dias, ocorreu o desmonte do experimento, onde foram analisadas novamente a densidade de esporos, a colonização micorrízica e o vigor das mudas. Após a obtenção dos dados, os mesmos foram analisados por meio de análise multivariada, testes de médias por meio de Tukey, quando houver mais de duas variáveis, e teste t de Student, quando houver apenas duas, ambos a 5% de probabilidade. Os valores de densidade de esporos das áreas de revegetação são superiores aos da referência e diferentes, mas entre si, as três áreas são iguais, evidenciando que pode estar havendo um equilíbrio na sucessão ecológica. A revegetação por cinco anos ajudou a recuperar os fungos micorrízicos no solo, o que melhorou a sobrevivência e o vigor das mudas. Áreas com vegetação mais antiga têm mais potencial para a restauração ecológica.

Palavras-chave: reabilitação; mineração; fungos micorrízicos arbusculares.

ABSTRACT

The mining of metals in Brazil has historical importance. This activity, to this day, still remains active throughout the country, which is suitable for such practices. In this context, the Fundão Dam in the Bento Rodrigues district, belonging to Samarco, stands out, as the company also carried out iron ore extraction. The collapse of the Fundão dam in Mariana (MG) occurred due to negligence by the responsible companies. Biodiversity was severely impacted, including arbuscular mycorrhizal fungi, which have great environmental importance and are essential for maintaining the plant ecosystem. In this context, the study aims to evaluate the propagation potential and efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by iron mining tailings deposition under rehabilitation. For this purpose, soils were collected from areas affected with 3, 4, and 5 years of revegetation and from a reference area (non-affected), with 12 samples per area. From the field material, analyses of the soil's physical and chemical characterization and spore density were performed. To evaluate propagation potential, multiplication was carried out using trap cultivation in pots with inoculated soil from the areas and trap plants (*Brachiaria brizantha* – BRS Piatã, *Helianthus annuus* L., and *Glycine max* L.). After 4 months, the system was dismantled, and spore density and mycorrhizal colonization were analyzed. The inoculum-soil produced by the trap cultivation was used in the efficiency test for plant growth of a native species, the purple ipê (*Tabebuia heptaphylla* (Mart.) Mart.), in sterilized technosol. The treatments consisted of the different revegetation ages (3, 4, and 5 years), the reference area, and a control (without inoculated soil), totaling 5 treatments and 12 replications. At the end of 127 days, the experiment was dismantled, and spore density, mycorrhizal colonization, and seedling vigor were analyzed again. After obtaining the data, they were analyzed through multivariate analysis, mean comparison using Tukey's test when more than two variables were present, and Student's t-test when only two variables were present, both at 5% probability. The spore density values of the revegetated areas are higher than those of the reference area and different from it; however, among themselves, the three areas are similar, indicating that ecological succession may be reaching equilibrium. Five years of revegetation helped restore mycorrhizal fungi in the soil, which improved seedling survival and vigor. Areas with older vegetation have greater potential for ecological restoration.

Keywords: rehabilitation; mining; arbuscular mycorrhizal fungi.

INDICADORES DE IMPACTO

Este trabalho apresenta impactos ambientais, científicos, sociais e extensionistas em potencial, especialmente voltados à recuperação de áreas degradadas por rejeitos de mineração. O estudo permitiu avaliar, com base em evidências experimentais, a eficiência e o potencial de propagação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) em áreas com diferentes tempos de revegetação, afetadas pela deposição de minério de ferro na região de Mariana (MG), após o rompimento da Barragem de Fundão.

Dentre os resultados mais relevantes, destaca-se o aumento na densidade de esporos micorrízicos nas áreas com cinco anos de revegetação, o que indica uma possível retomada da funcionalidade ecológica do solo e maior potencial simbiótico para a regeneração da vegetação nativa, como evidenciado pelo vigor das mudas de *Tabebuia heptaphylla* (ipê-roxo). Esse dado demonstra impacto direto sobre a tecnologia e produção (área temática 7 da Política Nacional de Extensão), ao viabilizar o uso de FMAs como bioinsumo na recuperação de solos degradados.

O caráter extensionista do trabalho se evidencia pelo envolvimento com áreas afetadas diretamente por desastre ambiental, com potencial de aplicação prática dos resultados em programas de reabilitação ambiental conduzidos por instituições públicas ou privadas. O território impactado compreende o município de Mariana (MG), com possível benefício futuro à população local por meio da melhoria das condições ecológicas e do uso de tecnologias sustentáveis de recuperação.

A pesquisa está alinhada com os seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU: ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ODS 15 (Vida terrestre), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ao propor alternativas ecológicas baseadas em FMAs para recuperação ambiental em áreas degradadas por rejeitos.

Além disso, o estudo contou com a participação de estudantes de pós-graduação e apoio técnico do setor de Microbiologia e Bioquímica do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), fortalecendo a formação científica e a capacidade técnica em restauração ecológica e biotecnologia do solo.

IMPACT INDICATORS

This study presents potential environmental, scientific, social, and outreach impacts, especially focused on the recovery of areas degraded by mining waste. Based on experimental evidence, the research assessed the efficiency and propagation potential of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in areas under different periods of revegetation affected by iron ore tailings deposition in the region of Mariana (MG), following the collapse of the Fundão Dam.

Among the most relevant results, the increase in AMF spore density in areas with five years of revegetation stands out, indicating a possible restoration of the soil's ecological functionality and greater symbiotic potential for the regeneration of native vegetation, as evidenced by the vigor of *Tabebuia heptaphylla* (ipê-roxo) seedlings. These findings demonstrate a direct impact on technology and production (thematic area 7 of the National Extension Policy), by enabling the use of AMF as a bio-input for the recovery of degraded soils.

The extension character of this study is evident through its engagement with areas directly affected by an environmental disaster, with practical application potential in environmental rehabilitation programs conducted by public or private institutions. The impacted territory includes the municipality of Mariana (MG), with possible future benefits to the local population through improved ecological conditions and the use of sustainable recovery technologies.

The research aligns with the following United Nations Sustainable Development Goals (SDGs): SDG 13 (Climate action), SDG 15 (Life on land), SDG 12 (Responsible consumption and production), and SDG 9 (Industry, innovation, and infrastructure), by proposing ecological alternatives based on AMF for the environmental recovery of degraded areas.

Furthermore, the study involved the participation of graduate students and technical support from the Soil Microbiology and Biochemistry Sector of the Federal University of Lavras (UFLA), strengthening scientific training and technical capacity in ecological restoration and soil biotechnology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização da barragem com o percurso do Rio Doce atingido (A) e antes (B) e depois (C) do distrito de Bento Ribeiro com rejeitos de mineração.....	28
Figura 2. Esquema de coleta nas áreas de revegetação e na área de referência.	30
Figura 3. Cultivo armadilha em casa de vegetação para multiplicação de FMAs.....	32
Figura 4. Fundo de vasos com raízes de ipê-roxo com solo-inóculo de área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG. A: : solo inóculo com 3 anos de revegetação; B: solo inóculo com 4 anos de revegetação; C: : solo inóculo com 5 anos.....	36
Figura 5. Média de densidade de esporos em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.	38
Figura 6. Resíduos encontrados nas áreas de deposição com rejeito sob revegetação e esporos cobertos por material laranja desconhecido.....	41
Figura 7. Esporos encontrados nas áreas estudadas.	42
Figura 8. Comparação da densidade de esporos dentro das áreas e após multiplicação.	43
Figura 9. Análise de componentes principais(ACP) dos atributos químicos e densidade de esporos em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.....	44
Figura 10. Análise de colonização micorrízica em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.	46
Figura 11. Teste de germinação de sementes de Ipê (<i>Tabebuia heptaphylla</i> (Mart.) Mart.). ..	47
Figura 12. Índice de sobrevivência em ipê-roxo com solo-inóculo de área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.	48
Figura 13. Análise da densidade de esporos e colonização micorrízica em ipê-roxo com solo-inóculo de área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Média dos atributos químicos e densidade de esporos de campo em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.	39
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 Modificações no ambiente em detrimento de acidentes com mineração	19
2.2 Processos para recuperação da biodiversidade em áreas com presença de rejeitos de mineração	21
2.3 Importância dos FMAs na revegetação de solos em áreas anteriormente afetadas por acidentes de mineração	23
3 OBJETIVOS.....	27
3.1 Geral.....	27
3.2 Específicos.....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Caracterização da área de estudo.....	28
4.2 Coleta em campo	29
4.3 Número total de esporos de FMA em amostras de campo	31
4.4 Cultivo em armadilha para multiplicação	31
4.5 Determinação da colonização micorrízica	34
4.6 Contribuição dos FMAs para revegetação de plantas nativas.....	35
4.7 Análises dos dados.....	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Potencial de propagação do FMAs	37
5.2 Teste de eficiência de solo inóculo em espécie nativa.....	47
6 CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A mineração de metais no Brasil tem uma importância histórica que antecede a independência do país. Esse setor motivou o interesse da coroa portuguesa em expandir o controle sobre o território, especialmente após o declínio da indústria sucroalcooleira no Nordeste. A “corrida do ouro” foi tão marcante que resultou na transferência da capital do Brasil colônia da Bahia para o Rio de Janeiro. A mineração impulsionou a expansão e o desenvolvimento de cidades mineiras, que até hoje preservam traços desse período, marcado pela escravidão, mas também pela relevância econômica que ajudou a impulsionar a economia brasileira na época (FIGUEIRÔA, 1994; LICCARDO et al., 2004; MORAIS et al., 2015).

Essa atividade até hoje ainda segue ativamente em todo Brasil, que se destaca mundialmente na exportação de commodities minerais. No entanto, a atividade mineral ocorre tanto de forma irregular, como no caso de garimpos ilegais na Amazônia e alguns em forma de mineração legal, onde a extração do metal de interesse é acompanhada de projetos que possuem viabilidade econômica e são ecologicamente corretas (MAGNO, 2015; SOUZA JUNIOR et al., 2018).

O rompimento da barragem de Fundão, Mariana (MG) ocorreu devido à negligência por parte das empresas responsáveis, já que se tratar de um mecanismo físico e que necessita de manutenção, o que gerou diversos impactos no meio ambiente e no âmbito socioeconômico da região (FREITAS et al., 2019).

A biodiversidade foi severamente impactada, inserida em um conjunto de características do local que se expande desde populações até ecossistemas próprios, ou mesmo microclimas, em uma harmonia complexa alterada pelo acidente (ESPINDOLA et al., 2016; LOPES et al., 2009). Em virtude disso, um componente que sustenta boa parte desse ecossistema e comporta uma grande quantidade de vida é o solo, cuja diversidade de vida foi bastante afetada por tal acontecimento. Dentre os grupos de organismos do solo que foi significativamente impactado pela deposição do rejeito se destacam os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), grupo de microrganismos que exerce uma importante função ecológica mutualística com as plantas vasculares (BRUNDRETT e TEDERSOO, 2018; JÚNIOR et al., 2020; SOARES et al., 2020).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são um grupo de fungos de solo que formam associações simbióticas com as raízes de aproximadamente 80% das plantas terrestres (BRUNDRETT e TEDERSOO, 2018). Esses fungos penetram nas raízes, criando estruturas chamadas arbúsculos, e, em alguns casos, vesículas, melhorando a absorção de água e nutrientes, especialmente fósforo, pelas plantas, e em troca recebem carboidratos produzidos

pela fotossíntese (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). Essa relação mutualística aumenta a resistência das plantas a estresses ambientais, melhora a estrutura do solo e promove a biodiversidade vegetal.

Em ecossistemas naturais, os FMAs estabelecem uma relação simbiótica com comunidades vegetais diretamente e com outros seres indiretamente, como no caso de compostos orgânicos, resultantes da decomposição de matéria orgânica, que servem de substrato para ação de outros organismos do solo, como bactérias e outros fungos, que contribuem para a reciclagem de nutrientes e a manutenção da saúde do solo (SIQUEIRA et al., 1995; POUYÚ-ROJAS e SIQUEIRA, 2000). Na região afetada pela deposição de rejeito da Barragem do Fundão foram observados diversos impactos como a redução da comunidade dos FMAs e seu potencial amenizador de estresses abióticos, mediante avaliação da biomassa e atividade microbiana, observando-se alterações na composição e densidade de grupos microbianos específicos, como microrganismos celulolíticos, nitrificantes e fungos micorrízicos arbusculares, que indicaram resiliência e capacidade de recuperação dos ecossistemas impactados. (MERGULHÃO et al., 2019; SILVA et al., 2021;).

Outros estudos clássicos já citavam o impacto de mineração nas comunidades de FMAs, principalmente na diminuição no número de propágulos e na redução da colonização micorrízica, como o de Kiernan et al. (1983). Porém, Melloni et al. (2003), obtiveram resultados importantes ao realizar a revegetação em locais após a atividade de mineração constatando que, com o tempo e o manejo correto, essas áreas podem ser vegetadas. No entanto, a deposição de espécies camadas de rejeitos pode modificar comportamentos de forma permanente, o que é um grande risco ambiental.

Estudos mais recentes têm aprofundado essas questões no contexto do rompimento da barragem do Fundão, em Mariana, Brasil. Zabch et al. (2021) avaliaram o uso de espécies herbáceas inoculadas com o fungo micorrízico *Acaulospora morrowiae*, demonstrando que o cultivo consorciado de *Urochloa ruziziensis*, *Crotalaria spectabilis* e *Guizotia abyssinica* (R + C + G) foi mais eficiente na produção de matéria seca e na colonização micorrízica, promovendo uma melhor adaptação inicial nos rejeitos. Complementarmente, Zanchi et al. (2022) destacam que o uso de plantas herbáceas como etapa inicial favorece o preparo do solo para espécies arbóreas, como *Enterolobium contortisiliquum*, que apresentou capacidade de absorção de metais pesados e de melhora nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Ambos os estudos reforçam que sistemas consorciados de herbáceas não apenas aceleram a ativação da microbiota do solo, mas também criam condições favoráveis ao estabelecimento de

espécies arbóreas, configurando-se como uma estratégia promissora para a recuperação de áreas degradadas por rejeitos de mineração.

Nesse mesmo sentido, avaliando a diversidade de FMAs em área de mineração de gesso no semiárido brasileiro, Mergulhão et al. (2010) encontrou resultados que demonstra o impacto da atividade mineral sobre a diversidade desses seres, afetando a sua esporulação em espécies específicas, sugerindo espécies mais resilientes como *Glomus* sp. como inoculações futuras. Contudo, estudando área de revegetação após a deposição de rejeito de mineração de carvão, Bi et al. (2021), trouxeram resultados promissores em que puderam verificar que em menos de 1 ano de revegetação florestal, já é possível também notar incremento na diversidade de FMAs e de forma rápida e estável, demonstrando o dinamismo que ocorre dos FMAs em decorrência da finalidade da mineração e da localização.

Pesquisas realizada em ambientes desmatados no nordeste brasileiro, como as de Silva et al. (2023), mostram que, mesmo após décadas ainda se há um processo de sucessão ecológica de espécies de fungos, com alguns indicadores de revegetação, ou seja, a revegetação está no caminho certo, porém, essa está susceptível as características do solo, e não só sua vegetação. Dessa forma, a peculiaridade do rejeito pode afetar a revegetação local desses ambientes, necessitando um manejo mais específico para esse tipo de situação, e uma forma de avaliar as condições atuais como indicador do sucesso da revegetação é por meio do estudo do comportamento dos FMAs nesses ambientes.

Portanto, levando em consideração o trabalho de revegetação como importante para revegetação das áreas afetadas pelo rompimento da Barragem Fundão, destaca-se o papel dos FMAs nesse processo. Esses fungos desempenham um papel na revegetação do solo e no crescimento vegetal, pois estabelecem associações simbióticas com as raízes das plantas, melhorando a absorção de nutrientes e água, o que contribui para o fortalecimento da vegetação. O comportamento dos FMAs durante a revegetação, como observado por Teixeira et al. (2017), reflete a sua capacidade de auxiliar na recuperação do equilíbrio ecológico, especialmente em solos degradados. Este projeto tem-se as seguintes hipóteses: I- O potencial de propagação dos FMAs foi afetado pela deposição de rejeito de mineração de ferro; II – Os FMAs são grandes contribuintes no crescimento de espécies nativas nas áreas estudadas. III - A revegetação está sendo eficaz no processo de reabilitação e recuperação ambiental das áreas afetadas.

Assim, este trabalho objetiva avaliar o potencial de propagação e eficiência de fungos micorrízicos arbusculares em áreas afetados pela deposição de minério de ferro sob reabilitação em Mariana – MG.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Modificações no ambiente em detrimento de acidentes com mineração

Milhões de metros cúbicos de rejeitos são produzidos como resultado da extração de minérios, que são incorporados às barragens (OWEN et al., 2020). Esses resíduos são perigosos e podem causar grandes problemas socioambientais. O estéril de mineração é principalmente um substrato com baixa agregação misturado com fragmentos rochosos. Ele carece de matéria orgânica e nutrientes necessários para o crescimento das plantas e pode contaminar o solo, corpos de água, atmosfera e todo o ecossistema se não for bem administrado (MUKHOPADHYAY et al., 2014; RIVAS-PÉREZ et al., 2016; JÓZEFOWSKA et al., 2017; USGS, 2021).

A *World Mine Tailing Failures* WMTF afirma que, desde 1771, cerca de 40 mil barragens em todo o mundo estão ativas, inativas ou abandonadas, armazenando cerca de 534 bilhões de metros cúbicos de resíduos (WMTF, 2020). A Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 14.066/2020) recente do Brasil proíbe o alteamento "a montante" e supervisiona 441 barragens das 841 registradas no país. Devido à menor área ocupada em relação ao método a jusante, o alteamento a montante foi bastante popular porque é barato e fácil de obter licenças (KOSSOFF et al., 2014). No entanto, as chuvas intensas, o tipo de material usado na construção e as características dos rejeitos envolvidos são todos fatores que frequentemente contribuem para a instabilidade dessas arquiteturas, principalmente no caso de falhas em suas barragens de contenção (KEMP et al., 2020; PARENTE et al., 2021).

Embora a agropecuária abranja mais áreas do que a mineração, os rejeitos gerados pelos rompimentos de barragens podem afetar extensões territoriais significativas (BARROS et al., 2012; YADA et al., 2015; NIGAM et al., 2017; SAES e BISHT, 2020). Como esses resíduos de mineração em barragens podem conter altos níveis de elementos tóxicos, que são perigosos para a vida e podem se mover de ecossistemas terrestres para aquáticos (USGS, 2021). Isso significa que é necessário implementar medidas políticas e tecnológicas para limitar as falhas de barragens (PARENTE et al., 2021). Vários estudos já relataram falhas específicas em barragens de rejeitos de mineração em várias partes do mundo, bem como suas causas, volumes descartados e os efeitos sociais, econômicos e ambientais que elas causam (OWEN et al., 2020).

O histórico de falhas em barragens de rejeitos é alarmante, com incidentes registrados em várias partes do mundo. Entre 1900 e agosto de 2016, o Center for Science in Public Participation (CSP2) documentou 289 falhas em barragens, com os Estados Unidos liderando

o número de incidentes (41%), seguidos por países como Chile, China e Brasil, este último representando apenas 4% dos registros (FERNANDES, 2020). A China, por exemplo, enfrentou 3.523 incidentes entre 1954 e 2013, com destaque para o rompimento das barragens de Banqiao e Shimantan em 1975, que resultaram em mais de 200.000 mortes (LI, 1994). Na Austrália, a ruptura da barragem de Briseis, na Tasmânia, em 1929, causou 14 mortes e danos significativos, o que levou a uma maior vigilância e regulamentação da construção de barragens (ANCOLD, 2003).

Nos Estados Unidos, a década de 1970 foi marcada por falhas catastróficas que aumentaram a conscientização sobre a segurança das barragens. Em 1972, o rompimento da barragem de rejeitos de carvão em Buffalo Creek, West Virginia, causou 125 mortes e a destruição de uma comunidade de 6.000 pessoas. Já em 1976, a barragem de Teton, em Idaho, rompeu durante seu primeiro enchimento, resultando em 11 mortes e 4.000 casas destruídas. Em resposta, foram implementadas várias legislações, incluindo a Lei de Recursos Hídricos de 1986, que criou o Conselho Nacional de Revisão de Segurança de Barragens, visando reduzir os riscos de rompimentos de barragens (FEMA, 2013). Além disso, o United States Committee on Large Dams (USCOLD) formulou diretrizes para garantir a segurança de barragens em todas as fases do seu ciclo de vida (BUREC, 1995).

No Brasil, falhas em barragens de rejeitos também têm ocorrido com frequência. O rompimento da barragem da Mina Fernandinho, em 1986, causou sete mortes e a liberação de 350.000 m³ de rejeitos. Em 2001, o rompimento de uma barragem em Nova Lima resultou na morte de cinco pessoas e na contaminação de corpos d'água, além de danos à vegetação local. Mais recentemente, em 2007, o vazamento de 2 milhões de m³ de rejeitos em Mirai (MG) afetou o rio Muriaé, causando a morte de peixes e interrompendo o fornecimento de água para milhares de pessoas (SOARES et al., 2020). Esses incidentes destacam a necessidade urgente de políticas e práticas mais rigorosas na gestão de barragens e na mitigação dos impactos ambientais causados por falhas dessas estruturas.

No ano de 2014, em Itabirito, uma pessoa ficou ferida e três trabalhadores da Herculano Mineração que faziam manutenção no talude de uma barragem de rejeitos desativada morreram soterrados. Além disso, o evento contaminou as águas e assoreou córregos e rios. Em 2015, a barragem de mineração da Samarco em Mariana (MG) colapsou, produzindo uma grande onda de rejeito que se espalhou pelo rio Doce. Isso matou 19 pessoas e prejudicou a biodiversidade em centenas de quilômetros de rios, matas ciliares e Costa Atlântica. Os rejeitos da Barragem I da Vale S.A. em Brumadinho escoaram em 2019 pela área administrativa da mina, atravessando a calha do ribeirão Ferro-Carvão e terminando no rio Paraopeba. A perda de vidas humanas foi

a consequência mais direta. Após o rompimento da barragem de rejeitos da mina do Córrego do Feijão, no Complexo Paraopeba, 12 milhões de metros cúbicos (Mm^3) de rejeitos foram carreados pela calha do ribeirão Ferro-Carvão e do rio Paraopeba. Além de causar a perda de 270 vidas humanas, este desastre ambiental considerável e o maior acidente de trabalho da história brasileira causou danos ao patrimônio público e privado, bem como prejuízos socioeconômicos diretos e indiretos à biodiversidade e aos recursos hídricos. Isso levou a preocupações na bacia do rio Paraopeba e em toda a bacia do rio São Francisco (IGAM, 2020).

Em relação à composição química do rejeito, no caso de Brumadinho, as amostras coletadas mostraram que os teores de manganês e ferro em 100% das amostras estavam muito acima da média para os solos locais. Os valores para o manganês eram 27 vezes maiores e para o ferro eram até 2 vezes maiores. Além disso, foi encontrado que os valores do cobre e do bário superaram os limites permitidos pela lei (em 60% e 10%, respectivamente) (BRASIL, 1989).

Além disso, O rejeito, depositado em Brumadinho, continha altas concentrações de titânio (Ti, 0,43 mg/g), manganês (Mn, 4,78 mg/g), alumínio (Al, 10,8 mg/g) e ferro (Fe, 264,9 mg/g). As amostras de metais pesados incluíram: urânio (U, 1457,4 g/g), cádmio (Cd, 30,94 g/g), chumbo (Pb, 14,64 g/g), arsênio (As, 4,69 g/g), estanho (Sn, 547,4 g/g) e mercúrio (Hg, 101,3 g/g) (VERGILIO et al., 2020). As concentrações encontradas superaram os valores recomendados pela NOAA (*Natural Oceanic and Atmospheric Administration*) e o alto potencial de toxicidade para os seres vivos locais tornam os metais pesados muito importantes (VERGILIO et al., 2020). Por outro lado, na Barragem do Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Silva et al. (2021) não encontraram mudanças significativas nos atributos químicos, mas pelos dados pode-se verificar um aumento de chumbo (Pb), cromo (Cr), silício (Si), manganês (Mn), fósforo (P), cério (Ce), porém, não em níveis alarmantes. Ao comparar os acidentes e seus rejeitos, é possível observar suas singularidades, que, por sua vez, influenciam de maneiras distintas, demandando abordagens específicas.

2.2 Processos para recuperação da biodiversidade em áreas com presença de rejeitos de mineração

A mineração é a principal causadora da perda da qualidade do solo e do ambiente, seja subterrânea ou a céu aberto, dependendo do local afetado (GASTAUER et al., 2018; FENG et al., 2019; SAES e BISHT, 2020; XIANG et al., 2021). A mineração a céu aberto promove a remodelação da paisagem e a produção de rejeitos, resíduos gerados no beneficiamento do minério, e estéreis, materiais extraídos na lavra sem valor econômico, enquanto a mineração

subterrânea pode causar rachaduras na superfície do solo e aumentar as emissões de CO₂ (KOSSOFF et al., 2014; ARMSTRONG et al., 2019).

Segundo o artigo 2º do Decreto Federal no 97.632/1989, que regula a atividade minerária, define a área degradada como danos ao meio ambiente que resultam na perda ou redução da qualidade do solo e do ecossistema. A degradação ambiental pode ser definida como a substituição completa da vegetação por vegetação secundária ou exótica, resultando em alterações desfavoráveis aos serviços ecossistêmicos, enquanto a degradação do solo indica uma diminuição da capacidade funcional do solo (LAL, 2012; KARLEN e RICE, 2015; KARLEN et al., 2019), ou seja, destes serviços ecossistêmicos em ocorrer nestas áreas afetadas

Os efeitos da mineração sobre os ecossistemas naturais sempre resultam na perda da matéria orgânica do solo. Esse processo, juntamente com a erosão, a perda de nutrientes e a salinização, acelerados antropologicamente, contribuem para a perda da qualidade do solo (DORAN e PARKIN, 1994; LEPSCH, 2011; LAL, 2012; BRADY e WEIL, 2013; KARLEN e RICE, 2015). Por esse motivo, a degradação ambiental causada pela atividade de mineração deve ser examinada minuciosamente, tanto pela extração em si quanto pelas falhas nas barragens de contenção de resíduos (CARMO et al., 2017).

O armazenamento inadequado de rejeito e estéril podem resultar em vazamentos ou lixiviação de contaminantes para áreas vizinhas. Isso se deve ao fato de que a maior parte do rejeito é não inerte (VERGILIO et al., 2020; WANG et al., 2019). Além de colocar em risco a vida humana por meio da contaminação de alimentos e água, a contaminação do solo por substâncias tóxicas, como os elementos potencialmente tóxicos (EPTs) tem um impacto direto na comunidade biológica, o que afeta diretamente processos chave e consequentemente a saúde do ecossistema em geral (KARACA et al., 2010).

O rejeito também pode afetar as características físicas do solo, alterando a textura do solo e isso pode resultar em mudanças na estrutura do solo e na capacidade de retenção de água quando úmida e o selamento quando seco (KARACA et al., 2010). A disponibilidade de nutrientes, o desenvolvimento das plantas e o crescimento de certos organismos podem ser prejudicados por essa mudança (KUMAR, 2013; GHEZZEHEI et al., 2019; NEINA, 2019). Devido ao fato de que o metabolismo dos microrganismos é distinto e variado, a capacidade da comunidade de se adaptar a novas circunstâncias pode ser prejudicada. A capacidade adaptativa heterogênea permite que parte da comunidade desenvolva uma vantagem competitiva e prospere. Em contrapartida, outras frações da comunidade podem ser impactadas pelas mudanças ambientais, levando a alterações na estrutura da comunidade do solo, com possíveis

reduções na atividade metabólica e na qualidade do solo (GRIFFITHS e PHILIPPOT, 2013; LEE et al., 2020; PHILIPPOT et al., 2021).

A Society for Ecological Restoration (SER) define a restauração ambiental como uma ação deliberada que visa iniciar ou acelerar a recuperação de ecossistemas, buscando melhorar sua saúde, integridade e sustentabilidade. Esse processo é particularmente importante em ecossistemas que foram danificados ou degradados (SER, 2004). No contexto de revegetação de áreas impactadas por mineração no Brasil, os solos contaminados por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) podem ser recuperados por meio de técnicas de remediação que combinam abordagens convencionais e biológicas. Entre essas técnicas estão a neutralização da acidez, a estabilização química dos contaminantes e a remoção e redistribuição de solos. Essas estratégias são fundamentais para restaurar as condições adequadas ao crescimento de vegetação nativa, promovendo a recuperação ecológica e a melhoria da qualidade ambiental nas áreas de mineração.

2.3 Importância dos FMAs na revegetação de solos em áreas anteriormente afetadas por acidentes de mineração

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são componentes da microbiota do solo, desempenhando um papel nos processos de recuperação de áreas degradadas por meio da revegetação. Essa relação de importância remonta ao processo evolutivo das plantas no domínio terrestre. Os FMAs têm um papel importante nos ecossistemas porque afetam significativamente o crescimento das plantas e sua adaptação aos estressores bióticos e abióticos do solo (RAMOS et al., 2011). A maioria das plantas superiores que possuem micorrizas tem uma associação com os FMAs (BAREA et al., 2008, 2011).

Através da melhoria da nutrição das plantas, estes fungos têm um impacto significativo (HARRISON, 2005; RAMOS et al. 2008), principalmente em relação ao fósforo (P), tolerância ao estresse abiótico, favorecimento das relações hídricas, efeitos fisiológicos e apoio a processos reabilitadores, como o estabelecimento da vegetação, o aumento da produção de material orgânico, o aumento do acúmulo de nutrientes na fitomassa, o aumento da produção de raízes, maior proteção do solo (estabilização), melhores relações tróficas, melhor fluxo hídrico indireto (erosão), favorecendo a estruturação e sucessão vegetal, bem como estimulando a transformação e ciclagem dos nutrientes (PORRAS-SORIANO et al., 2009).

Colodete et al. (2014) propôs modelos resumidos sobre o papel dos FMAs no estabelecimento da biocenose e ambientes impactados, bem como na colonização micorrízica arbuscular com suas estruturas principais. O desenvolvimento de tecnologias que permitam a semeadura direta de espécies de reflorestamento usando dupla inoculação com FMAs e bactérias fixadoras de nitrogênio (BFN) é um aspecto de grande interesse. É sugerido que os fungos mais generalistas em suas relações simbióticas devem ser escolhidos para o uso dos FMAs no reflorestamento com espécies nativas. Fungos com ampla eficiência simbiótica têm maior potencial de revegetação porque colonizam e funcionam bem em vários hospedeiros, facilitando a diversidade e a sucessão vegetal.

A recuperação da comunidade microbiana do solo é um passo fundamental para a restauração e uso sustentável do solo, devido à sua importância e diversidade. Os fatores mais importantes para avaliar o processo de recuperação de áreas afetadas pela mineração são a vegetação e as características física, químicas e biológicas do solo (SANTOS et al., 2016). No entanto, as mudanças nas propriedades físicas e químicas do solo são precedidas por mudanças na comunidade microbiana. Como resultado, essas mudanças mostram situações de estresse ou recuperação do ambiente com mais rapidez e eficiência (UPADHYAY et al., 2017; JORDÃO, 2018).

Devido à estrutura física do tecnossolo, ou solo criado pela atividade humana, nas áreas com depósitos de rejeito de minério de ferro resultantes do rompimento da barragem de Fundão, as condições de desenvolvimento das plantas são desfavoráveis. Há baixa disponibilidade de nutrientes ou excesso de alguns compostos, diminuição da biomassa microbiana e consequente mortalidade das plantas (SANTOS et al., 2019). A inoculação de fungos micorrízicos acelera o crescimento da plântula, melhorando as qualidades nutricionais de fósforo e nitrogênio, bem como aumentando a resistência às condições ambientais, especialmente no campo, onde o choque de transplante é a principal causa de mortalidade de mudas (LAHCEN et al., 2012). Estudos mostram que os FMA podem sobreviver e crescer em terras que foram destruídas pela mineração. Além disso, a aplicação de fungos durante o plantio reduz a necessidade de fertilizantes químicos, o que melhora a estrutura do solo no futuro (VERMA e VERMA, 2016).

Estudar os benefícios dos FMAs para o crescimento das plantas pode levar à implementação em programas de recuperação de áreas contaminadas pela mineração (KIMURA e SCOTTI, 2016). Esses simbiontes do sistema radicular desempenham várias funções diferentes, o que os torna essenciais para a aquisição de vários nutrientes limitantes, aumentam a diversidade das plantas, a capacidade competitiva e a absorção de nutrientes, contribuindo para o sucesso da revegetação (JASPER, 1994). Isso se deve ao fato de que eles

auxiliam em funções essenciais do ecossistema melhorando o desenvolvimento das espécies vegetais em regiões onde a mineração de ferro teve um impacto (VAN DER HEIJDEN et al., 2008; VAN DER HEIJDEN e HARTMANN, 2016; LEAL et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2017; PRADO et al., 2019; SILVA et al., 2018).

Os FMAs aumentam a produção de glomalina, uma glicoproteína que contribui para a agregação do solo e sua estabilidade, promovendo a ligação entre as partículas de solo e melhorando sua resistência à erosão, e ácido húmico, substâncias orgânicas que melhoram a estrutura do solo, aumentam sua fertilidade, estimulam o crescimento das plantas e favorecem a atividade microbiana (JORDÃO, 2018; KIMURA e SCOTTI, 2016). Estudos na região de Mariana demonstraram que a produção de glomalina pelos FMA e outras alterações nos parâmetros biológicos impactam diretamente a estrutura do solo. Devido à sua alta tolerância a ambientes degradados, algumas espécies de FMA são de interesse (CHAGNON et al., 2013), como observado por Leal et al. (2016), o *Glomus* está associado a ambientes com altas concentrações de Zn, Cu, Cd e Pb, assim como espécies do gênero *Acaulospora*.

Os FMAs estão associados a cerca de 80% das espécies de plantas terrestres, conforme afirmado por Smith e Read (2008). Soares e Siqueira (2008) abordam os efeitos dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) na absorção de metais, destacando que, embora aumentem essa absorção, os metais ficam preferencialmente retidos nas raízes micorrizadas, o que implica que os FMA não são capazes de extrair os metais do solo, mas podem alterar sua biodisponibilidade. Como resultado, eles podem ser usados para restaurar locais que sofreram danos. Os FMAs são essenciais para os processos de revegetação e restauração devido ao fato de ocuparem vários habitats e desempenham uma variedade de funções no ambiente porque permitem a sobrevivência de plantas e animais no campo, principalmente em locais onde ocorreram desastres ambientais como o da Barragem Fundão em Mariana-MG (PRATES JÚNIOR et al., 2021).

A revegetação de áreas impactadas pela deposição de rejeitos de mineração, como a ocorrida no rompimento da barragem Fundão em Mariana – MG, está intimamente ligada à contribuição dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), que interagem com as plantas, facilitando a absorção de nutrientes e água, além de promoverem a estabilidade do solo (Teixeira, 2015). A diversidade de FMAs tende a aumentar ao longo do tempo em áreas de revegetação, com a maior diversidade sendo registrada nas pilhas de rejeito, comparada a outras áreas de canga e cerrado, o que indica a recuperação do solo e a promoção de condições mais favoráveis para o crescimento da vegetação nativa (Teixeira, 2015).

A sucessão ecológica dos FMAs tem mostrado uma dinâmica de aumento de diversidade nas áreas de revegetação ao longo do tempo, como foi observado nas áreas revegetadas com gramíneas e leguminosas, que apresentaram um aumento na diversidade de FMAs (Prado, 2020). O aumento da colonização micorrízica nas áreas de revegetação reflete as melhorias nas condições do solo e o favorecimento das plantas nativas. A monitorização periódica da diversidade fúngica tem se mostrado essencial para avaliar o progresso da reabilitação e garantir a continuidade da biodiversidade nas áreas afetadas (Prado, 2020).

A revegetação resulta também na recuperação de atributos do solo, como a agregação e a absorção de nutrientes, processos que são influenciados pela ação dos FMAs, que favorecem a estabilidade estrutural do solo e a resistência a estresses ambientais (Santiago, 2018). A inoculação com FMAs nativos, combinada com a revegetação, contribui para o aumento da colonização micorrízica e dos teores de glomalina no solo, o que facilita o retorno das espécies nativas e o processo de recuperação das áreas afetadas por rejeitos de mineração (Junqueira, 2020; Kemmeier, 2019).

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Avaliar o potencial de propagação e eficiência de fungos micorrízicos arbusculares em áreas afetadas pela deposição do rejeito de minério de ferro em diferentes tempos de revegetação, em Mariana, Minas Gerais, Brasil.

3.2 Específicos

Avaliar o número total de esporos e determinar da colonização micorrízica de FMAs de campo (áreas com diferentes idades de revegetação) e em casa de vegetação.

Comparar os parâmetros avaliados nas áreas de revegetação com os obtidos de uma área referência, que seja semelhante às condições das áreas antes do rompimento da barragem, para entender as mudanças e o impacto da degradação.

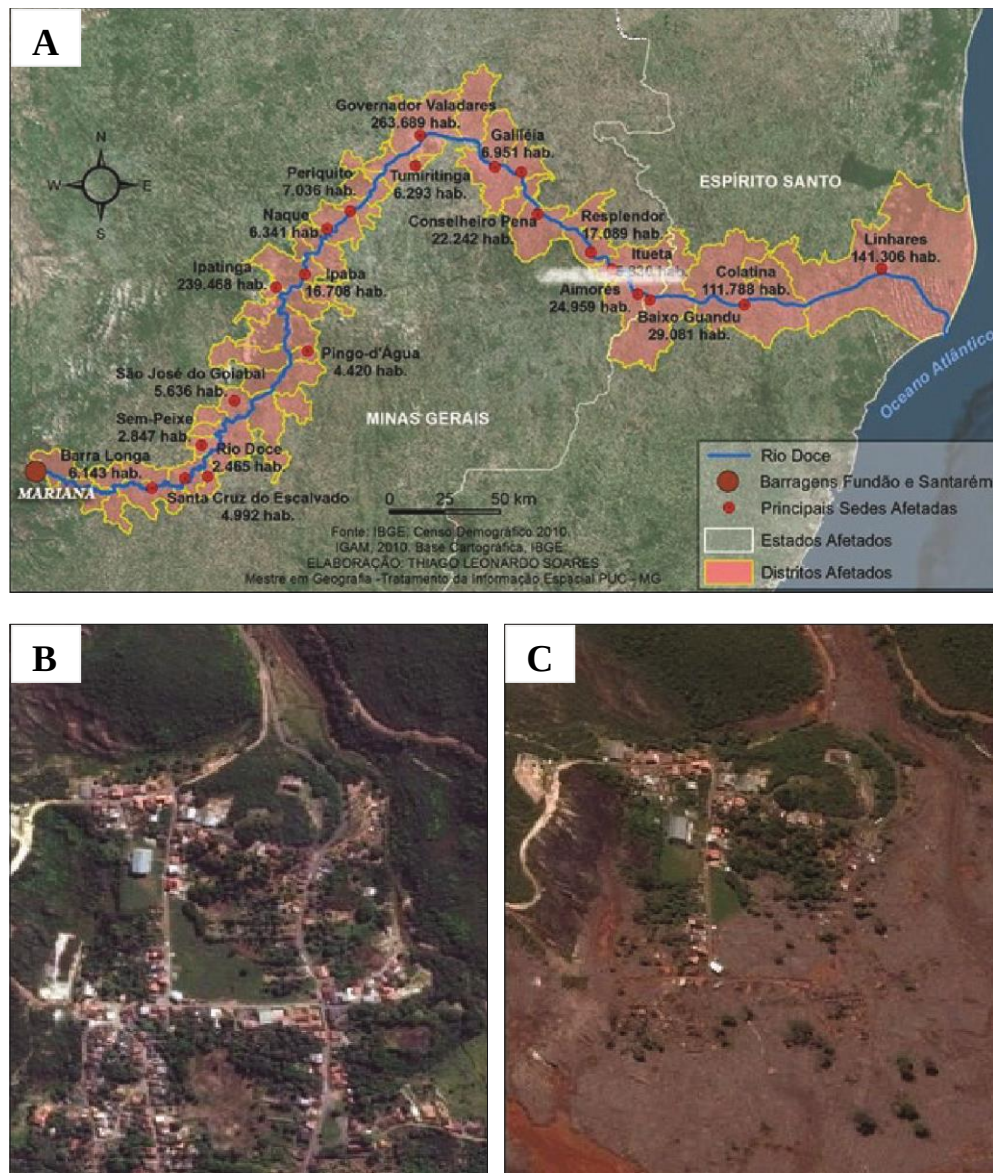
Comparar a eficiência dos FMAs para o processo de crescimento do Ipê (espécie nativa) das áreas em diferentes anos de revegetação com a referência.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Mariana em Minas Gerais, nas margens do Rio Gualaxo do Norte, na Bacia do Rio Doce, em áreas impactadas pela deposição do rejeito de mineração de ferro oriundo do rompimento da Barragem do Fundão, localiza no distrito de Bento Ribeiro em Mariana, MG (Figura 1).

Figura 1. Localização da barragem com o percurso do Rio Doce atingido (A) e antes (B) e depois (C) do distrito de Bento Ribeiro com rejeitos de mineração.



Fonte: Armada (2021).

A região apresenta características climáticas típicas da região Sudeste do Brasil, com um clima tropical de altitude, marcado por uma estação chuvosa no verão e uma estação seca no inverno, submetido também a outros fenômenos como El Niño e La Niña (ALVARES et al., 2013). A vegetação nativa da região é composta por formações florestais de Mata Atlântica e Cerrado, entre as espécies comuns estão árvores como embaúbas, guapuruvus, ipês e jacarandás, arbustos como quaresmeiras e alecrins, além de plantas herbáceas e vegetação aquática, assim como a ripária ao longo dos cursos d'água (FRANÇA e STEHMANN, 2013), que desempenha um papel crucial na manutenção da saúde dos ecossistemas aquáticos e terrestres, fornecendo uma série de serviços ecossistêmicos (PFEIFER et al., 2022).

O tipo de solo na região é predominantemente argiloso, com classes variando de Cambissolos à Latossolos, esses com características de terem níveis de fertilidade médio a elevados, dependendo da localização (SILVA, 2023; DINIZ et al., 2021). Após o acidente houve deposição de rejeito de mineração de ferro contendo material de tamanho de areia fina e silte, com baixíssimo teor de matéria orgânica, alto teor de óxidos de silício, ferro e manganês. Essa deposição impactou o solo de uma forma a alterar algumas propriedades como infiltração, densidade, teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, outras propriedades químicas do solo, chegando a ser considerados então com um tecnossolo (BOTELHO e MELO, 2019; LACAZ et al., 2017).

A principal questão associada ao rejeito depositado nas áreas afetadas são que esse material dificulta o processo de recuperação dessas áreas. Com o objetivo de mitigar os impactos do acidente, estão sendo realizados processos de revegetação nas áreas afetadas. Uma das estratégias adotadas é o plantio de árvores, arbustos, cipós, epífitas e gramíneas, selecionados conforme as características específicas de cada local, visando à recomposição do ambiente original. Inicialmente, foi utilizado um mix emergencial composto por espécies leguminosas e gramíneas (ENGEL e PARROTTA, 2001; RODRIGUES et al., 2009; BRANCALION et al., 2015). Além disso, o acidente teve impactos sociais significativos, incluindo o deslocamento forçado de comunidades, perda de meios de subsistência e danos à saúde e bem-estar das populações locais, ressaltando que a presença humana também faz parte e interage com o ecossistema (LOPES, 2016).

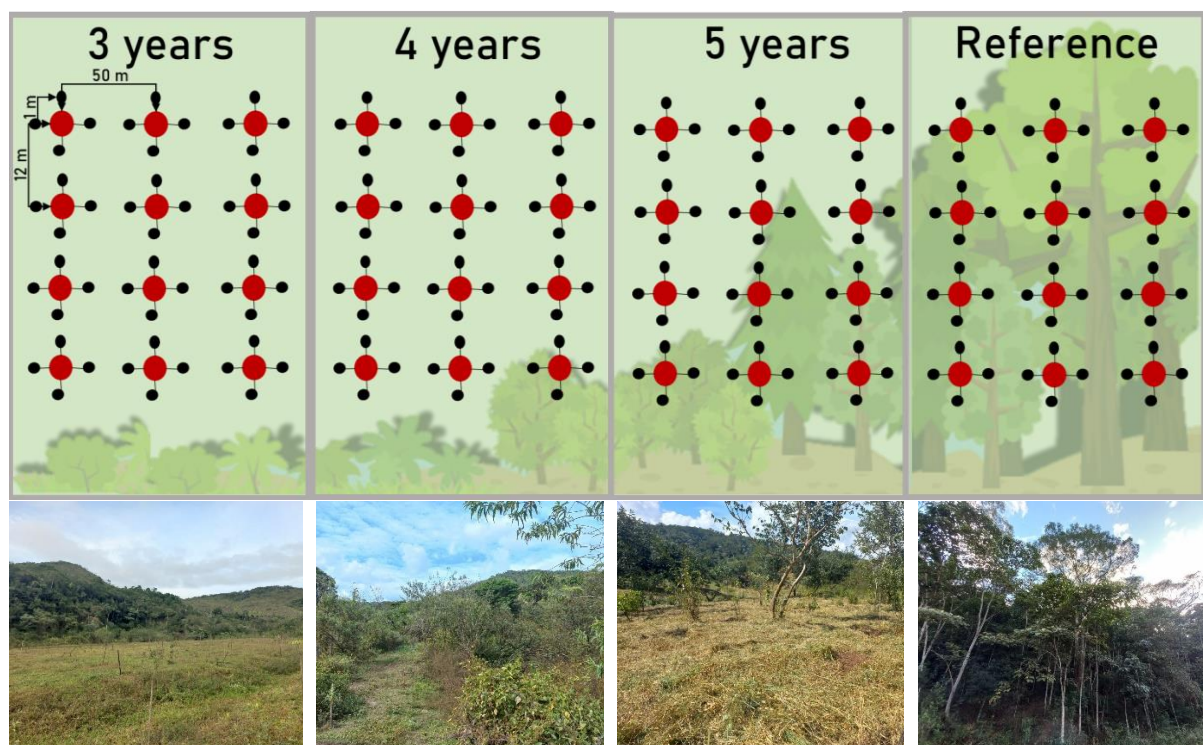
4.2 Coleta em campo

A coleta do material foi realizada no ano de 2023, em locais representativos que visassem mostrar o comportamento dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) através dos

manejos realizados contemporâneos à presença do rejeito. Logo, foram selecionadas três áreas em diferentes estágios de revegetação: 3, 4 e 5 anos, respectivamente, e uma área de referência (essa com características semelhantes a anterior ao acidente).

As coletas foram feitas em transectos distanciados a 50 m, A, B e C, em cada um deles foram coletadas quatro amostras compostas de quatro mostras simples, coletadas em um raio de um metro, equidistantes a 12 m, perfazendo um total de 48 amostras (figura 2). Tal amostragem consiste em um delineamento 4x12, quatro tratamentos e doze repetições. Após coletadas as amostras seguiram para o Laboratório de Microbiologia da Universidade Federal de Lavras, onde lá foram armazenadas para posterior avaliação.

Figura 2. Esquema de coleta nas áreas de revegetação e na área de referência.



Fonte: Do autor (2025).

Para realização da caracterização química do solo coletado foram determinados o pH em água, fósforo e potássio disponíveis (extrator Mehlich⁻¹), cálcio, magnésio, alumínio e sódio trocáveis foram extraídos via solução de KCl, além de micronutrientes (zinco, ferro, manganês, cobre, boro e enxofre) e o carbono orgânico do solo por via úmida, sendo determinados posteriormente, soma de bases, capacidade de troca de cátions potencial e efetiva, matéria orgânica (MO) e saturações por base e por alumínio (Quadro 1) (Teixeira et al., 2017).

4.3 Número total de esporos de FMA em amostras de campo

Para determinar a densidade de esporos de FMAs foi realizada a extração de esporos dos materiais por via peneiramento úmido (GERDEMANN e NICOLSON, 1963), que consiste em misturar uma amostra de 50 g com água em um recipiente e agitar para separar os esporos dos grânulos de solo. A mistura solo-água foi passada através de peneira de 0,710 mm e 0,053 mm para reter os esporos enquanto o material de solo restante foi descartado, repetindo o processo por algumas vezes.

Logo após, os esporos retidos nas peneiras foram então recuperados e lavados em água para remover qualquer resíduo de solo aderido. Em seguida, os esporos foram agitados em centrífuga por 3 minutos com 3000 rpm em tubo Falcon com água, após foi extraído excesso de água com cuidado, e adicionado solução de sacarose 50% e agitado em centrífuga novamente, mas agora por 2 minutos a 2000 rpm. Após término, o sobrenadante foi cuidadosamente peneirado em peneira de 0,053 mm e lavado com água para retirada da sacarose presente,

Em seguida seguiu-se para a contagem, com a padronização para 20 ml de todas as amostras, e transferiu-se esse para a placa canelada, já dividida em quadrantes (A e B). A observação das canaletas foi feita em lupa binocular, contando-os em uma canaleta por vez, repetindo a contagem pelo menos duas vezes, em caso de variação de mais de 10%, foi realizado uma terceira vez, sendo anotado então o seu valor. Em casos de diluição, considerou-se o valor da diluição.

4.4 Cultivo em armadilha para multiplicação

Para avaliar as condições do solo e a interação com organismos como os FMAs, foi realizada a multiplicação em casa de vegetação por meio do cultivo em armadilha (Figura 3) (MOORMAN e REEVES, 1979), permitindo observar a resposta desses organismos ao material de rejeito e ao processo de revegetação do solo. Nessa, foram formulados em vasos com capacidade de 1000 ml, adicionados areia autoclavada e sobre a areia 50 g do material oriundo da coleta de campo (referência ou rejeito), as plantas utilizadas como isca foram: *Brachiaria brizantha* - BRS Piatã, *Helianthus annuus* L. e *Glycine max* L. uma Poaceae, uma Asteraceae

e uma Fabaceae, respectivamente, semeadas em alta densidade de semeadura, todas anteriormente desinfetadas.

Figura 3. Cultivo armadilha em casa de vegetação para multiplicação de FMAs.



Fonte: Do autor (2025).

Desse modo, sendo elaborados 48 vasos divididos em 4 tratamentos (3, 4 e 5 anos de revegetação e referência), foi realizada uma adubação parcial, com fósforo à 50% do recomendado com base na média da recomendação para as três culturas, recomendação com base na análise dos solos das áreas (Quadro 1). Todo esse processo foi realizado para que se tenha a máximo de esporulação, tanto nas áreas de rejeito sob revegetação, quanto na área de referência.

Quadro 1. Soil analysis of the study areas.

Area	pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	BS	t	T	V	m	OM	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
		---- mg/dm ³ ----			----- cmolc/dm ³ -----							----%---	g/kg		----- mg/dm ³ -----					
Ref	4,0	35,6	0,1	5,0	0,2	0,3	2,1	11,0	0,6	2,7	11,5	4,7	79,7	4,0	0,8	116,4	6,5	0,2	0,1	6,6
Rev1	5,6	26,6	1,1	13	1,3	0,8	0,1	1,3	2,1	2,9	3,4	61,9	1,9	1,9	0,7	176,5	78,8	0,4	0,1	4,4
Rev2	5,1	42,1	0,3	3,8	0,3	0,4	1,9	10,3	0,5	2,4	10,9	5,4	77,3	4,0	0,8	116,2	8,7	0,2	0,1	8,7
Rev3	5,7	34,02	1,5	12	1,6	0,9	0,1	1,9	2,5	2,5	4,3	58,5	0,7	2,6	0,5	295,6	91,6	0,7	0,2	3,7

Ref: reference; Rev1: revegetation initiated in 2018; Rev2: revegetation initiated in 2019; Rev3: revegetation initiated in 2020; K: potassium; P: phosphorus; Na: sodium; Ca: calcium; Mg: magnesium; Al: exchangeable aluminum; H+Al: potential acidity; BS: base sum; t: effective cation exchange capacity; T: potential cation exchange capacity; V: base saturation; m: aluminum saturation; OM: soil organic matter; Zn: zinc; Fe: iron; Mn: manganese; Cu: copper; B: boron; S: sulfur. Fonte: Do autor (2025).

Durante o período em casa de vegetação, foram realizadas a irrigação periódicas, porém, houveram períodos em que foi interrompida, para ocasionar estresse, assim como o corte da braquiária, com o mesmo intuito, após quatro meses houve a desmontagem do experimento, onde foi separado solo-inóculo (utilizado no teste de eficiência) e raízes, para ser realizados uma nova leitura de densidade de esporos (item 4.3) e ser realizada colonização micorrízica (item 4.5).

4.5 Determinação da colonização micorrízica

Após desmonte do experimento em casa de vegetação, houve a separação das raízes totais e dessas foram extraídas algumas raízes finas (0,5 g) para realização da análise de colonização, que procede à coloração das raízes, metodologia de Philips e Hayman (1970), com modificações por Koske e Gemma (1989). Esse, é feito colocando a amostragem das raízes em tubos plásticos e adicionando solução de hidróxido de potássio a 2,5% (NOVAIS et al., 2017).

Após isso, os mesmos foram aquecidos em banho maria a 90 °C de 10 a 60 minutos, decorrido o tempo, as mesmas devem ser lavadas novamente, utilizando uma peneira para tamisação, após isso, adicionar solução de ácido clorídrico (HCl) a 1%, deixando-os assim por duas horas. Após esse período, foi realizada a retirada do excesso da solução, pois há uma necessidade de que as raízes estejam acidificadas para o processo posterior, que é a adição aos tubos de azul de tripano a 0,05% em glicerol acidificado, sendo levados a banho maria novamente a 90 °C de 10 a 30 min, quando necessária, a solução de tripano deve ser reservada em recipiente, pois é passível de ser usada novamente.

As raízes, após o procedimento, foram guardadas em recipiente escuro contendo glicerol acidificado e sem corante, para que possa ter a descoloração das células vegetais que ainda persistirem em manter suas cores. Uma grande observação dar-se-á quando não tiver a possibilidade de realização de todo procedimento de imediato. Dessa maneira, necessita que essas sejam armazenadas em frascos com álcool etílico a 70%, e quando forem novamente utilizadas devem ser lavadas antes de serem novamente coradas com a solução de azul de tripano em glicerol acidificado.

A avaliação da colonização foi feita por meio da técnica de “grid line” (GIOVANETTI e MOSSE 1980), que consiste em elaborar um círculo no computador da área de uma placa de petri, sendo esse círculo composto por área com quadrados de 1,27x1,20 cm. Após a etapa de coloração e elaboração do círculo, o círculo foi posto no fundo da placa e as raízes sobre esse, sendo distribuídas de forma homogênea.

A contagem da presença se dará por meio da observação das linhas horizontais da grade, onde em cada linha deve-se verificar se há interseção de raízes e se nesta raiz há a presença de estruturas do fungo, marcando em sim ou não. Após concluir a última linha, realizar o giro de 90° e repetir o processo avaliando as demais linhas da mesma maneira. Obtidas as respostas sim e não, se procederá ao cálculo de percentagem de colonização micorrízica (%CM).

4.6 Contribuição dos FMAs para revegetação de plantas nativas

Após determinação da quantidade de esporos e determinação da colonização micorrízica dos FMAs de campo e casa de vegetação, bem como, a multiplicação em cultivo armadilha e após comparação com a área de referência, o solo inóculo foi utilizado em um teste de contribuição para desenvolvimento de espécie nativa. Esse procedimento consistiu, novamente, em plantio, porém, agora com espécie nativa pioneira (sementes adquiridas no campus – UFLA): ipê-roxo (*Tabebuia heptaphylla* (Mart.) Mart.) e com o solo inóculo do material multiplicado das áreas em estudo.

Nas sementes para além da produção das mudas, houve plantio para teste de germinação, afins de avaliar o comportamento das mesmas em diferentes condições. Dessa forma, foram utilizados três substratos distintos: tecnossolo, areia e latossolo-vermelho, todos esterilizados.

A escolha do ipê se deu por critérios botânicos e edafoclimáticos, pois, a espécie é nativa da região, que garante um isolamento do efeito do clima sobre ela e uma adaptabilidade (CARVALHO, 1994), além disso, a época de florescimento e geração de sementes precisava coincidir com data de implantação do experimento, pois há perda de viabilidade em sementes armazenada (BORBA FILHO e PEREZ, 2009). Ademais, a mesma é pioneira (LORENZI, 1992) e essencial para restauração do ecossistema anterior, o que garante maior responsividade aos tratamentos e resultados o mais próximo do real possível do que aconteceria no ambiente .

Para o teste foram elaborados vasos com capacidade de até 5 litros, nesse foram adicionados substrato a base de tecnossolo (solo afetado pela deposição de rejeito) e solo inóculo (amostrados dos vasos onde houveram a multiplicação das áreas de revegetação e referência), na qual a quantidade de solo inóculo utilizado foi proporcional à quantidade de esporos, o substrato foi adubado de acordo com a necessidade, novamente com 50% de fósforo, a partir disso foram elaborados os tratamentos: quatro áreas coletadas e uma somente com tecnossolo adubado e esterilizado (Quadro 2).

Quadro 2. Demonstração dos tratamentos utilizados no teste de contribuição dos FMAs.

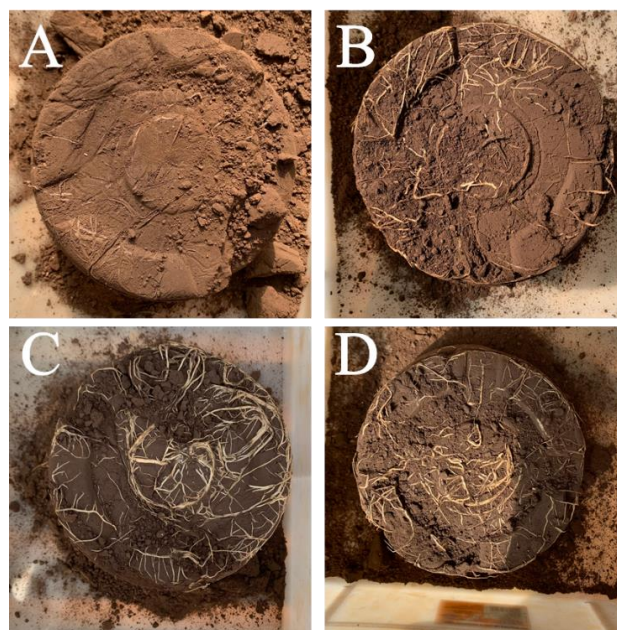
Ipê-rosa (<i>Tabebuia heptaphylla</i> (Mart.) Mart.)	
Ref	Solo de referência
Rev1	Solo da revegetação 1(3 anos)
Rev2	Solo da revegetação 2 (4 anos)
Reve	Solo da revegetação 3 (5 anos)
W	Testemunha

Fonte: Do autor (2025).

Dessa forma, o delineamento foi inteiramente casualizados (DIC) com 5 tratamentos, 10 repetições, configurando 10x5, totalizando 50 parcelas. As espécies foram semeadas em bandejas com areia estilizadas, após a germinação e o período de 90 dias, foram realizados o seu transplantio para os vasos com seus respectivos tratamentos, onde ficaram sob irrigação oscilada até o período de avaliação final em casa de vegetação com observações periódicas.

Após 127 dias foi realizada a colheita do experimento. Sendo contabilizadas as plantas mortas e vivas, já suas raízes (figura 4) foram separadas 1 grama da qual foi realizada uma análise de colonização micorrízica, para relacionar os efeitos observados à associação com FMAs. Já do solo extraído no processo de separação das raízes, foi realizada uma nova densidade de esporos, verificando o comportamento dos FMAs mediante um ambiente próximo ao estado atual.

Figura 4. Fundo de vasos com raízes de ipê-roxo com solo-inóculo de área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.



A: solo inóculo com 3 anos de revegetação; B: solo inóculo com 4 anos de revegetação; C: solo inóculo com 5 anos; D: solo inóculo de referência. Fonte: Do autor (2025).

4.7 Análises dos dados

Após obtenção dos dados foram realizadas análises no software STATISTICA versão 7 (Statsoft, 2004). A densidade esporos e potencial colonização obtidos do experimento de campo e em armadilhas, tiveram seus dados analisados pela geração de média nas diferentes áreas e tratamentos, com posterior comparação por meio de ANOVA com teste t de tukey, a 5% de probabilidade, para que fosse possível verificar se houve diferença nas áreas sob revegetação quando comparadas à referência.

Ainda da densidade de esporos de campo, posterior ao teste de esfericidade de Bartlett ($p < 0,05$) e Índice de Adequação da Amostra de Kaiser-Meyer-Olkin, foi realizada uma análise de componentes principais, por meio da análise multivariada (ANOVA), analisando atributos químicos do solo e o comportamento da densidade do solo, além de uma análise de correlação. Já para comparar o potencial de propagação, utilizando a densidade de campo e cultivo armadilha de cada tratamento, foi utilizado o teste t de student nas suas médias, pois trata-se apenas de dois tratamentos.

Por último, na fase teste de eficiência do solo inóculo, o vigor das mudas, densidade de esporos e colonização micorrízica, foram comparados os efeitos de cada solo inóculo sob a planta nativa, o ipê, e utilizando uma testemunha (somente tecnossolo) para demonstrar como se comportaria uma planta nativa caso não houvesse o processo de revegetação e todo seu manejo aliado a ele.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

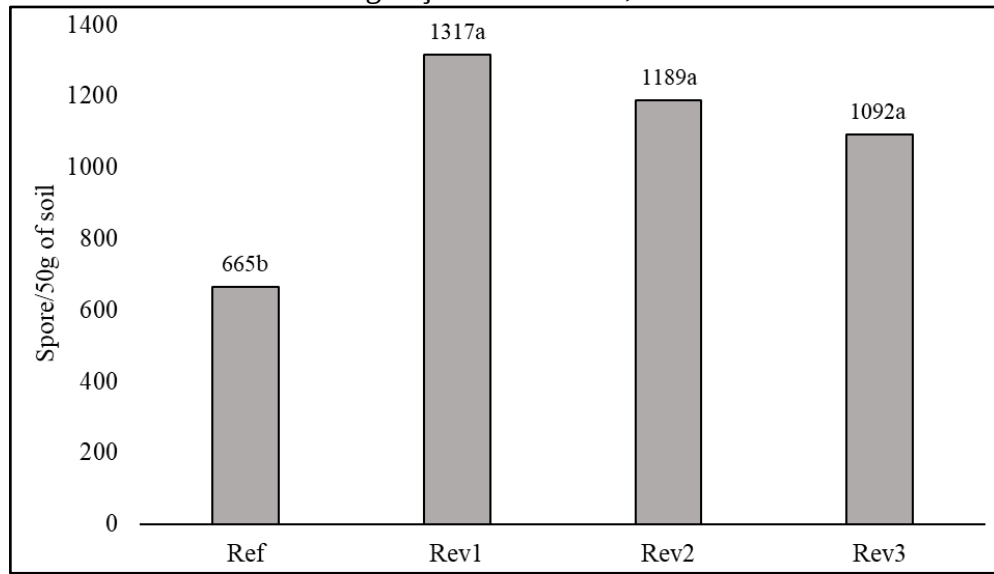
5.1 Potencial de propagação do FMAs

Na Figura 5, é possível observar o comportamento da densidade de esporos de campo nos solos de áreas impactadas por resíduos de mineração com ferro e na área de referência. Verificou-se um valor expressivo de esporos na área de referência, o que pode ser atribuído à alta diversidade do bioma Mata Atlântica, reconhecido como um dos mais ricos do mundo, com uma imensa variedade de plantas que estabelecem associações com FMAs. Esse resultado corrobora os achados de Teixeira et al. (2017), que estudaram FMAs em áreas de mineração no quadrilátero ferrífero.

Por outro lado, as áreas impactadas sob revegetação apresentaram valores elevados de esporos, que diferem estatisticamente da área de referência. Esse comportamento é esperado, uma vez que a introdução de novas características ao solo afeta todo o ecossistema. A

reabilitação dessas áreas requer um longo período de tempo. Esse cenário foi destacado por Silva et al. (2023), ao analisar o comportamento dos FMAs em florestas da Mata Atlântica. O estudo demonstrou diferenças significativas entre florestas maduras, com mais de 60 anos, e florestas secundárias, com menos de 38 anos.

Figura 5. Média de densidade de esporos em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.



Ref: referência; Rev1: 3 anos de revegetação; Rev2: 4 anos de revegetação; Rev3: 5 anos de revegetação. Letras diferentes em diferentes tratamentos se diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste t de tukey. Fonte: Do autor (2025).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) esporulam como estratégia de sobrevivência, seja em condições naturais, para perpetuação da espécie ou ao final do ciclo de vida, ou sob estresse, também com a finalidade de perpetuação. Diversos fatores contribuem para esse processo, destacando-se as mudanças na vegetação e nas características do solo. Alterações insustentáveis nesses ambientes podem intensificar a esporulação. Além disso, a modificação da vegetação pode ocasionar tanto perdas quanto aumentos na diversidade, o que também influencia na quantidade de esporos. Espécies vegetais pioneiras, comuns em revegetações, mantêm alta associação com FMAs, o que pode explicar a elevada esporulação observada (MUNYANZIZA et al., 1997).

A análise dos atributos químicos do solo apresentada na Tabela 1 revela alterações significativas entre a área de referência e as áreas sob revegetação, indicando que o rejeito de mineração impactou profundamente a composição edáfica. Dentre os atributos avaliados, destacam-se o pH, alumínio (Al), ferro (Fe), saturação por bases (V%), matéria orgânica (MO) e densidade de esporos (DEC) como os mais sensíveis à interferência do rejeito e ao tempo de revegetação.

Tabela 1. Média dos atributos químicos e densidade de esporos de campo em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.

Áreas	pH	K	Na	Ca	Al	T	Fe	Mn	S	DEC	V	MO
		-----cmolc.kg ⁻³ -----								E.50ml-1	%	g.kg ⁻¹
Ref	4.00c	0.10a	0.02b	0.20c	1.98a	11.36a	0.07ab	0.00b	4x10-4a	665 b	4.92b	41.2a
Rev1	5.59a	0.08a	0.05a	1.48b	0.03b	3.90b	0.12a	0.03a	2x10-4b	1317a	61.09a	22.1b
Rev2	5.06b	0.05b	0.02b	1.93a	0.02b	4.19b	0.06b	0.04a	1x10-4b	1189a	57.83a	19.8b
Rev3	5.70a	0.06b	0.03b	1.07b	0.00b	3.11b	0.09ab	0.04a	2x10-4b	1092a	61.72a	16.3b

Ref: referência; Rev1: 3 anos de revegetação; Rev2: 4 anos de revegetação; Rev3: 5 anos de revegetação; T: CTC efetiva; DE: densidade de esporos; V%: saturação por base; MO: matéria orgânica. Médias com letras diferentes na mesma coluna se diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste t de tukey. Fonte: Do autor (2025).

Nas áreas revegetadas (Rev1, Rev2 e Rev3), o pH do solo apresentou aumento significativo em relação à área de referência, cujos valores estavam em torno de 4,0, classificados como altamente ácidos. As áreas revegetadas apresentaram pH entre 5,06 e 5,70, com diferenças estatísticas evidentes ($p < 0,05$). Esse aumento pode estar associado à presença de corretivos naturais do rejeito ou ao efeito de plantas revegetantes e fungos micorrízicos sobre a rizosfera (DIAS et al., 2008; SALIM et al., 2025). O pH, além de influenciar diretamente a disponibilidade de nutrientes, tem papel crucial na estruturação da comunidade microbiana do solo, sendo positivamente correlacionado com a densidade de esporos de FMAs (PRADO et al., 2019).

O teor de alumínio (Al) foi outro fator que apresentou mudanças expressivas: na área de referência, o Al alcançou 1,98 cmolc kg⁻¹, enquanto nas áreas revegetadas os valores foram praticamente nulos. Essa redução é benéfica, já que o alumínio em solos ácidos pode ser tóxico para plantas e microrganismos, afetando a absorção de nutrientes e o crescimento radicular (SALIM et al., 2025; HILDEBRANDT et al., 2007). A remoção ou complexação do Al pode estar relacionada ao aumento do pH e à ciclagem de matéria orgânica.

Outro aspecto notável é o comportamento do ferro (Fe), cujos teores foram significativamente mais elevados nas áreas revegetadas, principalmente em Rev1 (0,12 cmolc kg⁻¹), quando comparadas à referência (0,07 cmolc kg⁻¹). Essa elevação é característica da composição do rejeito oriundo da atividade mineradora (MERGULHÃO et al., 2019), e pode representar risco de estresse oxidativo para fungos e plantas, especialmente na forma solúvel de Fe³⁺ (HILDEBRANDT et al., 2007).

A saturação por bases (V%) foi substancialmente maior nas áreas revegetadas (57–61%) em comparação à referência (4,92%), o que sugere um avanço na melhoria da fertilidade do solo, favorecendo a colonização micorrízica e a recuperação da microbiota simbiótica (Prado

et al., 2019; Orłowska et al., 2025). A matéria orgânica (MO), embora ainda inferior nas áreas revegetadas, apresentou padrões coerentes com o tempo de revegetação: áreas com mais tempo (Rev3) mostraram menor MO ($16,3 \text{ g kg}^{-1}$), o que pode estar associado à maior atividade de decomposição microbiana ou menor aporte de resíduos vegetais (DIAS et al., 2008).

Em relação à densidade de esporos (DEC), as áreas revegetadas apresentaram valores superiores, com destaque para Rev1 (1.317 esporos/50 mL) e Rev2 (1.189 esporos/50 mL), em contraste com a referência (665 esporos/50 mL). Essa diferença é um forte indicativo de reestruturação da comunidade de FMAs em resposta à revegetação, reforçando a hipótese de que o tempo de revegetação e as condições edáficas (pH, V%, MO) são determinantes na recuperação fúngica (PRADO et al., 2019; SALIM et al., 2025).

O potássio (K) apresentou leve redução nas áreas revegetadas, mas sem impacto negativo claro, enquanto o manganês (Mn) e o enxofre (S) também mostraram variação, com o S significativamente menor nas áreas revegetadas, o que pode estar relacionado à menor lixiviação ou incorporação de material orgânico.

Em síntese, os dados evidenciam que o rejeito alterou fortemente a composição química do solo, mas a revegetação tem promovido gradualmente a recuperação da fertilidade e da funcionalidade microbiológica, com destaque para a redução de Al, elevação do pH e aumento da densidade de FMAs. A resposta positiva dos FMAs à revegetação, mesmo em solos com metais pesados, reforça seu potencial como indicador de sucesso ecológico e como agente facilitador da restauração de solos degradados (TEIXEIRA et al., 2017; VERMA & VERMA, 2016; ORŁOWSKA et al., 2025).

Além disso, a presença de outros materiais associados ao rejeito (Figura 6) pode comprometer a germinação dos esporos, interferindo tanto em seu ciclo de desenvolvimento quanto na viabilidade. A observação de esporos recobertos por um material de coloração alaranjada, de origem ainda desconhecida, reforça essa hipótese, uma vez que tal recobrimento pode atuar como barreira física ou química, impedindo processos essenciais à germinação.

Figura 6. Resíduos encontrados nas áreas de deposição com rejeito sob revegetação e esporos cobertos por material laranja desconhecido.

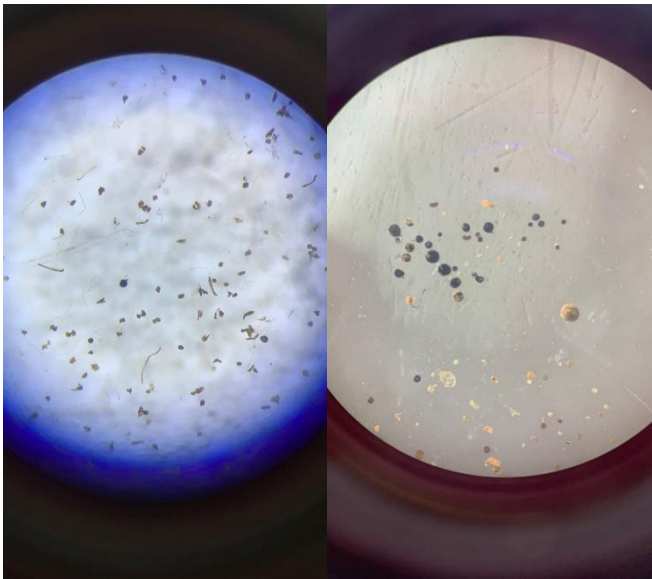


Fonte: Do autor (2025).

Diante desse cenário, reforça-se a hipótese de que alterações significativas estão ocorrendo no ecossistema em que os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) se estabelecem. Apesar da presença dos esporos, observa-se uma tendência de redução nas densidades ao longo do tempo, sugerindo que a revegetação tem impactado negativamente a esporulação. Esse padrão, que já foi relatado anteriormente (CAPRONI et al., 2003), pode indicar uma resposta adaptativa dos FMAs ao estresse ambiental causado pela deposição de rejeitos. Inicialmente, pode ocorrer um pico de esporulação como resposta ao distúrbio, seguido por um decréscimo ao longo do tempo, apontando para uma possível estabilização do sistema e avanço da sucessão ecológica.

Um aspecto relevante identificado por meio da análise visual foi a elevada quantidade de esporos inviáveis nas áreas sob revegetação (Figura 7). Essa condição pode comprometer a diversidade micorrízica local, sobretudo quando comparada à área de referência, evidenciando o estresse ainda presente nesses ambientes, principalmente em decorrência das condições edáficas adversas. A ausência de vegetação nativa limita a disponibilidade de hospedeiros adequados para os FMAs, dificultando o estabelecimento de associações simbióticas. Em um cenário de baixa compatibilidade vegetal e solo degradado, muitos esporos tendem à perda de viabilidade ou à morte (MERGULHÃO et al. 2007).

Figura 7. Esporos encontrados nas áreas estudadas.



À esquerda esporos da área de referência, à direita esporos da área de revegetação com deposição.
Fonte: Do autor (2025).

Os dados indicam correlação positiva entre a densidade de esporos e os teores de pH, Na e Ni (Quadro 3), o que pode refletir um mecanismo de defesa dos FMAs sob condições de estresse ambiental. Barroso (2012) também encontrou maior esporulação em solos com pH mais elevado, sugerindo que a alcalinização induzida pelos rejeitos pode afetar diretamente a resposta simbiote.

Quadro 3. Análise de correlação dos atributos químicos e densidade de esporos em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.

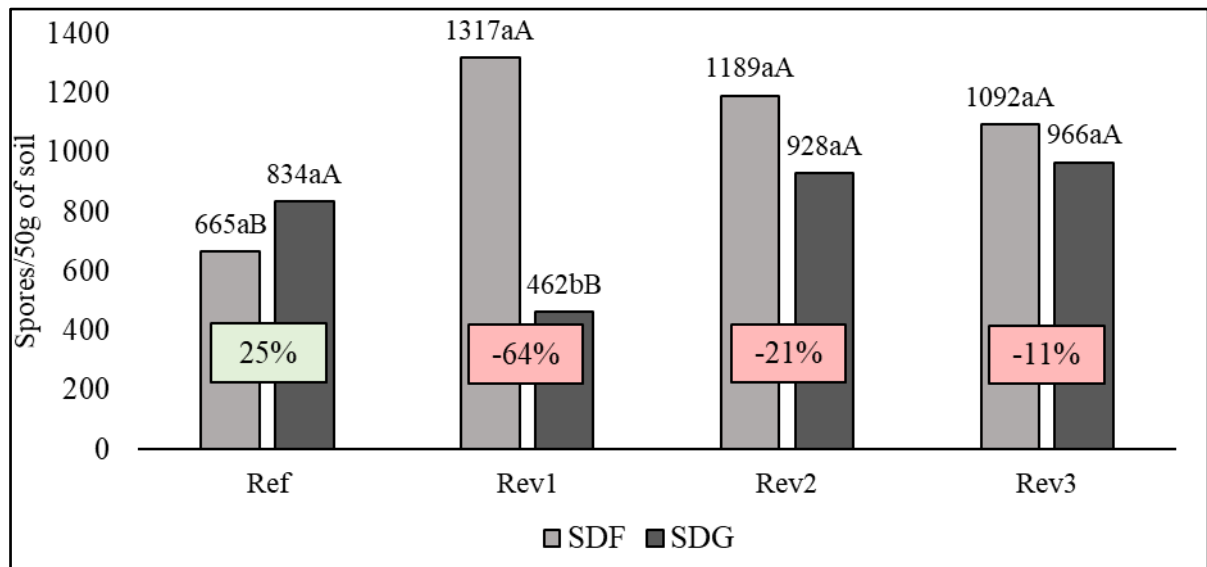
pH	1,00															
K	0,36	1,00														
Na	0,58	0,21	1,00													
Ca	0,73	0,36	0,49	1,00												
Al	-0,81	-0,31	-0,76	-0,64	1,00											
T	-0,81	-0,29	-0,60	-0,57	0,96	1,00										
V	0,86	0,33	0,79	0,72	-0,96	-0,91	1,00									
MO	-0,75	-0,12	-0,49	-0,53	0,87	0,92	-0,83	1,00								
Fe	0,16	0,66	0,09	0,08	-0,18	-0,16	0,13	-0,01	1,00							
Mn	0,66	0,19	0,77	0,59	-0,75	-0,65	0,77	-0,62	0,12	1,00						
S	-0,51	0,14	-0,46	-0,27	0,62	0,63	-0,58	0,57	0,16	-0,42	1,00					
Ni	0,62	0,61	0,59	0,63	-0,57	-0,48	0,61	-0,35	0,55	0,69	-0,09	1,00				
Pb	-0,44	-0,08	-0,53	-0,34	0,67	0,59	-0,66	0,60	-0,01	-0,60	0,39	-0,29	1,00			
DEC	0,54	0,32	0,54	0,40	-0,68	-0,63	0,65	-0,57	0,17	0,48	-0,38	0,52	-0,49	1,00		
	pH	K	Na	Ca	Al	T	V	MO	Fe	Mn	S	Ni	PB	DEC		

T: CTC efetiva; DEC: densidade de esporos de campo; V%: saturação por base; MO: matéria orgânica. Fonte: Do autor (2025).

A Figura 8 apresenta os dados comparativos entre a densidade de esporos observada em campo (SDF) e após o experimento de multiplicação em casa de vegetação (SDG). Embora

diferenças significativas entre os tratamentos já tenham sido constatadas na avaliação de campo, a análise estatística pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) revelou que, sob condições controladas, essas diferenças tendem a se reduzir. A uniformização dos resultados indica uma possível limitação na viabilidade de parte dos esporos oriundos das áreas impactadas, refletindo uma dissociação entre esporulação em campo e funcionalidade simbiótica efetiva.

Figura 8. Comparação da densidade de esporos dentro das áreas e após multiplicação.



Ref: referência; Rev1: 3 anos de revegetação; Rev2: 4 anos de revegetação; Rev3: 5 anos de revegetação. Letras minúsculas iguais no mesmo tratamento indica ausência de diferença significativa a 5% de probabilidade por meio do teste t student. Letras maiúscula iguais em diferentes tratamentos indica ausência de diferença significativa a 5% de probabilidade por meio do teste t de tukey. Fonte: Do autor (2025).

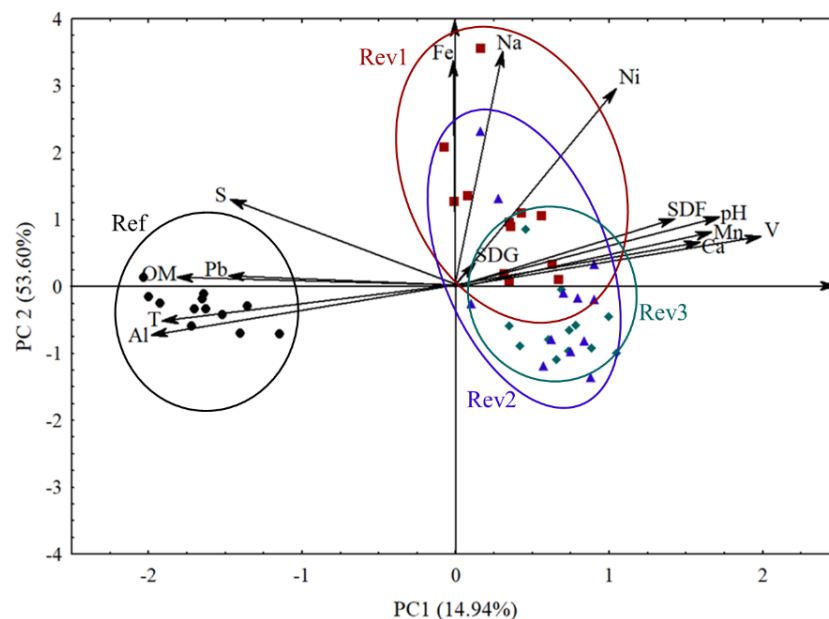
A aplicação do teste t de Student ($p \leq 0,05$), comparando os dados de densidade entre o campo e a casa de vegetação para cada tratamento, confirmou que, apesar da elevada densidade inicial de esporos nas áreas revegetadas, houve redução significativa no número de esporos viáveis após a multiplicação, especialmente nos tratamentos Rev1 e Rev2. Esse padrão reforça a hipótese de que parte dos esporos observados em campo representa estruturas inviáveis ou respostas morfológicas ao estresse ambiental, e não simbiontes ativos. Em contraste, a área de referência (Ref) apresentou um incremento de 25% na densidade de esporos após a multiplicação, evidenciando maior viabilidade e funcionalidade da comunidade micorrízica original, conforme também reportado por Hildebrandt et al. (2007) em solos não impactados.

A análise da variação percentual reforça essas interpretações: Rev1 apresentou redução de 64%, Rev2 de 21% e Rev3 de 11%. O tratamento Rev3, com menor decréscimo, pode indicar um início de reestruturação funcional da comunidade micorrízica, associada à maior estabilidade simbiótica. A capacidade de multiplicação dos fungos micorrízicos arbusculares

(FMAs) em ambiente controlado como um indicativo da viabilidade simbiótica e do potencial de recuperação ecológica das áreas afetadas (GONZÁLEZ-CHÁVEZ et al. 2004).

A análise de componentes principais (Figura 9), que considerou os dois primeiros componentes (PC1 e PC2), responsáveis por 68,54% da variabilidade total dos dados (14,94% por PC1 e 53,60% por PC2), evidenciou a interrelação entre os escores de densidade de esporos (em campo – SDF – e em casa de vegetação – SDG) e os fatores pH, manganês (Mn) e saturação por bases (V%), especialmente associados à área com cinco anos de revegetação (Rev3). As amostras foram agrupadas com base na similaridade multivariada desses atributos químicos do solo e da densidade de esporos, indicando um ambiente com menor estresse químico que favorece a esporulação dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), o que pode refletir positivamente na atividade simbiótica. Comportamento semelhante foi observado em outra análise de componentes principais, na qual os escores de pH e magnésio apresentaram relação inversa à diversidade, sugerindo que certas condições químicas afetam a composição e funcionalidade microbiana (SANTOS, 2019).

Figura 9. Análise de componentes principais(ACP) dos atributos químicos e densidade de esporos em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.



Ref: referência; Rev1: 3 anos de revegetação; Rev2: 4 anos de revegetação; Rev3: 5 anos de revegetação; T: CTC efetiva; SD: densidade de esporos- F-campo, G- casa de vegetação; V%: saturação por base; OM: matéria orgânica.; PC1: componente principal 1; PC2: componente principal 2. Fonte: Do autor (2025).

A área de referência (Ref), representada por círculos pretos, formou um agrupamento bem definido no quadrante esquerdo do gráfico, associado à matéria orgânica (OM), enxofre (S), alumínio (Al) e chumbo (Pb). Esses atributos são característicos de solos com maior

qualidade ambiental, típicos de ecossistemas conservados da Mata Atlântica, sugerindo manutenção parcial da integridade edáfica e microbiológica. A presença de Al e Pb, nesse contexto, reflete características naturais do solo local, sem necessariamente indicar contaminação antrópica.

Por outro lado, as áreas revegetadas apresentaram agrupamentos distintos. A área com três anos de revegetação (Rev1) posicionou-se no quadrante superior direito, associando-se fortemente aos teores de ferro (Fe) e sódio (Na). Essa correlação indica influência direta do rejeito de mineração, rico em óxidos de ferro e outros elementos, e que ainda exerce impacto químico sobre o solo mesmo após três anos de revegetação. A proximidade parcial com Al pode indicar resquícios da composição do rejeito, embora esse elemento tenha maior afinidade com o agrupamento da área de referência.

A área com quatro anos de revegetação (Rev2) apresentou um agrupamento mais central, com maior dispersão entre as amostras. Essa variabilidade pode refletir uma fase de transição na composição edáfica e microbiológica, compatível com um estágio intermediário de recuperação funcional do solo. Rev2 mostrou associação com níquel (Ni) e, em menor grau, com a densidade de esporos em campo (SDF), sugerindo que ainda existem fatores estressantes limitando a atividade simbiótica.

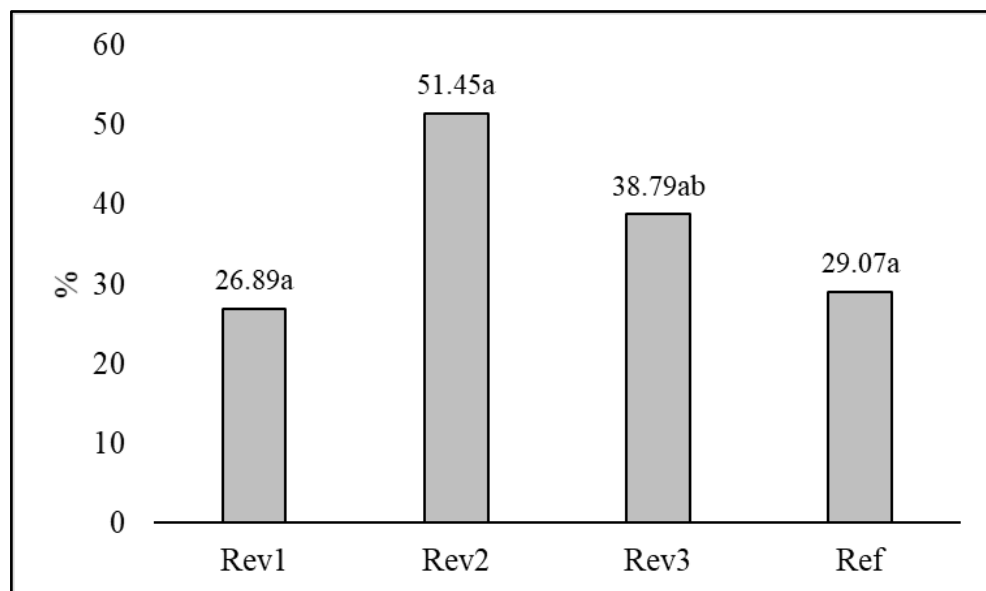
Já Rev3, com cinco anos de revegetação, destacou-se por sua proximidade com os vetores de pH, manganês (Mn), saturação por bases (V%) e densidade de esporos em casa de vegetação (SDG). Isso indica um possível avanço na reestruturação do solo, favorecendo condições mais adequadas para a atividade dos FMAs, principalmente sob condições controladas. A densidade de esporos em casa de vegetação (SDG) correlacionou-se positivamente com pH, Mn e V%, sugerindo que esses atributos promovem maior esporulação e multiplicação dos FMAs, como já relatado por estudos anteriores que observaram que o aumento do pH e da matéria orgânica em áreas revegetadas por quatro a cinco anos favorece a colonização radicular e o acúmulo de esporos (Prado et al. (2019) e Salim et al. 2025).

Esses padrões indicam que a revegetação tem promovido mudanças significativas na dinâmica do solo, refletidas tanto nos atributos químicos quanto na funcionalidade microbiana. No entanto, as áreas revegetadas ainda se diferenciam da área de referência, sugerindo que a recuperação completa dos atributos edáficos e da simbiose micorrízica exige mais tempo e a adoção de estratégias complementares de manejo. A trajetória observada em Rev3 revela uma tendência positiva, destacando o tempo de revegetação como um fator-chave na recuperação ecológica de áreas impactadas por rejeito. Resultados semelhantes foram observados em solos de áreas mineradas por carvão, onde a aplicação de FMAs nativos associada a corretivos como

composto e calcário resultou em colonização entre 60% e 100%, aumento do pH e melhor absorção de nitrogênio e fósforo pelas plantas (SALIM et al., 2025). Em rejeitos de zinco e bauxita, também se verificou um aumento na biomassa microbiana e no número de esporos após quatro anos de revegetação, reforçando o papel dos FMAs como bioindicadores da recuperação funcional do solo (DIAS et al., 2008).

A Figura 10 mostra os percentuais de colonização micorrízica em plantas cultivadas em solos provenientes de áreas com diferentes tempos de revegetação (3, 4 e 5 anos), além de uma área de referência não impactada. (FMAs).

Figura 10. Análise de colonização micorrízica em área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.



Ref: referência; Rev1: 3 anos de revegetação; Rev2: 4 anos de revegetação; Rev3: 5 anos de revegetação. Fonte: Do autor (2025).

A área com quatro anos de revegetação (Rev2) apresentou o maior índice de colonização micorrízica (51,45%), sendo estatisticamente superior às áreas Rev1 (26,89%) e à referência (29,07%). Esse resultado sugere uma reorganização microbiana mais eficiente após quatro anos de manejo, favorecendo a simbiose planta-fungo. Esse padrão é consistente com estudos que destacam a influência positiva do tempo de revegetação sobre a atividade biológica do solo (DIAS et al., 2008; JUGE et al., 2021).

A área com 5 anos (Rev3) apresentou colonização de 38,79%, valor estatisticamente semelhante a todos os outros tratamentos, conforme indicado pela letra “ab” no gráfico. Isso pode representar uma fase de estabilização simbiótica, com manutenção da funcionalidade micorrízica, embora sem o mesmo pico observado em Rev2. A ausência de diferença

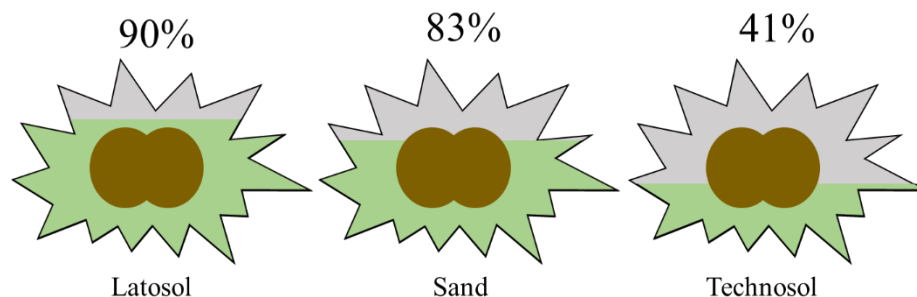
significativa entre Rev2 e Rev3 pode refletir variações locais nas condições do solo ou na composição vegetal.

A área Rev1, com apenas três anos de revegetação, apresentou o menor valor de colonização micorrízica (26,89%), possivelmente devido a fatores limitantes como altos teores de ferro e sódio e baixa matéria orgânica, os quais podem inibir a atividade microbiana (Prado et al., 2019). Esses resultados indicam um estágio inicial de reestruturação do solo e da microbiota simbiótica. Já a área de referência apresentou colonização semelhante à Rev1. Essa semelhança pode estar relacionada à baixa compatibilidade entre os FMAs nativos e a planta isca utilizada, indicando que a eficiência simbiótica não depende apenas das condições químicas do solo, mas também da especificidade planta-fungo (ORŁOWSKA et al., 2025; SALIM et al., 2025).

5.2 Teste de eficiência de solo inóculo em espécie nativa

A germinação de sementes de ipê (figura 11) foi avaliada em três tipos de substrato: areia, latossolo e tecnossolo. Observou-se que as sementes apresentaram maior taxa de germinação e vigor no latossolo, seguido da areia, enquanto o tecnossolo demonstrou os piores resultados. Este desempenho inferior no tecnossolo pode estar relacionado à elevada concentração de ferro e outros metais pesados presentes no rejeito de mineração, que podem causar toxicidade, afetar a permeabilidade das membranas celulares e inibir a atividade de enzimas essenciais à germinação.

Figura 11. Teste de germinação de sementes de Ipê (*Tabebuia heptaphylla* (Mart.) Mart.).



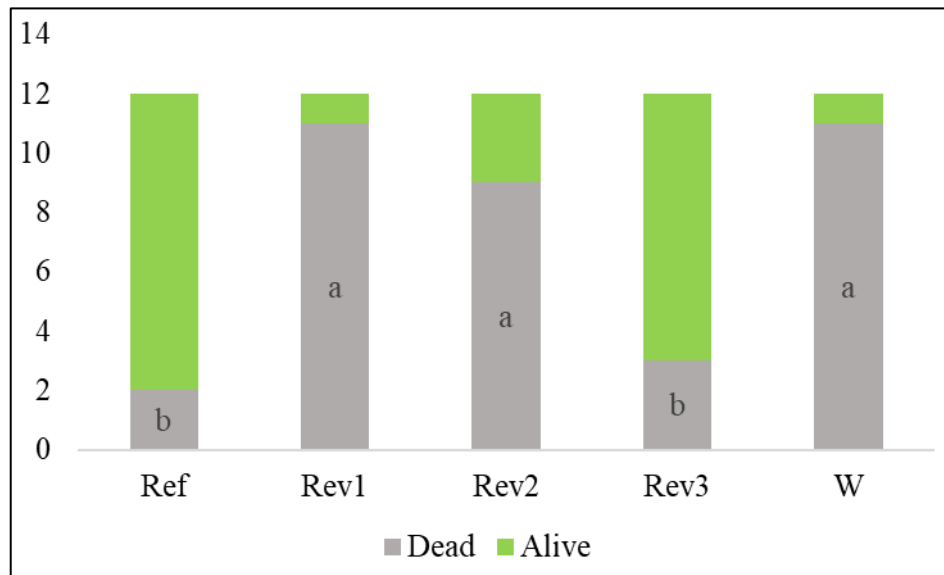
Latosol: Latossolo; Sand: areia; Technosol: Tecnossolo. Fonte: Do autor (2025).

As mudas foram transplantadas com 90 dias de idade, sendo essa, a idade em que a muda encontra-se em vigor suficiente para troca de ambiente (CARVALHO e POLIANO, 2023). Anterior às mudas de 90 dias, visto que se trata de uma espécie mais rústica, foram plantadas mudas de 60 dias, mas houve morte dia dias após transplântio, o que

pode ser em função da alteração do pH e o desequilíbrio nutricional do tecnossolo que pode ser fator limitante na disponibilidade de nutrientes fundamentais, como fósforo e zinco, comprometendo o desenvolvimento, associado ao baixo grau de maturidade das mudas.

A sobrevivência de mudas de *Tabebuia heptaphylla* variou (figura 12) significativamente entre os tratamentos avaliados, evidenciando o papel do tempo de revegetação e da presença de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) na qualidade funcional do solo. Os tratamentos Rev1 e Rev2, correspondentes às áreas com três e quatro anos de revegetação após o desastre, apresentaram as maiores taxas de mortalidade, não diferindo estatisticamente da testemunha (W), que não recebeu solo inóculo. Klauberg-Filho et al. (2002) demonstraram que, embora fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) sejam encontrados em solos contaminados, a densidade de esporos, a riqueza de espécies e a dominância fúngica diminuem significativamente conforme as concentrações de metais pesados aumentam. Isso implica que áreas de revegetação jovens podem apresentar baixa diversidade funcional de FMAs, resultando em menor suporte para germinação e sobrevivência de espécies nativas como o ipê-roxo.

Figura 12. Índice de sobrevivência em ipê-roxo com solo-inóculo de área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.



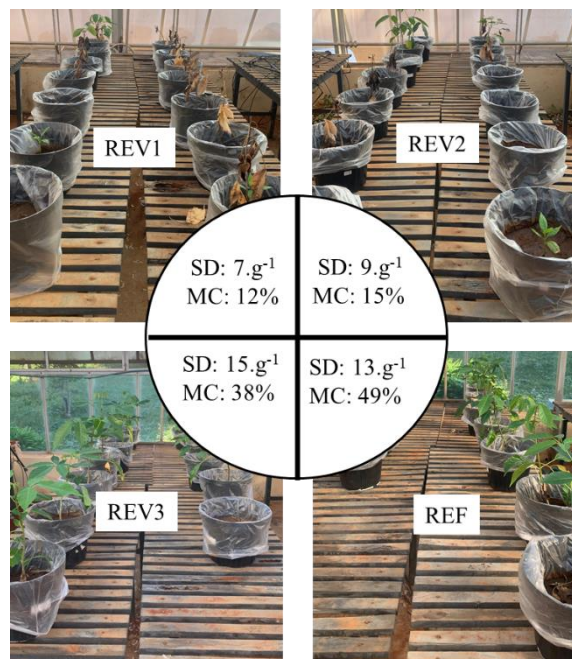
Ref: referência; Rev1: 3 anos de revegetação; Rev2: 4 anos de revegetação; Rev3: 5 anos de revegetação; W: testemunha; Dead: mortas; Alive: vivas. Letras diferentes em diferentes tratamentos se diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste t de tukey. Fonte: Do autor (2025).

Por outro lado, o solo proveniente da área com cinco anos de revegetação (Rev3) apresentou desempenho estatisticamente semelhante ao solo de referência (Ref), com alta proporção de plântulas vivas. Esses resultados indicam que, com o avanço da sucessão

ecológica e do acúmulo de biomassa vegetal, ocorre melhora gradual nas características físico-químicas e microbiológicas do solo, favorecendo a formação de associações simbióticas benéficas com FMAs. A densidade e a funcionalidade de FMAs tendem a aumentar conforme a evolução da sucessão ecológica, promovendo melhor absorção de fósforo, maior tolerância a elementos tóxicos e desenvolvimento radicular mais robusto (KLAUBER-FILHO et al., 2002; LINS et al., 2007). Além disso, segundo Silva et al. (2006), a inoculação com FMAs pode reduzir a absorção de metais pesados pelas plantas e atenuar efeitos fitotóxicos em solos contaminados.

As taxas de mortalidade das mudas de *Tabebuia heptaphylla* nos tratamentos REV1 e REV2 foram elevadas (figura 13), com aproximadamente 90% das plantas perdidas, mesmo após a adição de solo inóculo. Esses tratamentos apresentaram os menores valores de densidade de esporos (7 e 9 g^{-1}) e de colonização micorrízica (12% e 15%, respectivamente), o que indica baixa funcionalidade do sistema simbiótico em estágios iniciais de revegetação. A baixa densidade de propágulos fúngicos e a reduzida colonização radicular comprometem a absorção de nutrientes e a resistência ao estresse abiótico, o que pode explicar a incapacidade do ipê-roxo de se estabelecer nesses ambientes (SOUSA et al., 2023). Segundo Klauber-Filho et al. (2002), em solos contaminados, a presença de metais pesados e a degradação estrutural limitam a diversidade e a eficácia dos FMAs, resultando em associação simbiótica ineficiente.

Figura 13. Análise da densidade de esporos e colonização micorrízica em ipê-roxo com solo-inóculo de área de referência e afetadas por rejeito sob revegetação em Mariana, MG.



Ref: referência; Rev1: 3 anos de revegetação; Rev2: 4 anos de revegetação; Rev3: 5 anos de revegetação; SD: densidade de esporos; MC: colonização micorrízica. Fonte: Do autor (2025).

Ao considerar o avanço da revegetação ao longo dos anos, observa-se um crescimento gradual tanto na densidade de esporos quanto na colonização micorrízica. No tratamento REV3, com cinco anos de revegetação, a densidade alcançou 15 g^{-1} e a colonização subiu para 38%, o que representa uma melhora significativa em relação aos tratamentos com menor tempo de recuperação. Essa tendência está associada ao acúmulo de matéria orgânica, aumento da biomassa vegetal e estabilização do solo, que favorecem a proliferação de FMAs e sua funcionalidade ecológica (LEAL et al., 2016; REDONDO et al., 2025). De acordo com Lins et al. (2007), ambientes em estágios mais avançados de sucessão apresentam maior complexidade microbiana, o que resulta em relações simbióticas mais eficazes entre fungos e raízes de espécies nativas.

Já quando observado o comportamento entre o REV3 e a área de referência (REF) nota-se uma semelhança. A área de referência apresentou densidade de esporos de 13 g^{-1} e colonização de 49%, enquanto o REV3 atingiu 15 g^{-1} e 38%, respectivamente. Embora os valores de colonização ainda sejam ligeiramente inferiores àqueles observados na área não impactada, os dados indicam que, após cinco anos de revegetação, o solo sob influência de rejeito começa a recuperar atributos microbiológicos essenciais.

6 CONCLUSÕES

Os valores de densidade de esporos das áreas de revegetação são superiores aos da referência e diferentes, mas entre si, as três áreas são iguais, evidenciando que pode estar havendo um equilíbrio na sucessão ecológica.

Foi observado uma possível contribuição negativa de alguns atributos modificados em função da deposição do rejeito, com aparecimento de resíduos que podem comprometer a viabilidade e diversidade local.

A revegetação por cinco anos ajudou a recuperar os fungos micorrízicos no solo, o que melhorou a sobrevivência e o vigor das mudas.

Áreas com vegetação mais antiga têm mais potencial para a restauração ecológica.

REFERÊNCIAS

- ANCOLD – AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS INCORPORATED. **Guidelines on Dam Safety Management**. 3. ed. Queensland, 2003. Disponível em: https://www.resources.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0007/78838/dam-safety-management.pdf. Acesso em: 10 de fev. 2025.
- ARMADA, C. A. S. Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho em face ao estado socioambiental brasileiro. **Territorium**, v. 28, n. 1, p. 13-22, 2020. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/territorium/article/view/6392>. Acesso em: 10 jul. 2025
- BAREA, J. M. **Investigaciones sobre micorrizas en España: pasado, presente y futuro**. In: MEGÍAS, M.; RIVILLA, R.; MATEOS, P.; LEÓN, M.; DELGADO, M. J.; GONZÁLEZ, E.; SOTO, M. J.; RODELAS, B.; BEDMAR, E. J. Fundamentos aplicaciones agroambientales de las interacciones beneficiosas planta-microorganismo. 1. ed. Espanha: Sefin, 2011. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8566025>. Acesso em: 154 jun. 2025.
- BARROS, D. A. *et al.* Caracterização da mineração de bauxita no maciço alcalino de poços de caldas e seus impactos socioambientais. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 1, p. 127-133, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000100018>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- BARROSO, T. R. G. **Fungos micorrízicos arbusculares e microrganismos solubilizadores de fosfato e rizóbio em sistemas de manejo do solo no cerrado**. 2012. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2012.
- BI, Y. *et al.* Shifts in arbuscular mycorrhizal fungal community composition and edaphic variables during reclamation chronosequence of an open-cast coal mining dump. **Catena**, v. 203, p. 1-9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105301>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- BORBA FILHO, A. B.; PEREZ, S. C. J. G. D. A. Armazenamento de sementes de ipê-branco e ipê-roxo em diferentes embalagens e ambientes. **Revista Brasileira de sementes**, v. 31, p. 259-269, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222009000100029>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- BOTELHO, S. A.; MELO, L. A. **Restauração sobre o rejeito após o rompimento da barragem em Mariana (MG)**. In: BARBOSA, L. M. (Org.). Restauração Ecológica: Desafio do processo frente à crise ambiental. Viçosa: Editora UFV, 2019.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRANCALION, P. H. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração Florestal**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- BRASIL. **Decreto-Lei n. 97.632/89, de 10 de abril de 1989**. Lei pública. Brazilian Federal Register section 1 – 12 April 1989, 1989. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1989/decreto-97632-10-abril-1989-448270-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 21 maio 2024.

BRUNDRETT, M. C.; TEDERSOO, L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. **New Phytologist**, v. 220, n. 4, p. 1108-1115, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.14976>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BUREC – U. S. BUREAU OF RECLAMATION. **Safety Evaluation of Existing Dams. A Manual For The Safety Evaluation of Embankment and Concrete Dams**. Denver, Colorado: BUREC, 1995.

CAPRONI, A. L. *et al.* Ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares em resíduo da mineração de bauxita revegetado com espécies arbóreas. **Acta Botanica Brasilica**, v. 21, n. 1, p. 99-106, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062007000100009>. Acesso em: 7 jul. 2025.

CARMO, F. F. *et al.* Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>. Acesso em: 7 jul. 2025.

CARVALHO, P. H. R. **Espécies florestais brasileiras. Recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: Embrapa-CNPf, 1994. 674p.

CARVALHO, A. R. S., APOLIANO, F. S. **Calagem, adubação fosfatada e crescimento de mudas de Ipê-amarelo**. Orientador: Eric Victor de Oliveira Ferreira. 2023. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Capitão Poço, 2023.

CHAGNON, P. L. *et al.* A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 18, n. 9, p. 484-491, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.05.001>. Acesso em: 7 jul. 2025.

COLODETE, C. M.; DOBBSS, L. B.; RAMOS, A. C. Aplicação das micorrizas arbusculares na recuperação de áreas impactadas. **Natureza Online**, v. 12, n. 1, p. 32-37, 2014. Disponível em: <https://www.naturezaonline.emnuvens.com.br/revista/article/view/184>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SOUSA, L. D. S. *et al.* Influence of arbuscular mycorrhizal fungi density on growth and metabolism of *Handroanthus serratifolius* (Vahl) SO Grose seedlings. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 175, n. 6, e14067, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ppl.14067>. Acesso em: 10 jul. 2025.

DIAS, L. E. *et al.* A two-phase process for revegetation of acidic bauxite tailings in the Amazon Region, Brazil. **Proceedings America Society of Mining and Reclamation**, v. 1, p. 316-327, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.21000/JASMR08010316>. Acesso em: 7 jul. 2025.

DINIZ, A. P. M. *et al.* Atributos químicos do solo sob sistema plantio direto como indicador de sustentabilidade ambiental. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 3130-315, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-213>. Acesso em: 7 jul. 2025.

MERGULHÃO, A. C. E. S. *et al.* Avaliação do estado microbiológico do solo em área preservada e impactada por mineração no semiárido de Pernambuco. **Ambiência**, v. 15, n. 3, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-213>. Acesso em: 7 jul. 2025.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. **SSSA Special Publication**, v. 35, p. 1-21, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ENGEL, V. L.; PARROTTA, J. A. An evaluation of direct seeding for restoration of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 152, n. 1-3, p. 169-181, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00600-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00600-9). Acesso em: 7 jul. 2025.

FEMA – FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Dam Safety in The United States. **A Progress Report on the National Dam Safety Program Fiscal Years 2008 through 2011**. USA: FEMA, 2013. 51 p. Disponível em: <https://www.fema.gov/media-library-data/14028769952381c041ca9a4489ea27152c515ed72e38f/DamSafetyintheUnitedStates.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2024.

FENG, Y. *et al.* Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 191, p. 12-25, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015>. Acesso em: 15 jan. 2025.

FERNANDES, R. B. **Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA**. 2020. 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

FRANÇA, G. S.; STEHMANN, J. R. Florística e estrutura do componente arbóreo de remanescentes de Mata Atlântica do médio rio Doce, Minas Gerais, Brasil. **Rodriguésia**, v. 64, n. 3, p. 607-624, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2175-78602013000300012>. Acesso em: 7 jul. 2025.

FREITAS, C. M. D. *et al.* Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, n. 5, p. 1-7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-311X00052519>. Acesso em: 5 fev. 2025.

GASTAUER, M. *et al.* Mine land rehabilitation in Brazil: Goals and techniques in the context of legal requirements. *Ambio*, **Springer Netherlands**, v. 48, p. 74–88, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1053-8>. Acesso em: 10 jul. 2025.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet-sieving and decanting. **Transactions of British Mycological Society**, v. 46, n. 2, p. 235-244, 1963. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0). Acesso em: 7 jul. 2025.

GHEZZEHEI, T. A. *et al.* On role of soil water retention characteristic on aerobic microbial respiration. **Biogeosciences**, v. 16, n. 6, p. 1187-1209, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-16-1187-2019>. Acesso em: 10 maio 2025.

GRIFFITHS, B. S.; PHILIPPOT, L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 37, n. 2, p. 112-129, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2012.00343.x>. Acesso em: 08 mai. 2025.

HARRISON, M. J. Signaling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Annual Review of Microbiology**, v. 59, p. 19-42, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.58.030603.123749>. Acesso em: 15 ago. 2025.

HILDEBRANDT, U., REGVAR, M., & BOTHE, H. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. **Phytochemistry**, v. 68, n. 1, p. 139-146, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.023>. Acesso em: 7 jul. 2025.

JUGE, C. *et al.* Long-term revegetation on iron mine tailings in northern Québec and Labrador and its effect on arbuscular mycorrhizal fungi. **Applied Soil Ecology**, v. 168, p. 104145, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104145>. Acesso em: 7 jul. 2025.

KARACA, A., CETIN, S. C., TURGAY, O. C., KIZILKAYA, R. **Soil Enzymes as Indication of Soil Quality**. In: SHUKLA, G., VARMA, A. Soil Biology, p. 119-148, 2010. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-14225-3_7. Acesso em: 7 jul. 2025.

KEMMELMEIER, K. **Comunidades de fungos micorrízicos arbusculares (Glomeromycota) em ecossistemas impactados por rejeito de mineração de ferro em Mariana-MG**. 2019. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

KLAUBERG-FILHO, O.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. D. S. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área poluída com metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 125-134, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000100012>. Acesso em: 7 jul. 2025.

KOSKE, R.E.; GEMMA, J.N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. **Mycol. Res.**, v. 92, 1989. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(89\)80195-9](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(89)80195-9). Acesso em: 10 jun. 2025.

KOSSOFF, D. *et al.* Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied geochemistry**, v. 51, p. 229-245, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>. Acesso em: 7 jul. 2025.

KUMAR, B. M. Mining waste contaminated lands: an uphill battle for improving crop productivity. **Journal of Degraded and Mining Lands Management**, v. 1, n. 1, p. 43-50, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2013.011.043>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LEAL, P.L. *et al.* Enrichment of arbuscular mycorrhizal fungi in a contaminated soil after rehabilitation. **Brazilian Journal Microbiology**, v. 47, n. 4, p. 853-862, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.06.001>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LI, J. C. Gouhou Dam and Analysis for Causes of the Dam Failure. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, v. 16, n. 6, p. 1-14, 1994. Disponível em: <https://www.cgejournal.com/en/article/id/9812>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LINS, C. E. D. L. *et al.* Efeito de fungos micorrízicos arbusculares no crescimento de mudas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. em solos de caatinga sob impacto de mineração de cobre. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 355-363, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000200014>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Sinapse Múltipla**, v. 5, n. 1, p. 1-14, 2016. Disponível em:

<https://periodicos.pucminas.br/sinapsemultipla/article/view/11377/9677>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LOPES, S. F. *et al.* Estrutura fitossociológica e grupos ecológicos em fragmento de floresta estacional semidecídua, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. **Rodriguésia**, v. 60, n. 4, p. 1-14, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-7860200960418>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 1. ed. Nova Odessa: Plantarum, 1992.

MAGNO, L. Ordenamento territorial da mineração no Brasil e conflitos ambientais. **Revista Geografias**, v. 11, n. 1, p. 1-24, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.35699/2237-549X..13394> Acesso em: 7 jul. 2025.

MERGULHÃO, A. C. D. E. S. *et al.* Potencial de infectividade de fungos micorrízicos arbusculares em áreas nativas e impactadas por mineração gesseira no semiárido brasileiro. **Hoehnea**, v. 34, n. 3, p. 341-348, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2236-89062007000300005>. Acesso em: 7 jul. 2025.

MERGULHÃO, A. C. E. S. *et al.* Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in a gypsum mining impacted semiarid area. **Acta Botanica Brasílica**, v. 24, n. 4, p. 1052-1061, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062010000400020>. Acesso em: 7 jul. 2025.

MOORMAN T.; REEVES FB. The role of endomycorrhizae in revegetation practices in the semi-arid west. II. A bioassay to determine the effect of land disturbance on endomycorrhizal populations. **American Journal of Botany**, v. 66, n. 1, p. 14-18, 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2442619> Acesso em: 7 jul. 2025.

MUKHOPADHYAY, S.; MAITI, S. K.; MASTO, R. E. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. **Ecological Engineering**, v. 71, p. 10-20, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.001>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MUNYANZIZ, E.; KEHRI, H. K.; BAGYARAJ, D. J. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of mycorrhiza in crops and trees. **Applied Soil Ecology**, v. 6, p. 77-85, 1997. Disponível em: [https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1997AppSE...6...77M/doi:10.1016/S0929-1393\(96\)00152-7](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1997AppSE...6...77M/doi:10.1016/S0929-1393(96)00152-7). Acesso em: 7 jul. 2025.

NEINA, D. The Role of Soil pH Plant Nutrition and Soil Remediation. **Hindawi**, p. 1-9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>. Acesso em: 10 jul. 2025.

NIGAM, G. K. *et al.* Field assessment of surface runoff, sediment yield and soil erosion in the opencast mines in Chirimiri area, Chhattisgarh, India. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 101, p. 137-148, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.07.001>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ORŁOWSKA, E. *et al.* Role of mycorrhizal colonization in plant establishment on an alkaline gold mine tailing. **International Journal of Phytoremediation**, v. 13, n. 2, p. 185-205, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15226514.2010.495148>. Acesso em: 7 jul. 2025.

OWEN, J. R. *et al.* Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 42, p. 101361, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101361>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PARENTE, C. E. T. *et al.* First year after the Brumadinho tailings' dam collapse: Spatial and seasonal variation of trace elements in sediments, fishes and macrophytes from the Paraopeba River, Brazil. **Environmental Research**, v. 193, p. 110526, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110526>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PFEIFER, F. J.; RESTELLO, R. M.; ZAKRZEWSKI, S. B. B. Percepções dos agricultores do sul do Brasil sobre a legislação de Proteção da Vegetação Ripária. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 1830-1853, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509842720>. Acesso em: 7 jul. 2025.

PHILIPPOT, L.; GRIFFITHS, B. S.; LANGENHEDER, S. Microbial Community Resilience across Ecosystems and Multiple Disturbances. **American Society for Microbiology - Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 85, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/membr.00026-20>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PORRAS-SORIANO A. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi increased growth, nutrient uptake and tolerance to salinity in olive trees under nursery conditions. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, p. 1350-1359, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.02.010>. Acesso em: 7 jul. 2025.

POUYÚ-ROJAS, E.; SIQUEIRA, J. O. Micorriza arbuscular e fertilização do solo no desenvolvimento pós-transplante de mudas de sete espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 1, p. 103-114, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000100013>. Acesso em: 7 jul. 2025.

PRADO, I. G. O. **Diversidade de fungos, com ênfase em FMA, em áreas afetadas pelo rejeito de mineração de ferro ao longo de três anos após o rompimento da barragem do Fundão**. 2020. 74 p. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2020.

PRADO, I. G. O. *et al.* Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 141, p. 84-95, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.008>. Acesso em: 7 jul. 2025.

PRATES JÚNIOR, P. P., DA SILVA, M. D. C. S., DE OLIVEIRA PRADO, I. G., LIMA, H. S., DA SILVA, C. C., E KASUYA, M. C. M. **Como Os Microrganismos Auxiliam Na Revegetação de Áreas Afetadas pelo Desastre de Mariana?**, In: VICENTE, N. M. F., SPERBER, C. F., CARNEIRO, M. A. Dia D do Rio Doce, Lavras: Editora UFLA, 2021.

RAMOS A. C.; FAÇANHA A. R.; FEIJÓ J. A. **Ion dynamics during the polarized growth of arbuscular mycorrhizal fungi: from presymbiosis to symbiosis**. In: VARMA A, HOCK B. (ed). Mycorrhiza. v. 33, p. 241-261, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-540-78826-3_12. Acesso em: 7 jul. 2025.

RAMOS A. C., *et al.* An outlook on ion signaling and ionome of mycorrhizal symbiosis. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 23, n. 1, p. 79-89, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202011000100010>. Acesso em: 7 jul. 2025.

REDONDO, M. *et al.* Arbuscular mycorrhizal density and propagation are driven by vegetation cover and plant phylogenetic diversity. **Plant and Soil**, Dordrecht, p. 1-15, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-025-05800-3>. Acesso em: 7 jul. 2025.

RIVAS-PÉREZ, I. M. *et al.* Evolution of Chemical Characteristics of Technosols in an Afforested Coal Mine Dump over a 20-year Period. **Land Degradation and Development**, v. 27, n. 6, p. 1640– 1649, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.2472>. Acesso em: 7 jul. 2025.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. 1. ed. São Paulo: Instituto Bioatlântica, 2009.

SAES, B. M.; BISHT, A. Iron ore peripheries in the extractive boom: A comparison between mining conflicts in India and Brazil. **Extractive Industries and Society**, v. 7, n. 4, p. 1567– 1578, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.09.010>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SALIM, M. A. *et al.* The role of soil ameliorants and arbuscular mycorrhizal fungi in improving the growth of Samanea saman (Jacq.) Merr seedlings in coal mine post-mining media. **Journal of Ecological Engineering**, v. 26, n. 5, p. 255-272, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.12911/22998993/201387>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SANTIAGO, F. L. A. **Assessment of biological and biochemical proprieties in soil and tailing from iron ore mining operations under rehabilitation**. 2019. 106 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

SANTOS, J., VARÓN-LÓPEZ, M. *et al.* Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 7, p. 6735-6748, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5904-6>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SANTOS, R. S. **Diversidade taxonômica de fungos micorrízicos arbusculares em cafeeiro com diferentes tipos de manejo e eficiência na promoção do crescimento do feijão-caupi**. 2019. 93 p. Dissertação (Mestrado em Biociências) – Universidade Federal da Bahia, Vitória da Conquista, 2019.

SER. **The SER International Primer on Ecological Restoration - Society for Ecological Restoration International Science e Policy Working Group**. Society for Ecological Restoration. 15p. 2004. Disponível em: https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/ser_primer.pdf). Acesso em: 10 jul. 2025.

SILVA, A. O. *et al.* Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 8, p. 462, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09234-4>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SILVA, A.O. *et al.* Soil microbiological attributes indicate recovery of an iron mining area and of the biological quality of adjacent phytophysionomies. **Ecological Indicators**, v. 93, p. 142-

151, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.073>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SILVA, J. A. D. *et al.* Succession stages and soil attributes influence the structure of arbuscular mycorrhizal fungi communities in the Atlantic Forest. **Acta Botanica Brasilica**, v. 37, e20230015, p. 1-18, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1677-941X-ABB-2023-0015>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SILVA, S.; SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S. Fungos micorrízicos no crescimento e na extração de metais pesados pela braquiária em solo contaminado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1749-1757, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100007>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SILVA, T. C. Investigação sobre as Causas do Rompimento de Barragens de Rejeitos de Mineração: Estudo de caso da Barragem do Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, com o Uso da Técnica Análise de Constelação. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 356–381, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.4.p2047-2068>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SOARES, A. L. C. *et al.* Impacto do rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da Mina do Feijão, em Brumadinho, quanto ao uso e à cobertura do solo e à qualidade das águas superficiais do rio Paraopeba. **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 27, n. 2, p. 356–381, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.35699/2316-770X.2020.20557>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SOUZA JUNIOR, T. F. D.; MOREIRA, E. B.; HEINECK, K. S. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. **Holos**, v. 5, p. 1-39, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2018.7423>. Acesso em: 7 jul. 2025.

TEIXEIRA, A. F. S. **Densidade e diversidade de esporos de fungos micorrízicos arbusculares em áreas do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

TEIXEIRA, A. F. S. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungal communities in an iron mining area and its surroundings: Inoculum potential, density, and diversity of spores related to soil properties. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 5, p. 511-525, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-70542017415014617>. Acesso em: 7 jul. 2025.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

UPADHYAY, N. *et al.* Tolerance and reduction of chromium (VI) by *Bacillus* sp. MNU16 isolated from contaminated coal mining soil. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 778, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00778>. Acesso em: 7 jul. 2025.

HEIJDEN, M. G. A. V. D.; BARDGETT, R.D.; STRAALLEN, N.M. V. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. **Ecology Letters**, v. 11, n. 3, p. 296–310, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>. Acesso em: 10 jul. 2025.

HEIJDEN, M. G. A. V. D.; HARTMANN, M. Networking in the Plant Microbiome. **PLoS biology**, v. 14, n. 2, p. 1-9, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002378>. Acesso em: 7 jul. 2025.

VERGILIO, C. D. S.; LACERDA, D.; OLIVEIRA, B. C. V. D. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Scientific Reports**, n. v. n. 5936, p. 1-12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62700-w>. Acesso em: 10 jul. 2025.

VERMA, P.; VERMA, R.K. Production of am fungi for application in iron mine overburden. **Indian Journal of Tropical Biodiversity**, v. 24, n. 2, p. 117-126, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316879344_Production_of_AM_fungi_for_applicati_on_in_iron_mine_overburden_dump_soil. Acesso em: 7 jul. 2025.

WANG, P. *et al.* Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. **Science of the Total Environment**, v. 695, p. 133893, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133893>. Acesso em: 10 jul. 2025.

YADA, M. M. *et al.* Atributos químicos e bioquímicos em solos degradados por mineração de estanho e em fase de recuperação em ecossistema Amazônico. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 3, p. 714–724, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140499>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZANCHI, C. S. *et al.* Pre-cultivation with herbaceous plants assists in the revegetation process of iron mining tailings with *Enterolobium contortisiliquum*. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, n. 7, p. 231 , 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05696-5>. Acesso em: 10 jul. 2025.