

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Matéria orgânica do solo de áreas mineradas para bauxita em processo de
reabilitação com cafeeiro e gramínea forrageira**

Marllon Fialho de Castro
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

MARLLON FIALHO DE CASTRO

**Matéria orgânica do solo de áreas mineradas para bauxita em processo de
reabilitação com cafeeiro e gramínea forrageira**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Emanuelle M. Barros Soares

Coorientadores: Ivo Ribeiro da Silva
Rafael da S. Teixeira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C355m
2025
Castro, Marllon Fialho, 1995-
Matéria orgânica do solo de áreas mineradas para bauxita
em processo de reabilitação com cafeeiro e gramínea forrageira /
Marllon Fialho Castro. – Viçosa, MG, 2025.
1 tese eletrônica (80 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Emanuelle Mercês Barros Soares.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.384>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Cultivo consorciado. 2. Solos - Descontaminação.
3. Bauxita - Minas e mineração. 4. Café. 5. Gramínea. I. Soares,
Emanuelle Mercês, 1979-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.452

MARLLON FIALHO DE CASTRO

Matéria orgânica do solo de áreas mineradas para bauxita em processo de reabilitação com cafeeiro e gramínea forrageira

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 11 de março de 2025.

Assentimento:

Marllon Fialho de Castro
Autor

Emanuelle Mercedes Barros Soares
Orientadora

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 03/06/2025 às 13:49:16 e pela orientadora em 05/06/2025 às 09:58:00. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **YDTP.4XDL.X2KD** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por permitir que sejamos pessoas melhores a cada dia que passa.

Aos meus pais, Marcelo e Maria, por serem minha base e pelo amor incondicional.

À minha querida e amável companheira, Jéssica, por sempre estar ao meu lado e tornar a caminhada mais leve.

Ao meu irmão e à sua família, Marcelo, Izabel, Davi e Gabriel, pelos bons momentos.

Aos amigos da Pós-Graduação do Departamento de Solos, em especial Edvaldo, Maria, Daniel, Aniely, Dani e Fernanda Valente, pela ajuda profissional e pelos momentos de alegria.

Aos graduandos que passaram pelo LIE, Ismaelson, André, Adalgisa, Sofia, Raquel, Letícia, Gutyerlley, Wandré, Thaís, Pedro e Matheus Medina, por toda ajuda nesse período.

Aos técnicos do LIE, João Milagres e Humberto, pelo profissionalismo e ensinamentos.

Aos amigos da Plantas Daninhas, Alessandro, Elisa, Guilherme, Mari, Maria, Maura, Laryssa, Valtinho e Vicente, pelo acolhimento e pelos momentos de descontração.

À equipe de trabalho do Vale da Agronomia, Guilherme, Douglas, Joelson, Sr. Herli, Eraldo, Júlio e demais colegas, pelo crescimento profissional e pelo acolhimento.

Aos professores da Plantas Daninhas, Francisco e Ricardo, pela compreensão e ajuda.

Aos professores André Mundstock e Cecon, por toda ajuda na parte estatística.

Aos membros da banca, por todas as contribuições.

Aos meus coorientadores, Rafael Teixeira e Ivo Ribeiro, pelo suporte e auxílio no dia a dia.

À minha orientadora, Professora Emanuelle, por sempre me ajudar na condução da tese e pela compreensão.

À Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais e todos seus colaboradores por todo suporte, financiamento e disposição em ajudar.

Aos professores, técnicos e demais funcionários do DPS, pelo profissionalismo e ensinamentos.

À UFV, pela estrutura, excelência, ensino de qualidade e assistência estudantil.

Aos amigos da universidade e da infância, que sempre compartilham momentos valiosos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG),

pela concessão da bolsa de estudos.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

CASTRO, Marllon Fialho de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2025. **Matéria orgânica do solo de áreas mineradas para bauxita em processo de reabilitação com cafeeiro e gramínea forrageira.** Orientadora: Emanuelle Mercês Barros Soares. Coorientadores: Ivo Ribeiro da Silva e Rafael da Silva Teixeira.

A reabilitação de áreas degradadas pela mineração no Brasil ainda é um grande desafio, dado o intenso impacto ambiental dessa atividade. Em destaque, áreas pós-mineradas para bauxita demandam manejo correto e conservacionista do solo por vários anos, visto que a reabilitação é um processo lento. Um importante aspecto a ser considerado no processo de reabilitação é a matéria orgânica do solo (MOS), que está intimamente atrelada ao aumento da qualidade do solo e, conseqüentemente, à reabilitação de áreas pós-mineradas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a MOS e a qualidade do solo de áreas pós-mineradas para bauxita, considerando diferentes estágios de reabilitação, plantas de cobertura e adubações. Foram realizados dois experimentos em São Sebastião da Vargem Alegre, Zona da Mata Mineira, Brasil, apresentados aqui na forma de capítulos. Dois importantes usos do solo nessa região são o cultivo de café e de gramíneas forrageiras (pasto), os quais foram estabelecidos para a avaliação no presente estudo. No capítulo 1, o objetivo foi avaliar a MOS e a qualidade do solo em área pós-minerada para bauxita manejada por 11 anos com cafeeiro, sob diferentes tipos de adubação e plantas de cobertura. Nesta área, o uso de braquiária + leguminosa (B+L) na entrelinha do cafeeiro resultou em maiores aportes de carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) nos tratamentos com adubação orgânica + química. Na matéria orgânica associada aos minerais (MAM) deste tratamento, os teores de C foram de $25,0 \pm 0,3$, $21,3 \pm 0,3$ e $17,7 \pm 0,4$ g kg⁻¹, enquanto os teores de N foram de $1,9 \pm 0$, $1,5 \pm 0,2$ e $1,2 \pm 0,3$ g kg⁻¹, para as profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. O C e N da matéria orgânica particulada (MOP), assim como o C lábil, foram pouco eficientes para a diferenciação dos tratamentos. Todos os tratamentos da área de cafeeiro apresentaram valores do índice de qualidade do solo (IQS) inferiores à mata nativa (MN); no entanto, aqueles que receberam algum tipo de adubação na implantação não diferiram de uma área de café não minerado. O capítulo 2 teve por objetivo avaliar a MOS e a qualidade do solo de áreas pós-mineradas para bauxita manejada com gramínea forrageira e adubação química e orgânica. Para tanto, as avaliações foram conduzidas em área que possuía 3 e 7 meses de reabilitação com gramínea forrageira manejadas com adubação química e orgânica. Nesta área, os teores de C e N de diferentes frações da MOS não

diferiram entre os diferentes tipos de adubação. Os teores médios de C-MAM, C-MOP, N-MAM e N-MOP para AQ e AQO na profundidade de 0-10 cm foram de $24,1 \pm 0,6$, $4,1 \pm 0,3$, $1,7 \pm 0,1$, $0,2 \pm 0,1$ g kg⁻¹, respectivamente. Da mesma forma, não foi observada diferença entre o IQS dos tratamentos estudados ($0,6 \pm 0,02$), mas a MN demonstrou os maiores valores ($0,81 \pm 0,04$). A aplicação de adubos orgânicos em área de gramínea forrageira não resultou no aumento de IQS ou teor de MOS em relação às áreas com adubação química. Entretanto, nas áreas com cafeeiro, as plantas de cobertura, em especial B+L, foram mais eficientes para a reabilitação da qualidade do solo.

Palavras-chave: Razão isotópica, Fracionamento; Adubação orgânica; Bauxita.

ABSTRACT

CASTRO, Marllon Fialho de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2025. **Soil organic matter of areas mined for bauxite undergoing rehabilitation with coffee plants and forage grass.** Adviser: Emanuelle Mercedes Barros Soares. Co-advisers: Ivo Ribeiro da Silva and Rafael da Silva Teixeira.

The rehabilitation of areas degraded by mining in Brazil remains a major challenge due to the intense environmental impacts associated with this activity. In particular, post-mining areas for bauxite require appropriate and conservation-oriented soil management for several years, given that rehabilitation is a slow process. An important aspect to be considered in the rehabilitation process is soil organic matter (MOS), which is closely linked to improvements in soil quality and, consequently, to the recovery of post-mining areas. This study aimed to evaluate MOS and soil quality in post-bauxite-mined areas, considering different stages of rehabilitation, cover crops, and fertilization practices. Two experiments were conducted in São Sebastião da Vargem Alegre, Zona da Mata region of Minas Gerais, Brazil, and are presented here in the form of chapters. Two important land uses in this region—coffee cultivation and forage grass (grassland)—were selected for assessment in the present study. In Chapter 1, the objective was to evaluate MOS and soil quality in a post-bauxite-mined area cultivated with coffee for 11 years, under different fertilization regimes and cover crops. In this area, the use of *Brachiaria* + legume (B+L) in the coffee inter-row resulted in higher inputs of organic carbon (C) and nitrogen (N) in treatments with combined organic and chemical fertilization. In the mineral-associated organic matter (MAM) fraction of this treatment, C contents were 25.0 ± 0.3 , 21.3 ± 0.3 , and 17.7 ± 0.4 g kg⁻¹, while N contents were 1.9 ± 0.1 , 1.5 ± 0.2 , and 1.2 ± 0.3 g kg⁻¹ at depths of 0–20, 20–40, and 40–60 cm, respectively. The C and N contents in particulate organic matter (MOP), as well as labile C, were not effective in distinguishing between treatments. All coffee treatments exhibited soil quality index (SQI) values lower than those of native forest (MN); however, treatments that received any type of fertilization during establishment did not differ from a non-mined coffee area. Chapter 2 aimed to evaluate MOS and soil quality in post-bauxite-mined areas managed with forage grass and both chemical and organic fertilization. For this purpose, assessments were conducted in areas with 3 and 7 months of rehabilitation using forage grass under chemical and organic fertilization. In this area, the C and N contents in different MOS fractions did not differ between fertilization types. The mean values of C-MAM, C-MOP, N-MAM, and N-MOP at the 0–10 cm depth for chemical (AQ) and chemical + organic (AQO) fertilization

were 24.1 ± 0.6 , 4.1 ± 0.3 , 1.7 ± 0.1 , and 0.2 ± 0.1 g kg⁻¹, respectively. Similarly, SQI did not differ among the studied treatments (0.6 ± 0.02), but MN exhibited the highest values (0.81 ± 0.04). The application of organic fertilizers in areas with forage grass did not result in increased SQI or MOS compared to areas with only chemical fertilization. However, in coffee areas, cover crops—especially B+L—were more effective in improving soil quality during rehabilitation.

Keywords: Isotopic ratio, Fractionation; Organic fertilization; Bauxite.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	5
ABSTRACT	7
INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERÊNCIAS	14
CAPÍTULO 1 - MONITORAMENTO DA MATÉRIA ORGÂNICA E QUALIDADE DO SOLO EM ÁREA CULTIVADA POR 11 ANOS COM CAFEEIRO PÓS-MINERADA PARA BAUXITA	17
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1. INTRODUÇÃO.....	19
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.1. Área de estudo	20
2.2. Amostragem e análise química e física do solo.....	24
2.3. Caracterização da MOS, análise isotópica e enzimática	26
2.4. Índice de qualidade do solo	27
2.5. Análises estatísticas	27
3. RESULTADOS	28
3.1. Carbono e nitrogênio do solo	28
3.2. Variação de C e razão isotópica após mineração	33
3.3. Índice de qualidade do solo e produtividade do feijoeiro.....	35
4. DISCUSSÃO.....	36
4.1. Carbono e nitrogênio do solo	36
4.2. Variação de C e razão isotópica após mineração	38
4.3. Qualidade do solo	39
5. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	41
CAPÍTULO 2 - MATÉRIA ORGÂNICA E QUALIDADE DO SOLO EM ÁREA SOB REABILITAÇÃO CULTIVADA COM GRAMÍNEA FORRAGEIRA PÓS-MINERAÇÃO PARA BAUXITA	45
ABSTRACT	46
1. INTRODUÇÃO.....	47
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	48
2.1 Área de estudo	48
2.2. Coleta e análise de solo e material vegetal.....	50
2.3. Determinação de carbono, nitrogênio e atividade de enzimática	53
2.4. Índice de qualidade do solo	53

2.5 Análise estatística	54
3. RESULTADOS	54
3.1 Variação dos teores de C e N antes e após a mineração.....	54
3.2 Atributos biológicos do solo após 43 meses de reabilitação	56
3.3 Biomassa de parte aérea e raiz.....	59
3.4 Índice de qualidade do solo e análise de componentes principais.....	60
4. DISCUSSÃO.....	61
4.1 Teores de C e N antes e após a mineração	61
4.2 Atributos biológicos do solo após 43 meses de reabilitação	63
4.3 Biomassa de parte aérea e raízes	64
4.4 Índice de qualidade do solo (IQS) e análise de componentes principais (ACP)	66
5. CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	67
APÊNDICE	72
CONSIDERAÇÕES FINAIS	80

INTRODUÇÃO GERAL

A mineração para bauxita é uma atividade de grande importância para a economia brasileira, contribui com aproximadamente 700 milhões de reais ao PIB anualmente (ABAL, 2017). O Brasil é o quarto país que mais extrai bauxita no mundo, alcançando a marca de aproximadamente 34 milhões de toneladas anualmente. A mineração para bauxita concentra-se principalmente na região norte do país ($\approx 85\%$), mas também é significativa no estado de Minas Gerais ($\approx 7\%$) (ABAL, 2024). Apesar dos benefícios que a mineração para bauxita pode trazer para a sociedade, as áreas onde ocorre sua extração são profundamente afetadas, sendo necessário manejo adequado para a sua reabilitação.

O processo de mineração para bauxita pode durar de 1 a 2 anos e consiste, basicamente, na retirada do *topsoil* (camada de solo acima do minério, com espessura de 0,5 a 2,0 m, e formada pelos horizontes A e B), extração da bauxita e o recapeamento da área com o *topsoil* que foi retirado no início do processo (Borges *et al.*, 2019; Valente *et al.*, 2023). O processo de retirada do *topsoil* no campo afeta a qualidade física, química e biológica do solo, destruindo os seus agregados e bioporos, misturando os horizontes A com o B, reduzindo estoques de C e biodiversidade do solo (Cavalcante *et al.*, 2019; Simmonds; Majer; Nichols, 1994; Valente *et al.*, 2021). O processo de degradação do solo continua na etapa de seu armazenamento em leiras, pois propicia a oxidação da matéria orgânica do solo (MOS) e a lixiviação de nutrientes, processos que são agravados de acordo com o tempo que as leiras são armazenadas (Wick *et al.*, 2009). Por fim, quando ocorre o processo de reconfiguração topográfica, que consiste no retorno do *topsoil* para a área que já foi minerada, ocorre novamente muita movimentação do solo, afetando negativamente a sua qualidade.

No Brasil, o processo de recuperação das áreas mineradas para bauxita é de responsabilidade das empresas mineradoras, sendo elas obrigadas por lei a devolverem as áreas com o mesmo cultivo que havia antes da mineração. Nas áreas mineradas para bauxita na Zona da Mata Mineira, por exemplo, predomina o cultivo de gramínea forrageira (pasto), café e eucalipto, logo essas também são as culturas que devem ser introduzidas no processo de reabilitação pós-mineração (Oliveira *et al.*, 2017a; Valente *et al.*, 2021; Vilas Boas *et al.*, 2018). Entretanto, vale destacar que a reabilitação da qualidade desses solos minerados ainda é um grande desafio, visto que pode ser necessário um manejo mais conservacionista ao longo de vários anos (Teixeira *et al.*, 2019; Vilas Boas *et al.*, 2018).

A MOS se destaca por apresentar uma boa correlação com a qualidade do solo (Adetunji *et al.*, 2020; Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023). Logo, práticas que visem aumentar a MOS, tendem também a ser o caminho para que as áreas mineradas possam ser capazes de alcançar uma produtividade mais sustentável ao longo do tempo. Vários tipos de manejos podem ser adotados nessas áreas degradadas, mas deve-se priorizar aqueles que mantenham o solo coberto, com biodiversidade de plantas e boa produção de biomassa (Dowarah *et al.*, 2009; Francaviglia *et al.*, 2017). Nos cultivos de café, por exemplo, o cultivo de plantas de cobertura nas entrelinhas é um dos manejos que tende a aumentar a biomassa produzida e os teores de MOS (Cavalcante *et al.*, 2019; Vilas Boas *et al.*, 2018). As plantas de cobertura atuam na proteção do solo contra a erosão, além de aumentar a diversidade de plantas, de macro e microrganismos no ambiente (Adetunji *et al.*, 2020). Entre os diversos tipos de plantas a serem usados no processo de reabilitação, as leguminosas possuem como diferencial a possibilidade de fixação do nitrogênio atmosférico, elemento normalmente escasso em áreas degradadas de regiões tropicais (González *et al.*, 2019; Valente *et al.*, 2019).

Já as gramíneas forrageiras possuem como vantagem a grande produção de raízes e exsudatos, que pode propiciar maior desenvolvimento dos microrganismos no solo e o aumento da MOS (Alves *et al.*, 2020; Ruiz; Cherubin; Ferreira, 2020). As gramíneas forrageiras também cobrem rapidamente o solo, são vigorosas e produzem grande volume de biomassa (Doblas-Rodrigo *et al.*, 2023). Apesar dos benefícios dessas plantas em áreas em processo de reabilitação, deve-se atentar ao seu manejo, de modo a fornecer os recursos necessários para o desenvolvimento satisfatórios das gramíneas forrageiras. Logo, se a área em reabilitação for usada para fins zootécnicos, manter lotação correta de animais (Cardoso *et al.*, 2020).

Devido a perda de qualidade desses solos no processo de mineração, a adubação é fundamental (Gardioli *et al.*, 2023; Valente *et al.*, 2023). Entre as diversas fontes de fertilizantes, os adubos químicos possuem as principais características a elevada concentração de nutrientes e facilidade de aplicação. Por outro lado, os adubos orgânicos possuem menor concentração de nutrientes, mas são ricos em compostos orgânicos, que podem estimular o desenvolvimento da microbiota do solo (Teixeira *et al.*, 2019). A maior atividade microbiana pode desencadear em diversos processos no solo, que além de possibilitar a maior formação de MOS e melhoria da qualidade do solo, pode favorecer a ciclagem de nutrientes e o maior desenvolvimento de plantas (Pace *et al.*, 2025). A combinação dessas diferentes fontes de adubos pode ser uma boa forma de aproveitar as vantagens de cada um, podendo aumentar a produtividade e melhorar a MOS (Cavalcante *et al.*, 2019; Vilas Boas *et al.*, 2018).

A reabilitação de solos afetados pela mineração é um processo longo e demanda elevada atenção ao manejo aplicado. O monitoramento das áreas mineradas em processo de reabilitação é fundamental, assim como o conhecimento dos indicadores de qualidade do solo mais apropriados para um determinado local (Bi *et al.*, 2010; Domínguez-Haydar *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2010). Alguns atributos do solo são muito sensíveis a mudanças de manejo, podendo ser utilizados como indicadores de qualidade. Podemos citar, por exemplo, as enzimas presentes do solo, que são consideradas indicadores sensíveis, pois respondem de maneira rápida à mudanças de manejo do solo (Adetunji *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2020). Entretanto, o carbono orgânico total pode ser considerado um atributo menos sensível, sendo necessário maior intervalo de tempo para essa variável apresentar respostas a diferentes manejos (Domínguez-Haydar *et al.*, 2019). Logo, deve-se ter conhecimento da área analisada e o estágio de reabilitação que esta se encontra, de modo a utilizar os indicadores que evidenciem manejos mais eficientes para a reabilitação da qualidade do solo.

Formas de manejos para aumentar a qualidade do solo em áreas degradadas em regiões tropicais ainda precisam ser mais bem estudadas, a adição de adubos orgânicos e uso coberturas são práticas indispensáveis. O entendimento da dinâmica da MOS e o uso de indicadores de qualidade do solo nesses ambientes parecem ser fundamentais, pois estão intimamente relacionados ao uso mais eficiente e sustentável do solo (Borges *et al.*, 2019; Valente *et al.*, 2021). Além disso, estudos em áreas mineradas precisam ser monitorados ao longo tempo para compreender como manejos conservacionistas contribuem para a recuperação da qualidade de solo e viabilizam uma produção sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. 2017. Disponível em: <http://abal.org.br/>. Acesso em: 2 maio 2022.
- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. 2024. Disponível em: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/bauxita/>. Acesso em: 19 fev. 2025 b.
- ADETUNJI, Adewole Tomiwa *et al.* Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 204, p. 104717, 2020.
- ADETUNJI, A. T. *et al.* The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of soil science and plant nutrition**, Hoboken, v. 17, n. 3, p. 794–807, 2017.
- ALVES, Lucas Aquino *et al.* The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated crop-livestock system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 203, p. 104678, 2020.
- BI, R. T. *et al.* Establishing a clean-quality indicator system for evaluating reclaimed land in the antaibao opencast mine area, China. **Clean - Soil, Air, Water**, Hoboken, v. 38, n. 8, p. 719–725, 2010.
- BORGES, Silvano R. *et al.* Practices for rehabilitating bauxite-mined areas and an integrative approach to monitor soil quality. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 30, n. 7, p. 866–877, 2019.
- CARDOSO, Abmael da Silva *et al.* Intensification: A key strategy to achieve great animal and environmental beef cattle production sustainability in Brachiaria grasslands. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 16, p. 6656, 2020.
- CAVALCANTE, Douglas Monteiro *et al.* Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 107, n. March, p. 105668, 2019.
- CAVALCANTE, Douglas Monteiro; SILVA, Ivo Ribeiro; OLIVEIRA, Teógenes Senna. Soil quality indicators for monitoring the short-term effects of mined soil rehabilitation strategies for bauxite. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 47, p. e0220126, 2023.
- DOBLAS-RODRIGO, Álvaro *et al.* Role of livestock-derived amendments in soil organic carbon stocks in forage crops. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 901, p. 165931, 2023.
- DOMÍNGUEZ-HAYDAR, Yamileth *et al.* Evaluation of reclamation success in an open-pit coal mine using integrated soil physical, chemical and biological quality indicators. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 103, p. 182–193, 2019.
- DOWARAH, J. *et al.* Eco-restoration of a high-sulphur coal mine overburden dumping site in northeast India: A case study. **Journal of Earth System Science**, Bangalore, v. 118, n. 5, p. 597–608, 2009.

FRANCAVIGLIA, Rosa *et al.* Soil organic carbon sequestration and tillage systems in the Mediterranean Basin: a data mining approach. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 107, n. 1, p. 125–137, 2017.

GARDIOLI, Luiz Fernando Negris *et al.* N fertilization did not raise soil greenhouse gas emissions in a reforested reclaimed-mine site over a short-term study. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 194, p. 107040, 2023.

GONZÁLEZ, A. H. *et al.* Bradyrhizobium and Pseudomonas strains obtained from coal-mining areas nodulate and promote the growth of Calopogonium muconoides plants used in the reclamation of degraded areas. **Journal of Applied Microbiology**, Oxford, v. 126, n. 2, p. 523–533, 2019.

LEE, Sang Hwan *et al.* Use of Soil Enzymes as Indicators for Contaminated Soil Monitoring and Sustainable Management. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 19, p. 8209, 2020.

OLIVEIRA, Dener Márcio da Silva *et al.* Carbon Fluxes from Different Pools in a Mined Area under Reclamation in Minas Gerais State, Brazil. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 28, n. 2, p. 507–514, 2017.

PACE, Roberta *et al.* Artificial intelligence in soil microbiome analysis: a potential application in predicting and enhancing soil health—a review. **Discover Applied Sciences**, New York, v. 7, n. 2, p. 85, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s42452-024-06381-4>. Acesso em: 19 fev. 2025.

RUIZ, Francisco; CHERUBIN, Maurício Roberto; FERREIRA, Tiago Osório. Soil quality assessment of constructed Technosols: Towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. **Journal of Environmental Management**, London, v. 276, p. 111344, 2020.

SIMMONDS, S. J.; MAJER, J. D.; NICHOLS, O. G. A Comparative Study of Spider (Araneae) Communities of Rehabilitated Bauxite Mines and Surrounding Forest in the Southwest of Western Australia. **Restoration Ecology**, Hoboken, v. 2, n. 4, p. 247–260, 1994.

TEIXEIRA, Rafael S. *et al.* Impact of fertilization on cover crops and microbial community on a bauxite-mined soil undergoing reclamation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 182, n. 4, p. 515–523, 2019.

VALENTE, Fernanda Daniele de Almeida *et al.* Growth, biomass and carbon stocks in forest cover planted in an area of bauxite mining in rehabilitation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, p. 1–15, 2019.

VALENTE, Fernanda D.A. *et al.* Influence of different tree species on autotrophic and heterotrophic soil respiration in a mined area under reclamation. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 32, n. 15, p. 4288–4299, 2021.

VALENTE, Fernanda D. A. *et al.* Litterfall production, decomposition and litter nutrient contents in a mined area revegetated with different forest species. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 47, p. e0220122, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/wy8WGBbZrN9KCKQDqsztfs/?lang=en>. Acesso em: 30 nov. 2024.

VALENTE, Fernanda D. Almeida *et al.* Native multispecies and fast-growing forest root biomass increase C and N stocks in a reclaimed bauxite mining area. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 195, n. 1, p. 1–19, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-022-10720-6>. Acesso em: 30 nov. 2024.

VILAS BOAS, Hiran F. *et al.* Soil organic carbon recovery and coffee bean yield following bauxite mining. **Land Degradation & Development**, Hoboken, v. 29, n. 6, p. 1565–1573, 2018.

WANG, Qiang *et al.* Efficiencies of different microbial parameters as indicator to assess slight metal pollutions in a farm field near a gold mining area. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 161, n. 1–4, p. 495–508, 2010.

WICK, A. F. *et al.* Soil aggregation and organic carbon in short-term stockpiles. **Soil Use and Management**, Hoboken, v. 25, n. 3, p. 311–319, 2009.

CAPÍTULO 1 - MONITORAMENTO DA MATÉRIA ORGÂNICA E QUALIDADE DO SOLO EM ÁREA CULTIVADA POR 11 ANOS COM CAFEIEIRO PÓS-MINERADA PARA BAUXITA

RESUMO

A escolha de um manejo adequado em áreas pós-mineradas da bauxita é fundamental para que se possa aliar a qualidade do solo e o desenvolvimento de plantas. O aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS) é fundamental nesse processo. O presente estudo objetivou avaliar a MOS e a qualidade do solo em área pós-minerada para bauxita manejada 11 anos com cafeieiro, utilizando diferentes tipos de adubação e plantas de cobertura. O estudo foi conduzido em São Sebastião da Vargem Alegre, MG, Brasil. O experimento com cafeieiro foi introduzido após a mineração para bauxita na área. As parcelas experimentais foram compostas por diferentes adubações: controle sem adubação (AC), adubação química (AQ), cama de frango (CF) e cama de frango + química (CF+Q). As subparcelas possuíam quatro tipos de plantas de cobertura: sem planta (SP), braquiária (B), leguminosa (L) e braquiária + leguminosa (B+L). Foram analisados os teores de carbono (C) e de nitrogênio (N), a razão isotópica ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) da matéria orgânica associada aos minerais (MAM) e particulada (MOP) e os teores de C lábil. O índice de qualidade do solo (IQS) também foi estimado. Na entrelinha do cafeieiro também foi cultivado plantas de feijão, de modo a quantificar a produtividade. Os tratamentos com B+L apresentaram os maiores aportes de C-MAM e N-MAM nas diferentes profundidades estudadas, quando a adubação foi CF+Q. Neste tratamento, os teores de C-MAM ($21,3 \pm 2,2 \text{ g kg}^{-1}$) e N-MAM ($1,5 \pm 0,2 \text{ g kg}^{-1}$), em média, foi superior 27,5% e 36,4% aos demais, respectivamente, considerando todas as profundidades estudadas (0-20, 20-40 e 40-60 cm). O C oriundo de plantas C_4 foi essencial para a formação de MOS nos tratamentos com B ou B+L, sendo a contribuição média de C- C_4 de 36,0% $\pm 6,1$, 22,1% $\pm 7,7$ e 12,1% $\pm 10,3$ para a profundidade de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. As adubações com CF ou CF+Q proporcionaram ganhos significativos na qualidade do solo, a qual resultaram em maiores valores de IQS ($\approx 0,54 \pm 0,03$), além de maiores produtividades do feijoeiro ($\approx 535 \pm 67 \text{ kg ha}^{-1}$). O uso da B+L se destacou pelo aumento de MOS em superfície e subsuperfície, enquanto que a adubação com CF ou CF+Q, esteve relacionada a melhorias nos índices de qualidade do solo, mesmo após 11 anos de sua aplicação em área pós-minerada para bauxita.

Palavras-chave: Razão isotópica; Índice de Qualidade; Isótopos; Plantas de cobertura.

CHAPTER 1 - SOIL QUALITY AND ORGANIC MATTER MONITORING IN A POST-MINING BAUXITE AREA UNDER 11 YEARS- OF COFFEE CULTIVATION

ABSTRACT

The selection of appropriate management practices in post-bauxite-mining areas is essential to promote both soil quality and plant development. The increase in soil organic matter (MOS) plays a key role in this process. This study aimed to evaluate soil quality and MOS in a post-bauxite-mined area cultivated with coffee for 11 years, under different fertilization types and cover crops. The study was conducted in São Sebastião da Vargem Alegre, MG, Brazil. The coffee experiment was established after bauxite mining in the area. Experimental plots received different fertilization treatments: control without fertilization (AC), chemical fertilization (AQ), poultry litter (CF), and poultry litter + chemical fertilization (CF+Q). Subplots included four types of cover crops: bare soil (SP), Brachiaria (B), legume (L), and Brachiaria + legume (B+L). The concentrations of carbon (C), nitrogen (N), and the isotopic ratio ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in mineral-associated organic matter (MAM) and particulate organic matter (MOP) were analyzed, along with labile C and the soil quality index (IQS). Beans were also cultivated in the coffee inter-row to quantify yield. Treatments with B+L showed the highest inputs of C-MAM and N-MAM at all evaluated depths when fertilization was CF+Q. In this treatment, C-MAM ($21.3 \pm 2.2 \text{ g kg}^{-1}$) and N-MAM ($1.5 \pm 0.2 \text{ g kg}^{-1}$) contents were 27.5% and 36.4% higher, respectively, than the other treatments across all depths (0–20, 20–40, and 40–60 cm). The contribution of C from C_4 plants was essential for MOS formation in treatments with B or B+L, with mean contributions of C- C_4 of $36.0\% \pm 6.1$, $22.1\% \pm 7.7$, and $12.1\% \pm 10.3$ at 0–20, 20–40, and 40–60 cm depths, respectively. Fertilizations with CF or CF+Q led to significant gains in soil quality, as reflected in higher IQS values ($\approx 0.54 \pm 0.03$), as well as increased bean yields ($\approx 535 \pm 67 \text{ kg ha}^{-1}$). The B+L combination stood out for enhancing MOS in both surface and subsurface layers, while CF and CF+Q fertilization were associated with long-term improvements in soil quality indices, even 11 years after application in a post-bauxite-mined area.

Keywords: Isotopic ratio; Quality index; Isotopes; Intercropping

1. INTRODUÇÃO

A mineração para bauxita é uma atividade de grande importância para a economia brasileira, a qual contribui com aproximadamente 700 milhões de reais ao PIB anualmente (ABAL, 2017). O Brasil é o quarto maior produtor de bauxita no mundo, com extração anual de aproximadamente 34 milhões de toneladas (ABAL, 2024). Apesar dos benefícios econômicos, a mineração para bauxita resulta em grande impacto ambiental, com considerável degradação do solo. Áreas mineradas para bauxita podem ter a qualidade do solo reduzida em 65% em comparação às condições pré-mineração, fatos ligados a grande movimentação do solo, redução da MOS, quebra de agregados e a mistura dos horizontes do solo (Borges *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2017; Valente, Fernanda D. Almeida *et al.*, 2023).

A melhoria da qualidade do solo de áreas mineradas está atrelada ao incremento nos estoques de matéria orgânica do solo (MOS), a qual pode propiciar maior atividade da fauna e microrganismos, aumento da capacidade de troca catiônica e agregação do solo, características essenciais para a recuperação de áreas degradadas (Carvalho *et al.*, 2023; Rocci *et al.*, 2022, 2024). Entretanto, aumentar o teor de MOS no solo é uma tarefa difícil, pois envolve diversos processos deste ambiente. O fracionamento da MOS pode auxiliar no entendimento de como ocorre seu acúmulo no solo, pois permite explorar mais detalhadamente como diferentes formas de manejo podem contribuir para a formação de suas diferentes frações (Lavalley; Soong; Cotrufo, 2019; Valente, Fernanda D. Almeida *et al.*, 2023). A adição de resíduos orgânicos de maior labilidade, como aqueles oriundos de adubações orgânica ou da biomassa de leguminosas, por exemplo, pode contribuir para a formação de uma MOS mais estável associada aos minerais (Carvalho *et al.*, 2023). A fração mais estável da MOS pode permanecer no solo durante centenas de anos (Cotrufo; Lavalley, 2022), sendo crucial para o processo de reabilitação de áreas mineradas. Manejos que propiciem o aumento da MOS em áreas mineradas também tendem a ser aqueles que resultam em maior sustentabilidade e produtividade agrícolas ao longo do tempo (Vilas Boas *et al.*, 2018).

Além da MOS, o índice de qualidade do solo (IQS) é uma ferramenta que pode ser usada para a avaliação do estágio de reabilitação de áreas mineradas, sendo capaz de identificar as melhores práticas de manejo para as condições específicas de um determinado local (Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023). O monitoramento de áreas mineradas por meio do IQS pode ser uma prática eficiente para uso durante longos períodos de tempo, sendo capaz de avaliar se uma área alcançou um nível considerado ecologicamente sustentável ou se a

recuperação está em um estágio satisfatório (Mukhopadhyay; Maiti; Masto, 2014). Em cultivos de cafeeiro, por exemplo, o uso de plantas de cobertura nas entrelinhas é um tipo de manejo que gera maior sustentabilidade e melhorias na qualidade do solo, mas que também consegue manter bons níveis de produtividade (VILAS BOAS et al., 2018; CAVALCANTE et al., 2019).

Formas de manejos para melhorar a qualidade do solo em áreas pós mineradas para bauxita ainda são pouco estudadas (Borges *et al.*, 2019; Melo *et al.*, 2018). Trabalhos que monitorem a MOS e a qualidade do solo pós-mineração para bauxita por longos períodos de tempo são escassos na literatura. Logo, há a necessidade de entender os estágios de reabilitação do solo aliadas a uma produção agrícola sustentável, de modo que se possa ser implementado técnicas mais eficientes. O presente estudo objetivou avaliar a qualidade do solo e o teor de MOS em área pós-minerada para bauxita manejada 11 anos com cafeeiro, utilizando diferentes tipos de adubação e plantas de cobertura.

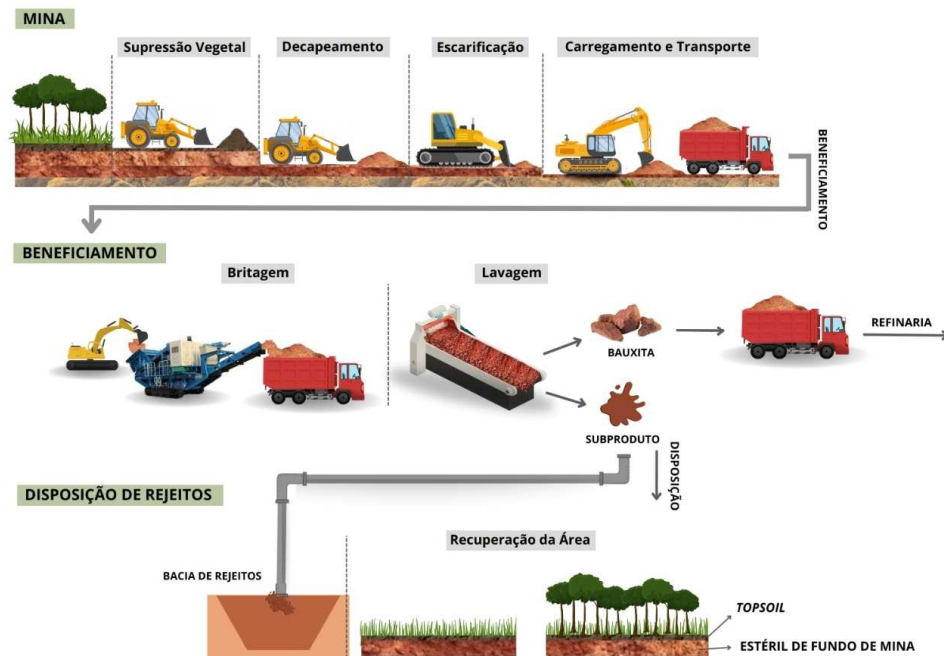
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido em São Sebastião da Vargem Alegre, Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil (21°02'00" S e 42°35'03" O). O relevo da região é forte ondulado e o clima predominante é do tipo Cwa (Köppen), com verões quentes e chuvosos e invernos secos, sendo a precipitação e temperatura média anual de 1287 mm e 20,3 °C, respectivamente (Valente *et al.*, 2021). O solo predominante da região é do tipo Latossolo Vermelho Amarelo, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018), que corresponde a um Oxisoil (Soil Survey Staff, 2022) e a um Orthoystic Ferralsol, in the World Reference Base for Soil Resources (IUSS World Group WRB, 2022).

A área experimental era ocupada por uma lavoura de café de dez anos, que foi retirada para a mineração para bauxita nos anos de 2009 e 2010 pela Companhia Brasileira de Alumínio - Votorantim Metais (Teixeira *et al.*, 2019). Após a mineração, a reconfiguração topográfica foi realizada, sendo o subsolo exposto descompactado com subsolador, e o *topsoil* (camada de solo acima do minério, com $\approx 0,5$ a 2,0 m de espessura e formada pelos horizontes A e B), que estava estocado em leiras durante 15 meses, retornado para a área, numa camada de 0,40 a 0,60 m (Figura 1). A área foi novamente descompactada com subsolador e os terraços em nível foram construídos (Borges *et al.*, 2019).

Figura 1. Esquema do processo de mineração para bauxita e reabilitação das áreas mineradas



Fonte: Vieira (2025)

O experimento de reabilitação com o manejo da cultura do café (*Coffea arabica*, var. Catuaí vermelho IAC 144) foi instalado oito meses após a reconfiguração topográfica da área (fevereiro de 2011), com o plantio realizado em curvas de nível. O espaçamento do cafeeiro foi de 0,5 m entre plantas e 2,0 m entre linhas, totalizando 10.000 plantas por hectare (Borges *et al.*, 2019). O experimento foi conduzido em delineamento em bloco ao acaso, em parcela subdividida, com quatro repetições. As parcelas, com tamanho de 28 x 14 m e com 392 plantas distribuídas em sete linhas, receberam diferentes adubações de plantio: controle sem adubação (AC); adubação orgânica com cama de frango (CF), sendo 50 t ha⁻¹ de cama de frango (em base seca); adubação química (AQ), correspondente a 8 t ha⁻¹ de calcário dolomítico com 80% de PRNT e 1,5 t ha⁻¹ de fosfato natural reativo de Bayóvar; e adubação orgânica + química (CF+Q), que foi a combinação de CF e AQ (Tabela 1). As adubações de formação foram feitas parceladas nos tratamentos AQ e CF+Q nos dois primeiros anos após a implantação do cafeeiro. Do terceiro ano em diante foram realizadas adubações de produção nas linhas do cafeeiro, sendo aplicado de forma parcelada 400 kg ha⁻¹ de NPK 20-05-20 para todos os tratamentos, com exceção do tratamento sem adubação.

Tabela 1. Fontes e quantidades totais de nutrientes, matéria seca e carbono orgânico (C) adicionados na implantação do experimento em área de reabilitação com cafeeiro e plantas de cobertura intercalares

Adubação	Local	Fonte	MS	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Cu	Zn
			t ha ⁻¹			kg ha ⁻¹								
Orgânica – Cama de frango (CF)	L	CA	25	8,8	605	235	579	532	91	123	8,3	188,6	1,3	7,0
	EL	CA	25	8,8	605	235	579	532	91	123	8,3	188,6	1,3	7,0
	Total	(L + EL)		17,6	1.211	470	1.158	1.063	187	247	16,6	377,2	2,6	14,0
		Calcário	3	-	-	-	-	757	193	-	-	-	-	-
Cama de frango +	L	CA	25	8,8	605	235	579	532	91	123	8,3	188,6	1,3	7,0
		FNR	1,5	-	10	195	1,6	483	5	20	0,1	0,1	0,0	0,1
		Total L		8,8	615	430	580	1.771	290	144	8,4	188,7	1,3	7,1
	Química (CF+Q)	EL	Calcário	5	-	-	-	-	1.513	386	-	-	-	-
CA			25	8,8	605	235	579	532	91	123	8,3	188,6	1,3	7,0
FNR			0,7	-	4,6	91	0,7	225	2,5	9,5	0	0	0	0,1
Total EL		8,8	610	326	580	2.270	480	133	8,3	188,6	1,3	7,1		
Total	(L + EL)		17,6	1.225	756	1.160	4.041	769	276	16,7	377,3	2,6	14,2	
Química (AQ)	L	Calcário	2,7	-	-	-	-	757	193	-	-	-	-	-
		FNR	1,5	-	10	195	1,6	483	5,3	20	0,1	0,1	0	0,1
		Total L		-	10	195	1,6	1.240	198	20	0,1	0,1	0	0,1
	EL	Calcário	5,3	-	-	-	-	1.513	386	-	-	-	-	-
FNR		0,70	-	4,6	91	0,7	225	2,5	10	0	0	0	0,1	
Total EL		-	4,6	91	0,7	1.738	388	10	0	0	0	0	0,1	
Total	(L + EL)		-	15	286	2,3	2.978	587	30	0,1	0,1	0	0,2	
Controle (AC)	Sem adubação													

L = linha de plantio do cafeeiro; EL = entrelinha; FNR = fosfato natural reativo; MS = massa seca. Fonte: Borges *et al.* (2019).

Cada parcela experimental foi composta por quatro subparcelas de 14 x 7 m, que possuíam plantas de cobertura intercalares: sem planta de cobertura (SP), com entrelinhas sempre mantidas sem plantas; cultivo de braquiária (B), com plantio de 25 kg ha⁻¹ de sementes viáveis de *Urochloa brizantha* cv. Piatã; cultivo de leguminosa (L), com o plantio de 2,5 kg ha⁻¹ de sementes viáveis de estilosantes (80% de *Stylosanthes capitata* e 20% de *Stylosanthes macrocephala*); e a combinação de braquiária + leguminosa (B+L)(Figura 2). As plantas de cobertura eram roçadas a altura de 10-20 cm em intervalos de aproximadamente de 60 dias, e os seus resíduos eram manejados para as linhas de plantio do cafeeiro (Cavalcante *et al.*, 2019).

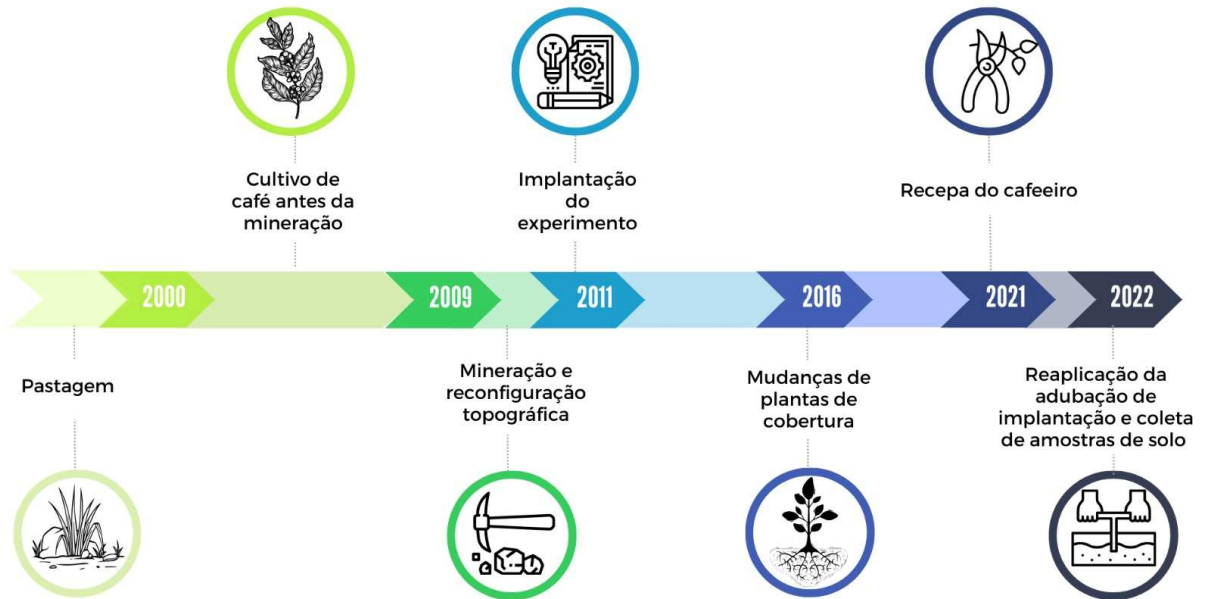
Figura 2. Área experimental pós-mineração para bauxita em reabilitação com cafeeiro manejado com diferentes adubações e plantas de cobertura adubações (controle sem adubação; adubação com cama de frango; adubação química; e adubação química + orgânica) e plantas de cobertura (sem plantas; leguminosas; braquiária; e braquiária + leguminosa)



O manejo das plantas de cobertura foi alterado em setembro de 2016. A *Urochloa brizantha* substituída por *Urochloa ruziziensis* (plantio de 25 kg ha⁻¹ de semente viáveis) e o estilosantes substituído por outra leguminosa, o feijão guandu (*Cajanus cajan*) (plantio de 20 kg ha⁻¹ de semente viáveis). Estas plantas de cobertura permaneceram na área por 3 anos, sendo que a braquiária era roçada quando atingia 0,60 m de comprimento e o feijão guandu era cortado no florescimento, o resíduo de ambas eram manejados para a linha do cafeeiro. A partir de 2019 até a data de coleta de solo, não havia plantas de cobertura nas entrelinhas do cafeeiro. Após a colheita de café da safra do ano de 2021, a recepa de todo o cafeeiro foi realizada, com o corte do ramo ortotrópico na altura de 20 a 40 cm do solo. Os resíduos oriundos das plantas de café recepados foram deixados na área.

Ainda no ano de 2021, o plantio de uma linha de feijão na entrelinha do cafeeiro foi realizado, sendo aplicado 100 kg de Superfosfato simples (03-00-16) junto ao plantio das sementes. A colheita do feijão foi feita manualmente e a produtividade calculada para cada um dos tratamentos do experimento. Após a colheita do feijão, uma nova adubação de implantação foi feita no cafeeiro, sendo refeita a adubação química no tratamento AQ, aplicação de 10 t ha⁻¹ (base seca) de cama de frango em CF, a combinação AQ e CF no tratamento CF+Q e o tratamento AC não recebeu adubação (Figura 3).

Figura 3. Linha do tempo do uso e manejo da área experimental minerada para bauxita em processo de reabilitação com cafeeiro.



2.2. Amostragem e análise química e física do solo

A coleta de amostras de solo deformadas foi realizada nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm na área experimental e em duas áreas de referência próximas ao experimento (café não minerado (CNM) e mata nativa (MN)). Anéis volumétricos também foram coletados para a determinação da densidade do solo (Teixeira *et al.*, 2017). As coletas de solo foram realizadas em outubro de 2022, sendo feitas nas entrelinhas do cafeeiro, com cinco pontos de coleta para cada subparcela.

As amostras deformadas foram coletadas com sonda, levadas para laboratório para secagem em sombra e passadas em peneiras de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). A caracterização química e física foi realizada conforme Teixeira *et al.* (2017). O pH em água (1:2,5) foi determinado por potenciometria; o K e P disponíveis foram extraídos em Mehlich-1 e determinados com fotometria de chama e colorimetria, respectivamente; o Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos por KCl 1 mol L^{-1} , sendo o Ca^{2+} e Mg^{2+} determinados por espectrometria de absorção atômica e o Al^{3+} por titulometria com NaOH 0,025 mol L^{-1} ; o H+Al foi extraído por acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} em pH 7,0 e determinado por titulometria. A soma de bases (SB) foi obtida pela soma de K, Ca^{2+} e Mg^{2+} (Tabela 2).

Tabela 2. Atributos químicos de uma área pós-mineração para bauxita em processo de reabilitação com cafeeiro manejado 11 anos com diferentes adubações e plantas de cobertura.

Ad	Cob	pH H ₂ O	----- mg dm ⁻³ -----			----- cmolc dm ⁻³ -----				P-rem mg L ⁻¹
			P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	T	
Profundidade 0 – 20 cm										
AC	SP	5,1 ±0,2	14,2 ±10,9	123,5 ±41,8	0,5 ±0,2	0,2 ±0,1	0,1 ±0,0	5,5 ±0,2	6,6 ±0,5	11,3 ±3,3
AC	L	4,8 ±0,1	9,1 ±7,7	119,0 ±51,4	0,4 ±0,2	0,2 ±0,1	0,2 ±0,1	5,9 ±0,7	6,8 ±0,4	10,6 ±7,3
AC	B	5,1 ±0,1	7,2 ±4,1	109,8 ±7,3	0,6 ±0,1	0,3 ±0,1	0,2 ±0,1	6,3 ±0,6	7,4 ±0,2	12,3 ±2,7
AC	B + L	4,9 ±0,1	6,3 ±2,2	95,0 ±25,0	0,6 ±0,2	0,3 ±0,1	0,2 ±0,0	6,8 ±0,3	8,0 ±0,4	13,7 ±9,8
CF	SP	5,9 ±0,2	29,0 ±11,5	161,3 ±37,5	3,4 ±0,6	1,1 ±0,2	0,0 ±0,0	3,6 ±0,6	8,5 ±0,8	15,4 ±0,0
CF	L	5,7 ±0,1	15,6 ±3,1	151,3 ±37,3	3,3 ±0,6	0,9 ±0,1	0,0 ±0,0	4,6 ±0,5	9,2 ±0,7	14,2 ±0,0
CF	B	5,8 ±0,1	52,0 ±25,0	202,0 ±18,9	3,7 ±0,1	1,1 ±0,1	0,0 ±0,0	4,1 ±0,5	9,4 ±0,3	16,9 ±0,0
CF	B + L	5,8 ±0,1	13,8 ±6,6	141,0 ±26,1	3,5 ±0,5	1,0 ±0,2	0,0 ±0,0	3,8 ±0,5	8,6 ±0,8	13,6 ±0,0
AQ	SP	6,0 ±0,1	39,7 ±14,7	144,8 ±15,6	3,4 ±0,2	1,0 ±0,1	0,0 ±0,0	3,1 ±0,5	7,9 ±0,3	13,5 ±0,0
AQ	L	6,1 ±0,1	23,0 ±10,1	186,5 ±44,6	3,9 ±0,4	1,2 ±0,2	0,0 ±0,0	3,1 ±0,7	8,7 ±0,7	13,4 ±0,0
AQ	B	5,8 ±0,1	32,0 ±11,9	152,0 ±20,0	3,5 ±0,5	1,2 ±0,2	0,0 ±0,0	3,9 ±0,3	8,9 ±0,7	15,1 ±0,0
AQ	B + L	5,8 ±0,1	35,2 ±13,9	155,0 ±39,4	3,4 ±0,5	1,1 ±0,2	0,0 ±0,0	4,3 ±0,4	9,2 ±0,7	15,0 ±0,0
CF+Q	SP	6,3 ±0,2	78,8 ±26,7	170,0 ±24,9	4,7 ±0,3	1,3 ±0,1	0,0 ±0,0	2,8 ±0,6	9,2 ±0,4	15,0 ±0,0
CF+Q	L	6,2 ±0,2	69,5 ±22,2	148,5 ±31,0	4,6 ±0,5	1,3 ±0,1	0,0 ±0,0	3,0 ±0,4	9,2 ±0,6	17,3 ±0,0
CF+Q	B	6,2 ±0,2	38,7 ±7,5	167,5 ±45,5	5,1 ±0,4	1,5 ±0,2	0,0 ±0,0	3,1 ±0,4	10,1 ±0,6	16,2 ±0,0
CF+Q	B + L	6,3 ±0,1	54,5 ±20,1	137,3 ±24,5	5,8 ±0,3	1,7 ±0,2	0,0 ±0,0	2,8 ±0,4	10,7 ±0,4	17,1 ±0,0
Profundidade 20-40 cm										
AC	SP	4,7 ±0,2	0,8 ±0,3	39,8 ±17,8	0,2 ±0,2	0,1 ±0,1	0,2 ±0,1	5,5 ±0,3	5,9 ±0,3	7,7 ±15,4
AC	L	4,7 ±0,1	0,7 ±0,3	35,5 ±15,1	0,1 ±0,0	0,0 ±0,0	0,1 ±0,1	4,8 ±0,6	5,0 ±0,1	7,1 ±9,7
AC	B	4,9 ±0,2	0,6 ±0,1	38,0 ±8,4	0,2 ±0,1	0,0 ±0,0	0,1 ±0,1	5,1 ±0,9	5,5 ±0,1	7,6 ±10,2
AC	B + L	4,7 ±0,1	0,9 ±0,4	43,0 ±7,9	0,2 ±0,0	0,1 ±0,0	0,2 ±0,0	6,2 ±0,3	6,6 ±0,1	8,8 ±3,8
CF	SP	5,1 ±0,1	3,5 ±1,0	65,0 ±7,0	1,1 ±0,2	0,3 ±0,1	0,1 ±0,1	4,8 ±0,8	6,4 ±0,3	8,1 ±4,0
CF	L	5,2 ±0,1	1,8 ±0,6	62,3 ±9,4	1,0 ±0,2	0,3 ±0,1	0,1 ±0,0	4,9 ±0,8	6,3 ±0,3	7,7 ±2,8
CF	B	5,1 ±0,1	2,4 ±0,5	76,0 ±9,1	1,2 ±0,2	0,3 ±0,0	0,0 ±0,0	4,5 ±0,3	6,2 ±0,2	8,7 ±2,3
CF	B + L	5,2 ±0,0	1,9 ±0,7	62,8 ±8,4	1,2 ±0,3	0,3 ±0,1	0,1 ±0,0	4,7 ±1,0	6,4 ±0,4	8,7 ±2,8
AQ	SP	5,3 ±0,2	4,5 ±2,4	63,3 ±14,6	1,1 ±0,2	0,3 ±0,1	0,2 ±0,1	4,7 ±1,1	6,2 ±0,3	8,0 ±6,4
AQ	L	5,3 ±0,1	1,8 ±0,5	54,3 ±2,8	1,1 ±0,1	0,3 ±0,0	0,0 ±0,0	5,0 ±0,4	6,5 ±0,1	8,7 ±0,9
AQ	B	5,2 ±0,1	4,1 ±1,6	63,8 ±6,8	1,4 ±0,2	0,4 ±0,1	0,0 ±0,0	5,1 ±0,5	7,1 ±0,3	10,1 ±1,4
AQ	B + L	5,1 ±0,1	7,7 ±6,0	70,5 ±17,2	1,2 ±0,2	0,4 ±0,0	0,1 ±0,1	5,3 ±0,9	7,0 ±0,2	10,0 ±2,9
CF+Q	SP	5,7 ±0,3	3,7 ±0,6	73,0 ±8,7	1,7 ±0,3	0,4 ±0,1	0,0 ±0,0	4,2 ±0,8	6,4 ±0,4	10,3 ±1,3
CF+Q	L	5,6 ±0,1	3,2 ±0,6	65,3 ±10,4	1,2 ±0,2	0,4 ±0,1	0,0 ±0,0	3,5 ±0,7	5,3 ±0,2	8,5 ±0,0
CF+Q	B	5,7 ±0,1	5,4 ±0,6	74,5 ±11,9	1,8 ±0,5	0,5 ±0,1	0,0 ±0,0	3,7 ±0,6	6,2 ±0,6	8,7 ±0,0
CF+Q	B + L	5,8 ±0,1	5,3 ±1,5	74,0 ±3,8	2,7 ±0,3	0,7 ±0,1	0,0 ±0,0	4,7 ±0,8	8,4 ±0,3	13,7 ±0,0
Profundidade 40 – 60 cm										
AC	SP	4,8 ±0,1	0,6 ±0,2	25,8 ±7,9	0,3 ±0,1	0,1 ±0,0	0,1 ±0,1	4,3 ±0,7	4,8 ±0,1	6,4 ±5,6
AC	L	4,7 ±0,1	0,4 ±0,2	19,0 ±6,0	0,1 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	3,5 ±0,6	3,6 ±0,1	5,6 ±6,5
AC	B	5,0 ±0,2	0,5 ±0,3	27,8 ±5,3	0,2 ±0,1	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	3,3 ±0,6	3,6 ±0,1	5,7 ±0,0
AC	B + L	4,7 ±0,1	1,1 ±0,5	30,3 ±6,3	0,2 ±0,1	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	4,6 ±0,4	5,0 ±0,1	7,7 ±8,4
CF	SP	5,1 ±0,1	2,5 ±1,5	58,3 ±8,9	1,0 ±0,3	0,3 ±0,1	0,1 ±0,0	3,9 ±1,1	5,3 ±0,5	7,2 ±6,1
CF	L	5,1 ±0,2	1,1 ±0,5	43,8 ±4,8	0,7 ±0,3	0,2 ±0,1	0,0 ±0,0	3,4 ±0,8	4,4 ±0,3	5,4 ±0,0
CF	B	5,1 ±0,1	3,1 ±1,4	62,0 ±7,1	0,9 ±0,1	0,3 ±0,0	0,0 ±0,0	3,6 ±0,7	4,9 ±0,1	6,2 ±1,2
CF	B + L	5,1 ±0,1	0,8 ±0,3	51,0 ±5,8	0,7 ±0,2	0,2 ±0,0	0,0 ±0,0	3,9 ±1,1	4,9 ±0,2	6,2 ±2,4
AQ	SP	5,0 ±0,2	1,8 ±0,6	42,3 ±6,0	0,6 ±0,1	0,2 ±0,0	0,1 ±0,1	3,7 ±1,1	4,6 ±0,2	7,2 ±4,9
AQ	L	5,1 ±0,0	0,9 ±0,3	46,0 ±5,6	0,7 ±0,1	0,2 ±0,0	0,0 ±0,0	3,6 ±0,8	4,6 ±0,2	7,0 ±0,0
AQ	B	5,1 ±0,0	2,0 ±0,4	50,8 ±2,2	0,7 ±0,1	0,2 ±0,0	0,0 ±0,0	4,4 ±0,7	5,5 ±0,1	6,8 ±3,0
AQ	B + L	5,0 ±0,2	3,0 ±2,3	49,5 ±12,2	0,7 ±0,1	0,2 ±0,0	0,1 ±0,1	4,2 ±1,3	5,3 ±0,1	6,4 ±4,7
CF+Q	SP	5,5 ±0,2	2,3 ±0,2	58,3 ±6,9	0,9 ±0,2	0,2 ±0,0	0,0 ±0,0	3,5 ±0,8	4,7 ±0,2	5,8 ±1,0
CF+Q	L	5,4 ±0,2	3,4 ±0,5	58,3 ±4,1	0,9 ±0,2	0,3 ±0,1	0,0 ±0,0	2,5 ±0,6	3,8 ±0,3	4,8 ±0,0

Ad	Cob	pH H ₂ O	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	T	P-rem
			----- mg dm ⁻³ -----			----- cmolc dm ⁻³ -----			mg L ⁻¹	
CF+Q	B	5,6 ±0,0	3,8 ±0,7	58,8 ±5,2	1,0 ±0,1	0,3 ±0,0	0,0 ±0,0	2,4 ±0,4	3,8 ±0,1	5,1 ±0,0
CF+Q	B + L	5,6 ±0,2	4,5 ±1,5	71,8 ±9,1	1,8 ±0,4	0,5 ±0,1	0,0 ±0,0	4,5 ±0,8	7,0 ±0,5	10,5 ±1,8

Adubação (Ad) AC = Controle; CF = adubação orgânica com cama de frango; AQ = adubação química; CF+Q = cama de frango + ad. química. Cobertura (Cob) SP= sem planta; L = leguminosa; B = braquiária, B + L = braquiária + leguminosa. T = CTC total a pH 7,0; P-rem = fósforo remanescente.

2.3. Caracterização da MOS, análise isotópica e enzimática

A matéria orgânica do solo foi fracionada em fração associada aos minerais (MAM) e particulada (MOP) (Cambardella; Elliot, 1992). Cinco gramas de TFSA foram adicionados a 15 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio (5 mol L⁻¹) em tubos Falcon, agitadas por 15 h a 120 rpm e temperatura de 20 °C. Após a agitação, as amostras foram peneiradas (53 µm, 170 mesh), sendo a MOP a fração remanescente na peneira e a MAM a fração tamisada. Em seguida, ambas frações foram secas a 60 °C até peso constante. As amostras de MOP e MAM foram maceradas e passadas em peneiras de 0,149 mm (100 mesh). O teor de C, nitrogênio (N) e composição isotópica - ¹³C/¹²C (expressa como valores de δ¹³C ‰) da MOP e da MAM foram quantificados com o espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS) de fluxo contínuo (ANCA-GSL, 20-20, Sercon, Crewe-UK). O estoque total de C e N foi calculado multiplicando o teor destas variáveis pelo volume e a densidade do solo de cada uma das camadas analisada.

A contribuição de plantas C₄ para o C da MAM e MOP foi calculado da seguinte forma:

$$C-C_4 = \frac{\delta_t - \delta_c}{\delta_b - \delta_c} \times 100$$

em que, δ_t é o δ¹³C de um determinado tratamento; δ_c é o δ¹³C do tratamento de adubação controle e sem planta de cobertura; e δ_b é o δ¹³C da braquiária (δ¹³C = -13,00). Foi adotado o δ¹³C de plantas de café igual a -28,00, logo a contribuição C-C₄ no início do experimento foi de 25,90% (δ¹³C = -24,12); 26,19% (δ¹³C = -24,07); e 24,99% (δ¹³C = -24,25) para a profundidade de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. A presença de C-C₄ na implantação do experimento se deve ao fato que a plantação de café original tinha apenas 10 anos, sendo que antes havia gramínea forrageira.

A estimativa do carbono orgânico lábil (C lábil) foi por meio de extração em KMnO_4 $0,33 \text{ mol L}^{-1}$ e quantificação em espectroscopia de absorção molecular (EAM) com leitura da absorbância a 565 nm (BLAIR; LEFROY; LISLE, (1995), modificado por WEIL et al., 2003).

A determinação da atividade enzimática da fosfatase ácida (AcP) foi realizada conforme Tabatabai (1994). Amostras de solo foram coletadas na camada de 0-5 cm, imediatamente colocadas em caixa de isopor com gelo, e armazenadas a $4 \text{ }^\circ\text{C}$. A AcP foi obtida por meio de extração e determinação colorimétrica (EAM com leitura a 410 nm) do p -nitrofenil liberado quando a amostra de solo passa por incubação com solução tamponada contendo p -nitrofenil-fosfato (PNP).

2.4. Índice de qualidade do solo

O índice de qualidade do solo (IQS) foi calculado conforme Borges et al. (2019). As variáveis C lábil, AcP, Ds e SB foram os indicadores representantes da qualidade orgânica, microbiológica, física e química do solo, respectivamente (Apêndice - Tabela S2). Os valores dos indicadores foram normalizados e convertidos em pontuações que variaram de 0 a 1. Para os indicadores que “maior é melhor” (C lábil, AcP e SB), o maior valor recebeu nota 1, sendo as demais notas relativas a esta. Para a Ds, o cálculo foi o mesmo, mas a nota 1 foi para aquele de menor valor, ou seja, “menor é melhor”. O IQS foi obtido pela soma dos valores dos indicadores, considerando os seus diferentes pesos (C lábil= 30%, Acp= 29%, Ds= 30% e SB= 11%).

2.5. Análises estatísticas

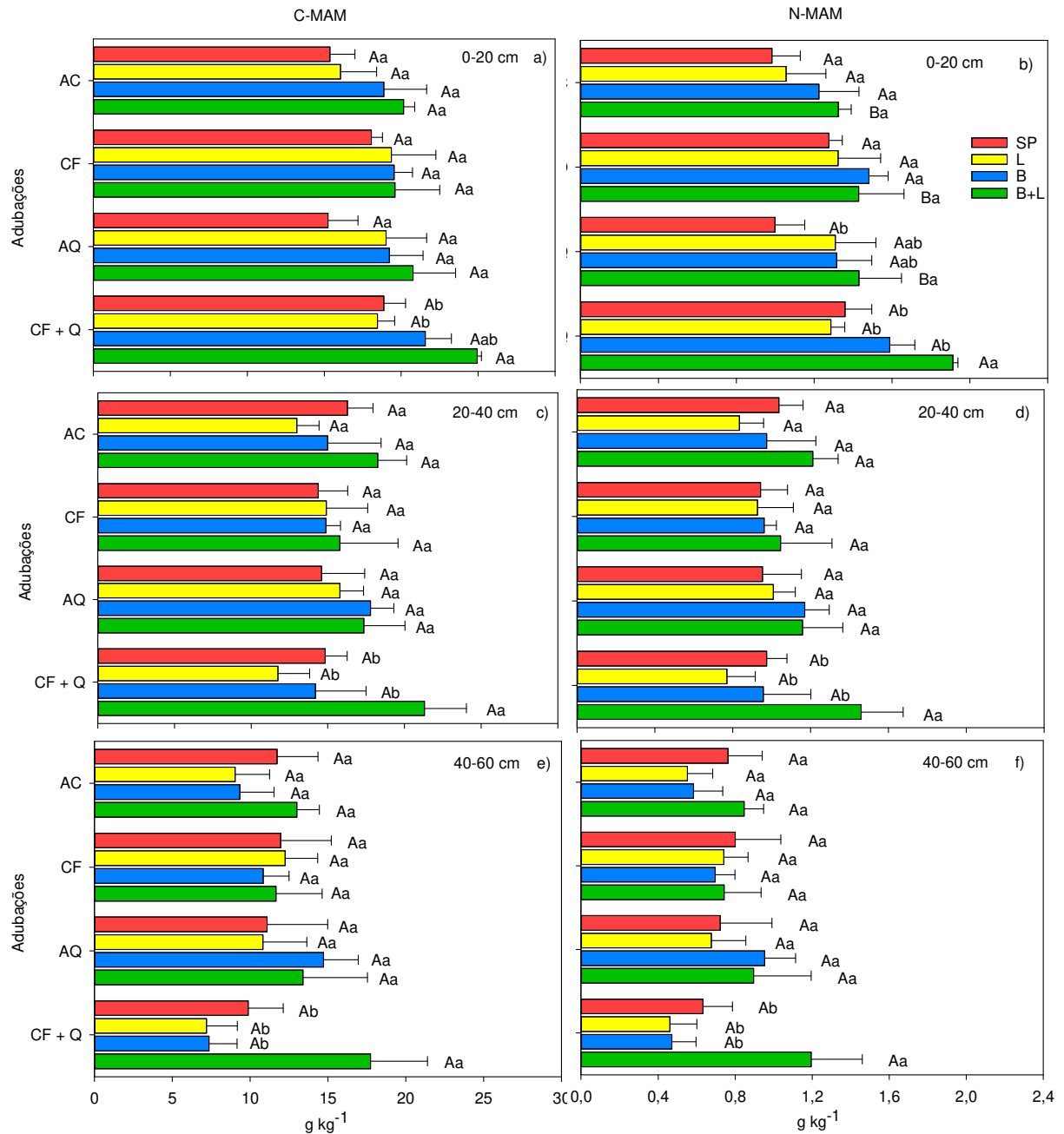
Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), verificando os pressupostos de normalidade, homoscedasticidade e aditividade, em seguida, realizou-se o teste SNK a 5% de probabilidade. As análises foram feitas no software R versão 4.4.1 (R Development Core Team, 2024).

3. RESULTADOS

3.1. Carbono e nitrogênio do solo

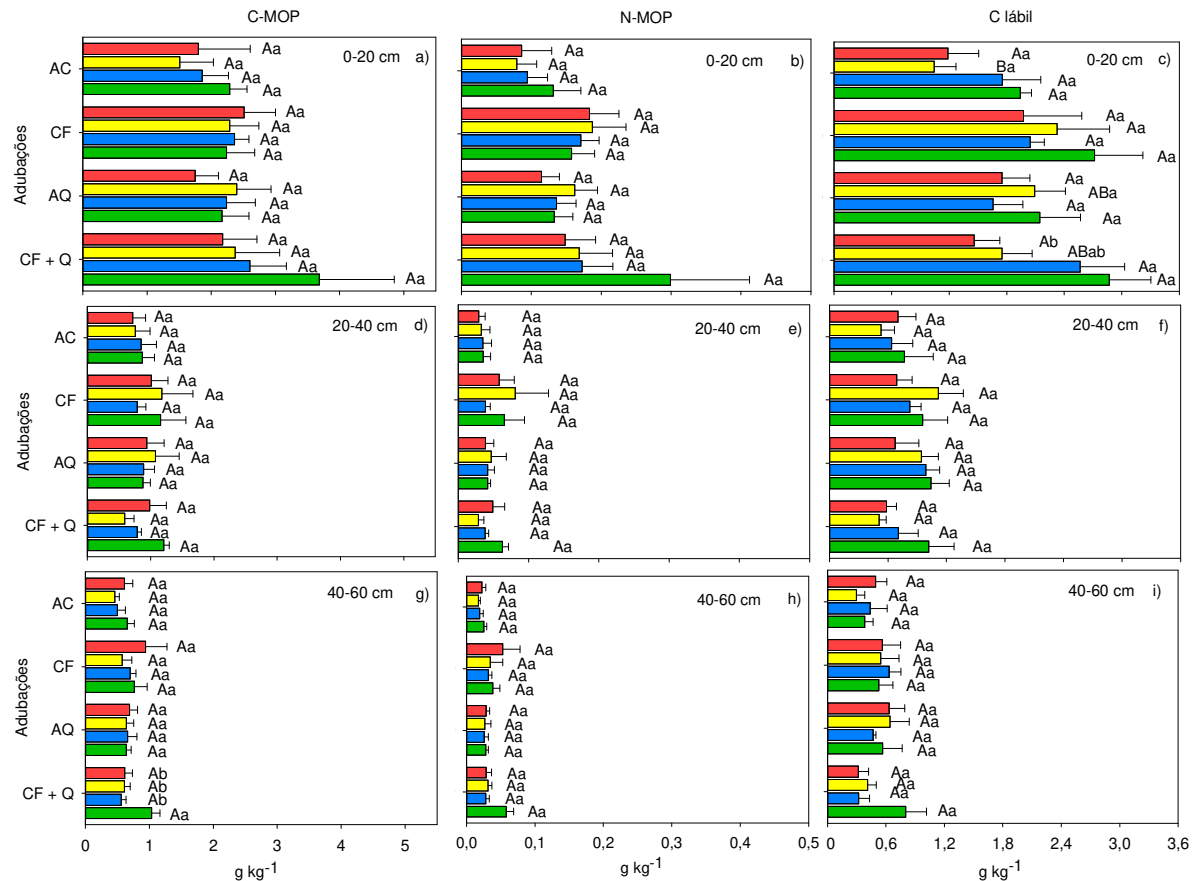
Os teores de C e N associados a MAM foram alterados nas áreas com distintas plantas de cobertura. No tratamento B+L se observou os maiores teores de C-MAM e N-MAM nas três profundidades de solo, quando a adubação foi CF+Q (Figura 4). Neste tratamento, os teores de C-MAM foram de $25,0 \pm 0,3$, $21,3 \pm 0,3$ e $17,7 \pm 0,4$ g kg⁻¹, enquanto os teores de N-MAM foram de $1,9 \pm 0,0$, $1,5 \pm 0,2$ e $1,2 \pm 0,3$ g kg⁻¹, para as profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. A adubação alterou apenas o teor de N-MAM, sendo a adubação com CF+Q superior às demais na profundidade 0-20 cm, quando a planta de cobertura foi B + L.

Figura 4. Teor de carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) da matéria orgânica associada aos minerais (MAM) em solo de áreas mineradas para bauxita em reabilitação com café manejado com diferentes adubações (AC = controle sem adubação; CF = cama de frango; AQ = adubação química; e AQ+O = adubação química + orgânica) e plantas de cobertura (SP = sem plantas; L = leguminosas; B = braquiária; e B+L = braquiária + leguminosa). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para adubações e mesma letra minúscula para plantas de cobertura não diferem entre si pelo teste SNK ($p < 0,05$)



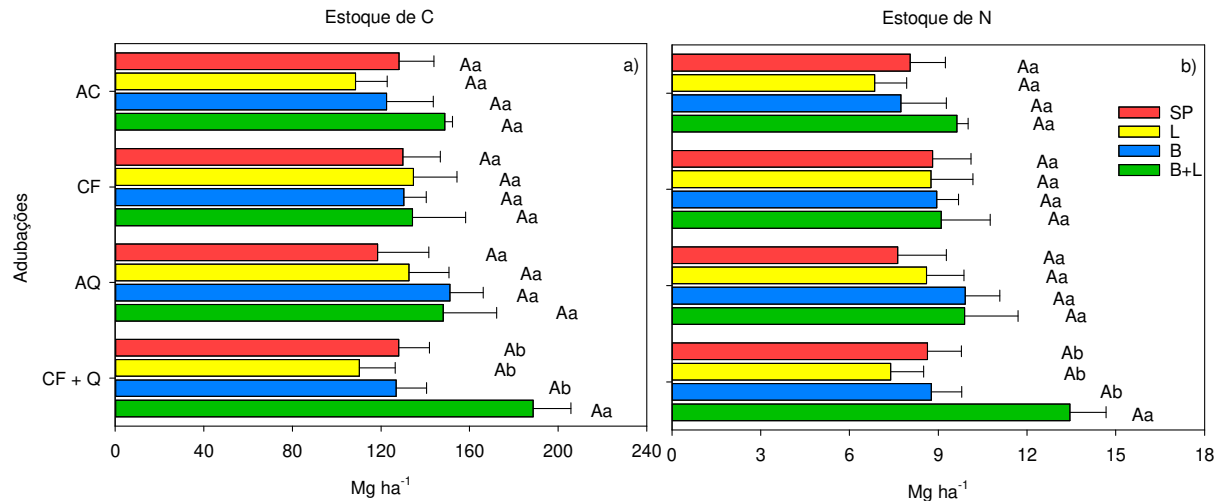
Os teores de C-MOP e N-MOP não apresentaram diferenças entre os tipos de adubação e plantas de cobertura nas três profundidades (Figura 5). O teor de C lábil variou conforme as plantas de cobertura presente, mas apenas na profundidade de 0-20 cm, sendo o tratamento com B + L e B ($2,9 \pm 0,4$ e $2,6 \pm 0,5\ g\ kg^{-1}$, respectivamente) maior que SP ($1,5 \pm 0,3\ g\ kg^{-1}$), mas não diferindo daquele com L quando a adubação foi CF+Q (Figura 5).

Figura 5. Teor de carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) da matéria orgânica particulada (MOP) e C lábil em diferentes profundidades do solo de áreas mineradas para bauxita em reabilitação com café manejado com diferentes adubações (AC = controle; CF = cama de frango; AQ = adubação química; e AQ+O = adubação química + orgânica) e plantas de cobertura (SP = sem plantas; L = leguminosas; B = braquiária; e B+L = braquiária + leguminosa). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para adubações e mesma letra minúscula para plantas de cobertura não diferem entre si pelo teste SNK ($p < 0,05$)



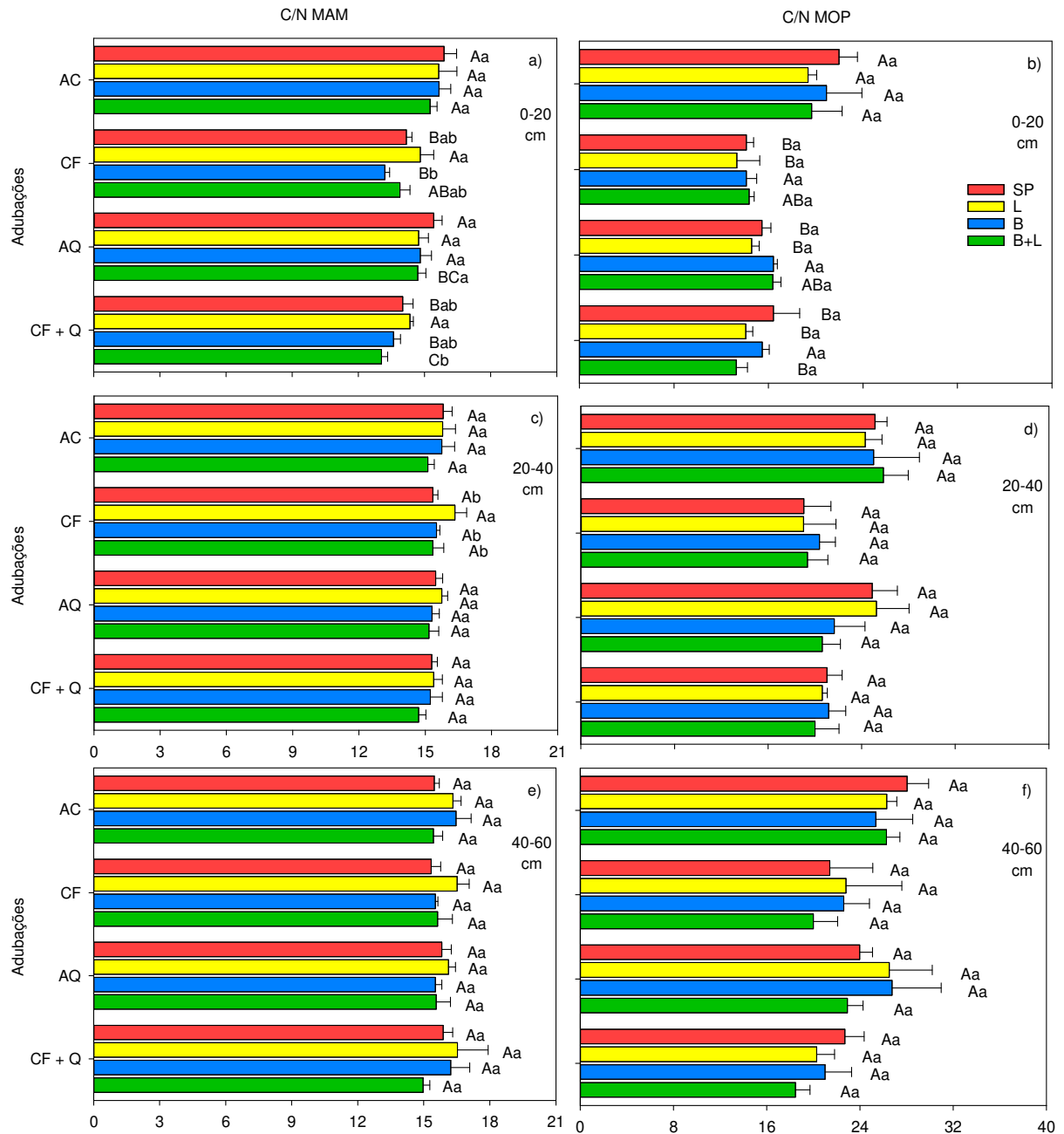
Os maiores estoques de C e N do solo foram no tratamento com B+L (189 ± 17 e 13 ± 1 , respectivamente) em relação às outras plantas de cobertura (144 ± 10 e 17 ± 1 , respectivamente), quando a adubação foi CF+Q (Figura 6).

Figura 6. Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) na camada de 0-60 cm do solo de uma área minerada para bauxita em reabilitação com cafeeiro manejado com diferentes adubações (AC = controle; CF = cama de frango; AQ = adubação química; e AQ+O = adubação química + orgânica) e plantas de cobertura (SP = sem plantas; L = leguminosas; B = braquiária; e B+L = braquiária + leguminosa). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para adubações e mesma letra minúscula para plantas de cobertura não diferem entre si pelo teste SNK ($p < 0,05$)



Constatou-se maior relação C/N MAM na MOS quando aplicados os tratamentos AC e AQ profundidade de 0-20 cm ($>14,7$) em relação àqueles que receberam cama de frango (CF e CF+Q). A relação C/N MOP apresentou maiores valores para AC (>19) na profundidade de 0-20 cm. Os solos com tratamentos braquiária e braquiária + leguminosa quando combinados com adubação orgânica ou orgânica + química, tenderam apresentar menores valores de relação C/N MAM em relação às outras plantas de cobertura (Figura 7).

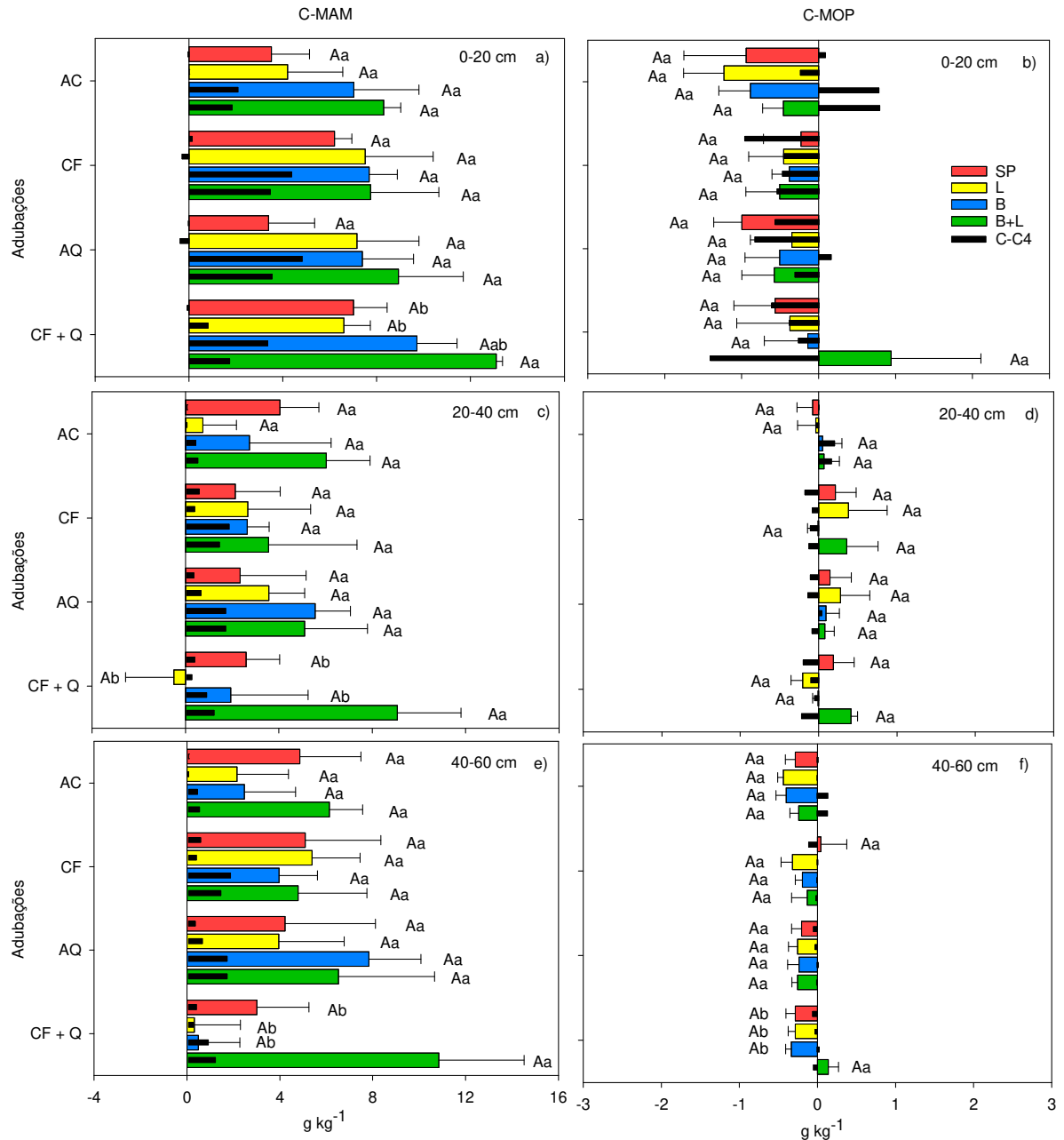
Figura 7. Relação C/N da matéria orgânica associada aos minerais (MAM) e particulada (MOP) em diferentes profundidades do solo de áreas mineradas para bauxita em reabilitação com café manejado com diferentes adubações (AC = controle; CF = cama de frango; L = leguminosas; B = braquiária; e B+L = braquiária + leguminosa). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para adubações e mesma letra minúscula para plantas de cobertura não diferem entre si pelo teste SNK ($p < 0,05$)



3.2. Variação de C e razão isotópica após mineração

A variação do teor de C-MAM em relação ao início do experimento (Apêndice - Tabela S1) indica maior incremento de C-MAM quando se utiliza B+L em todas as profundidades analisadas em comparação com as demais plantas de cobertura, especificamente na adubação CF+Q (Figura 8). Neste tratamento o incremento de C-MAM foi de aproximadamente 91, 135 e 63% nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. Quanto à contribuição de C-C₄, os tratamentos com braquiária (B e B+L) exibiram valores superiores às observadas em L e SP, especificamente na MAM. Nos tratamentos com braquiária (B e B+L), a contribuição média do C-C₄ em relação ao incremento de C-MAM pós-mineração foi de 36,0% ±6,1, 22,1% ±7,7 e 12,1% ±10,3 para a profundidade de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. A variação de C-MOP em relação ao início do experimento retratou perdas de C (inclusive de C-C₄); no entanto, de modo geral, não houve diferença entre os tratamentos.

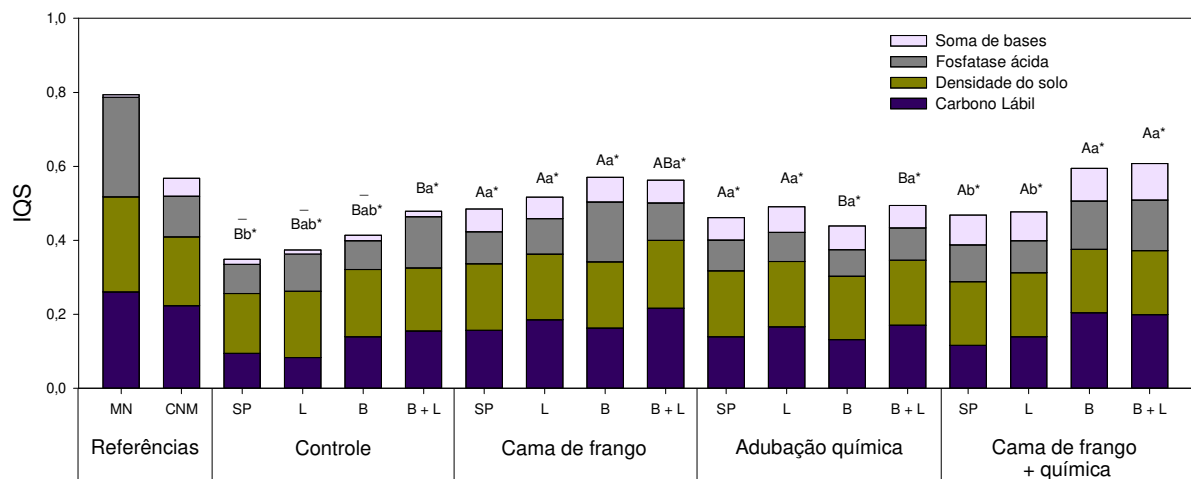
Figura 8. Variação dos teores de carbono orgânico (C) em relação ao solo pós-mineração (início do experimento) da matéria orgânica associadas aos minerais (C-MAM) e particulada (C-MOP) e contribuição do C derivado de C_4 em diferentes profundidades em uma área com cafeeiro manejado com diferentes adubações (AC = controle; CF = cama de frango; AQ = adubação química; e AQ+O = adubação química + orgânica) e plantas de cobertura (SP = sem plantas; L = leguminosas; B = braquiária; e B+L = braquiária + leguminosa). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para adubações e mesma letra minúscula para plantas de cobertura não diferem entre si pelo teste SNK ($p < 0,05$)



3.3. Índice de qualidade do solo e produtividade do feijoeiro

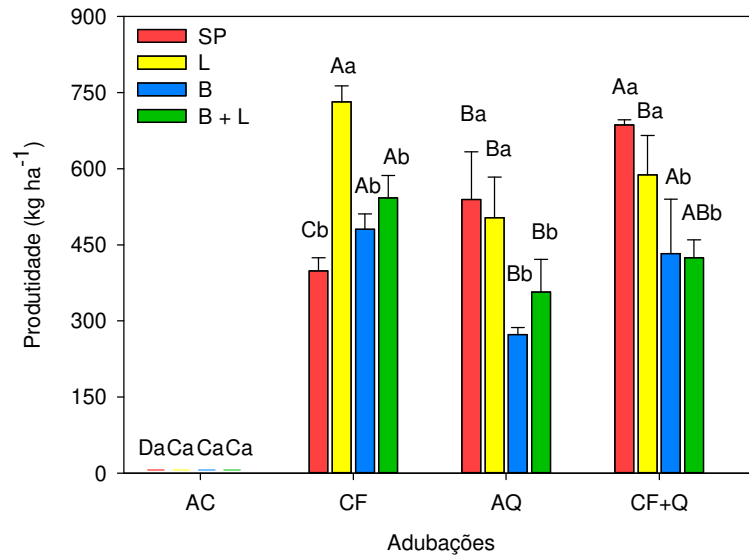
Os tratamentos com adubação CF e CF+Q apresentaram maiores valores de IQS, especialmente quando combinados com B e B+L (IQS >0,55). Em comparação com as áreas de referência, todos os tratamentos apresentaram valores inferiores a MN (IQS = 0,77). No entanto, os tratamentos que foram adubados na implantação (AQ, CF e CF+Q) não diferiram do CNM (IQS = 0,55) (Figura 9).

Figura 9. Índice de qualidade do solo (IQS) em área minerada em processo de reabilitação com café manejado com diferentes adubações e plantas de cobertura (SP = sem plantas; L = leguminosas; B = braquiária; e B+L = braquiária + leguminosa). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para adubações e mesma letra minúscula para plantas de cobertura não diferem entre si pelo teste SNK ($p < 0,05$); “*” difere da mata nativa (MN) e “-” difere do café não minerado (CNM) pelo teste de Dunnett’s ($p < 0,05$)



O feijoeiro cultivado na entrelinha do café recepado teve efeito tanto de adubação quanto de plantas de cobertura. Os tratamentos sem adubação (AC) não apresentaram produtividade de feijão. O tratamento com CF+Q apresentou maiores produtividades de feijão (687 kg ha^{-1}) em relação às outras adubações quando não havia plantas (SP) nas entrelinhas. Da mesma forma, o tratamento apenas com CF foi superior (731 kg ha^{-1}) as demais adubações quando havia L nas entrelinhas. Entretanto, os tratamentos com CF+Q ou apenas com CF não diferiram entre si na presença de braquiária (B ou B+L) na entrelinha, mas ambos foram superiores ao tratamento com AQ. Em relação aos efeitos de planta de cobertura, de modo geral, a produtividade de feijão dos tratamentos que havia L ($541 \pm 44 \text{ kg ha}^{-1}$) e SP ($608 \pm 63 \text{ kg ha}^{-1}$) foram superiores aos tratamentos de B ($396 \pm 50 \text{ kg ha}^{-1}$) e B+L ($441 \pm 48 \text{ kg ha}^{-1}$) quando houve adubação na implantação (AQ, CF e CF+Q).

Figura 9. Produtividade do feijoeiro em área minerada em processo de reabilitação com café manejado com diferentes adubações (AC = controle; CF = cama de frango; AQ = adubação química; e AQ+O = adubação química + orgânica) e plantas de cobertura (SP = sem plantas; L = leguminosas; B = braquiária; e B+L = braquiária + leguminosa). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para adubações e mesma letra minúscula para plantas de cobertura não diferem entre si pelo teste SNK ($p < 0,05$)



4. DISCUSSÃO

4.1. Carbono e nitrogênio do solo

Após 11 anos da implantação de café em área pós-minerada, o manejo de braquiária associada a leguminosa na entrelinha resultou em maiores ganhos de MOS (C-MAM e N-MAM) em todas as profundidades estudadas, especialmente quando se utilizou a adubação CF+Q (Figura 4). A formação de MOS pode ser impulsionada pela contribuição de raízes e a deposição de compostos orgânicos de maior labilidade no solo, condições encontradas na combinação de gramíneas com leguminosas (Cotrufo; Lavallee, 2022). O consórcio dessas plantas pode ter efeito sinérgico na formação de MOS, pois os resíduos ricos em N, a renovação de raízes finas e liberação de exsudatos pelas leguminosas estimulam o crescimento de parte aérea e do seu sistema radicular da braquiária (Pirhofer-Walzl *et al.*, 2012). Além disso, pode haver um sistema de retroalimentação que melhora a ciclagem de N e resulta no aumento de MOS, pois a elevada eficiência de absorção de N pelas gramíneas estimula a maior fixação de N atmosférico pelas leguminosas (RODRÍGUEZ; CANALS; SEBASTIÀ, 2022).

Em relação às adubações, a aplicação de 50 Mg ha⁻¹ ($\approx 17,6$ Mg ha⁻¹ de C) de cama de frango na implantação do experimento (CF e CF+Q) praticamente não resultou em alteração nos teores ou estoques de MOS em relação aos demais tipos de adubação, após 11 anos. No

entanto, inicialmente, após 4,5 anos da implantação da lavoura nesta mesma área experimental, os benéficos do uso da cama de frango no C e N foram evidenciados (Vilas Boas *et al.*, 2018), mas ao longo do tempo esses efeitos se atenuaram, tornando-se pouco perceptíveis nesta última avaliação. Uma única aplicação de compostos orgânicos pode gerar efeitos positivos no solo e na MOS por vários anos depois da mineração. Uma aplicação de 250 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto aumentou os teores de C, N e a produtividade de biomassa de plantas do solo mesmo após 13 anos de aplicação em uma área de rejeito de mina de Cu-Mo (Antonelli *et al.*, 2018). Novas avaliações devem ser realizadas na área experimental para entender a dinâmica da MOS com a reaplicação de cama de frango.

Os teores de C-MOP, N-MOP e de C lábil usualmente são bons indicadores do impacto de mudanças de manejo na MOS e na qualidade do solo (Fohrafellner *et al.*, 2024; Shoumik *et al.*, 2025; Wuaden *et al.*, 2023). Entretanto, no presente estudo, foi observada diferença apenas no C lábil entre os manejos avaliados, com maiores teores superficialmente nas condições em que a planta de cobertura foi a braquiária solteira, ou na combinação braquiária + leguminosa, ambas situações com a cama de frango + adubação química (Figura 5). Esses resultados podem estar relacionados a drástica redução de aporte de resíduos orgânicos no sistema, devido a retirada das plantas de coberturas três anos antes (2019) da coleta de solo, além da recepa do cafeeiro em 2021. Os resíduos orgânicos das plantas são importantes fontes de C-MOP, N-MOP e C lábil, a braquiária junto as leguminosas podem contribuir > 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de resíduos na entrelinha (Vilas Boas *et al.*, 2018). Vale destacar que a braquiária contribui com maior volume de biomassa, mas de maior relação C/N, enquanto as leguminosas fornecem resíduos mais lábeis e ricos em N (Vilas Boas *et al.*, 2018). Logo, com a retirada das plantas de cobertura do sistema, permaneceu apenas os resíduos do cafeeiro, tornando a entrada de C muito similar entre os tratamentos. Além disso, o cultivo de feijão após a recepa do cafeeiro também pode ter contribuído para a oxidação do C-MOP, N-MOP e o C lábil nos diferentes tratamentos.

Apesar das frações de C não apresentarem diferença entre os tipos de adubação, a relação C/N MAM foi sensível a este fator após 11 anos da implantação do experimento (Figura 7). Os tratamentos que receberam cama de frango (CF e CF+Q) apresentaram a menor relação C/N na MAM e MOP, fato que reflete os efeitos da entrada de nutrientes e de uma fonte de C de maior labilidade na implantação do experimento. Além disso, resíduos orgânicos mais lábeis estimulam a atividade microbiana do solo, sendo que a biomassa e as enzimas desses microrganismos, caracterizadas por relação C/N mais baixa, contribui para a formação de MOS com características similares (Teixeira *et al.*, 2019; Villarino *et al.*, 2023). Plantas bem nutridas

e com bom desenvolvimento do sistema radicular também permitem a transferência mais eficiente de N para a MOS, que pode contribuir para o menor valor de relação C/N da MAM e MOP (ROCCI *et al.*, 2022). Em relação as plantas de cobertura, menores valores da relação C/N foram observados nos tratamentos com B e B+L na presença da cama de frango (CF e CF+Q). A combinação de braquiária com fontes lábeis de C, como leguminosas e/ou cama de frango, parece melhorar a eficiência da atividade microbiana, o que pode resultar numa menor relação C/N (Silva *et al.*, 2022).

4.2. Variação de C e razão isotópica após mineração

Ao analisar os incrementos de C em relação ao início do experimento (pós-mineração) até a coleta com 11 anos de reabilitação, houve ganhos consideráveis dos teores de C-MAM, com destaque para o tratamento com B+L em superfície e subsuperfície, quando combinado à adubação de CF+Q (Figura 8). O aumento do teor de C é fundamental em solos pós-mineração, já que o C está intrinsecamente relacionado à qualidade do solo (Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023; Rocci *et al.*, 2024). Maiores teores de C contribuem para o aumento da CTC do solo e disso resulta maior retenção de nutrientes para o desenvolvimento das plantas, além de possibilitar maior atividade microbiana, agregação do solo, acúmulo de água, aumento da fauna do solo (Carvalho *et al.*, 2023; Lavalley; Soong; Cotrufo, 2019). O aumento do teor de C em profundidade favorece maior exploração do perfil pelo sistema radicular, promovendo o desenvolvimento mais eficiente e resiliente das plantas, o que contribui para a recuperação e a sustentabilidade do ecossistema. (Larney; Angers, 2012). Além disso, a adição de C em profundidade está associada à mitigação dos impactos causados pela mineração, pois ocorre a remoção de dióxido de carbono da atmosfera e mitigação dos efeitos do aquecimento global (Carvalho *et al.*, 2023; Sena *et al.*, 2021). A MOS pode representar um importante sumidouro de C, sendo que a taxa de sequestro de C total pós-mineração alcançou $4,25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o tratamento CF+Q combinado a B+L.

O carbono oriundo de plantas C4 nos tratamentos B e B+L compuseram considerável parte do C aportado pós-mineração. Entretanto, essa contribuição foi menos evidente que aquela relatada por Vilas Boas *et al.* (2018) na mesma área de estudo. Esses autores encontraram que, após 4,5 anos de implantação do experimento, o C-C₄ ainda representava mais de 5 g kg^{-1} (>50%) do C aportado nos tratamentos com braquiária (Vilas Boas *et al.*, 2018). Esse resultado indica o aumento da contribuição das plantas de café ao longo do tempo (>10 anos) para a formação da MOS, seja por meio do desenvolvimento do sistema radicular ou da queda de

folhas, galhos e estruturas reprodutivas (Defrenet *et al.*, 2016). O incremento de C-MOP foi similar entre os tratamentos; no entanto, de modo geral, houve perda de C dessa fração em relação ao início do experimento. Esse resultado enfatiza a necessidade da manutenção das plantas de cobertura na entrelinha do cafeeiro em áreas pós-mineradas, uma vez que essa fração desempenha um papel crucial no ciclo de nutrientes e na sustentação da atividade microbiana, aspectos essenciais para a sustentabilidade do sistema (Liao *et al.*, 2023; Rocci *et al.*, 2022; Teixeira *et al.*, 2019).

4.3. Qualidade do solo

A retomada da qualidade do solo é algo desejado no processo de reabilitação de áreas mineradas. O IQS é uma ferramenta que permite melhor entendimento, além do monitoramento da evolução da qualidade ao longo do tempo (Shi *et al.*, 2021). O IQS usado neste estudo foi desenvolvido na mesma área do presente experimento (Borges *et al.*, 2019). Comparando os resultados do presente estudo com os obtidos dez anos atrás por Borges *et al.* (2019), observou-se o aumento no IQS em todos os tratamentos, com ganhos de aproximadamente de 50%. A adoção deste índice permite a realização de análises de indicadores específicos, de modo a propiciar a economia de tempo e recursos, mas ainda sendo eficiente na avaliação do estágio de reabilitação de uma área minerada (Mukhopadhyay; Maiti; Mastro, 2014). No presente estudo, a evolução da reabilitação do solo é tal nível que o IQS dos tratamentos que receberam adubação na implantação não diferiu de CNM. Os tratamentos com cama de frango (CF e CF+Q) se destacaram quando juntos com B ou B+L, o que demonstra a eficiência destes manejos para a reabilitação das áreas degradadas.

Além do IQS, o desenvolvimento de plantas pode ser um indicador eficiente para apontar os manejos mais eficientes na recuperação da qualidade do solo (Ferreira *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2025; Valente *et al.*, 2019). No presente estudo, esperou-se que solos de maior qualidade, também sejam aquelas que permitissem o feijoeiro alcançar maiores produtividades. Logo, o uso de uma dose menor que a recomendada para a adubação de plantio do feijoeiro (100 kg de Superfosfato Simples), foi com a finalidade de tornar mais contrastante aqueles tratamentos com maior qualidade de solo daqueles de menor. Os tratamentos SP ou com L na entrelinha propiciaram maior produtividade do feijoeiro em relação àqueles com B ou B+L. Apesar do uso de B ou B+L estar relacionado ao aumento de MOS e IQS, esses manejos proporcionaram menor produtividade do feijoeiro. A braquiária tem grande capacidade de absorver nutrientes do solo (Vieira; Galvão; Barros, 2019; Vilas Boas *et al.*, 2018), e o corte de

sua parte aérea seguida de sua deposição debaixo das saias do cafeeiro, pode ter causado uma migração de nutrientes da linha para a entrelinhas, resultando em menores produtividades do feijoeiro. Em relação às adubações, àquelas com presença de cama de frango (CF e CF+Q) permitiram maior produtividade do feijoeiro em relação à AQ e AC. Este fato, assim como o IQS, evidencia os benefícios do uso de uma fonte de adubo orgânico na reabilitação de áreas pós-mineradas, sendo seus efeitos observados no desenvolvimento das plantas mesmo após 11 anos de sua aplicação.

5. CONCLUSÃO

O uso de diferentes tipos de adubação e plantas de cobertura promoveu melhorias na qualidade do solo e no teor de MOS em diferentes profundidades em solo pós-mineração para bauxita após 11 anos de manejo com cafeeiro.

A combinação de braquiária e leguminosas na entrelinha do cafeeiro é um manejo eficiente para a reabilitação de áreas mineradas, apresentando resultados positivos ao longo do tempo.

A manutenção de plantas de cobertura é fundamental para a reabilitação de áreas mineradas para bauxita, sendo importante para a manutenção de formas mais lábeis da MOS (C-MOP, N-MOP e C lábil).

A adição de uma fonte de adubação orgânica, como a cama de frango, é essencial para reabilitação de áreas mineradas, sendo seus efeitos na qualidade do solo observados após 11 anos de sua aplicação.

REFERÊNCIAS

- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. 2017. Disponível em: <http://abal.org.br/>. Acesso em: 2 maio 2022.
- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. 2024. Disponível em: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/bauxita/>. Acesso em: 19 fev. 2025.
- ANTONELLI, Paul M. *et al.* Long term carbon sequestration potential of biosolids-amended copper and molybdenum mine tailings following mine site reclamation. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 117, p. 38–49, 2018.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Clayton South, v. 46, n. 7, p. 1459–1466, 1995.
- BORGES, Silvano R. *et al.* Practices for rehabilitating bauxite-mined areas and an integrative approach to monitor soil quality. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 30, n. 7, p. 866–877, 2019.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Hoboken, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.
- CARVALHO, Martha Lustosa *et al.* Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools – a literature review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 47, n. e0220130, 2023.
- CAVALCANTE, Douglas Monteiro *et al.* Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 107, n. March, p. 105668, 2019.
- CAVALCANTE, Douglas Monteiro; SILVA, Ivo Ribeiro; OLIVEIRA, Teógenes Senna. Soil quality indicators for monitoring the short-term effects of mined soil rehabilitation strategies for bauxite. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 47, p. e0220126, 2023.
- COTRUFO, M. Francesca; LAVALLEE, Jocelyn M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 172, n. May, p. 1–66, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>.
- DE DEYN, Gerlinde B. *et al.* Additional carbon sequestration benefits of grassland diversity restoration. **Journal of Applied Ecology**, Hoboken, v. 48, n. 3, p. 600–608, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2664.2010.01925.x>. Acesso em: 1 nov. 2024.
- DEFRENET, Elsa *et al.* Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. **Annals of botany**, Oxford, v. 118, n. 4, p. 833–851, 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27551026/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

FERREIRA, Paulo Ademar Avelar *et al.* Long-Term Effects of Animal Manures on Nutrient Recovery and Soil Quality in Acid Typic Hapludalf under No-Till Conditions. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 2, 2022.

FOHRAFELLNER, Julia *et al.* Cover crops affect pool specific soil organic carbon in cropland – A meta-analysis. **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 75, n. 2, 2024.

IUSS Working Group WRB. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES**. 4. ed. Vienna, 2022.

LARNEY, Francis J.; ANGERS, Denis A. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 92, n. 1, p. 19–38, 2012. Disponível em: <https://cdnscepub.com/doi/10.4141/cjss2010-064>. Acesso em: 23 nov. 2024.

LAVALLEE, Jocelyn M.; SOONG, Jennifer L.; COTRUFO, M. Francesca. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, Hoboken, n. July 2019, p. 261–273, 2019.

LIAO, Jiaojiao *et al.* Divergent contribution of particulate and mineral-associated organic matter to soil carbon in grassland. **Journal of Environmental Management**, London, v. 344, p. 118536, 2023.

MELO, Vander Freitas *et al.* Soil quality and reforestation of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) after laterite-type bauxite mining in the Brazilian Amazon forest. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 125, p. 111–118, 2018.

MUKHOPADHYAY, Sangeeta; MAITI, S. K.; MASTO, R. E. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 71, p. 10–20, 2014.

NOTARO, Krystal de Alcantara *et al.* Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with coffee at high altitude. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, n. 2, p. 87–95, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/sa/article/view/80611>. Acesso em: 8 nov. 2024.

OLIVEIRA, Dener Márcio da Silva *et al.* Carbon Fluxes from Different Pools in a Mined Area under Reclamation in Minas Gerais State, Brazil. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 28, n. 2, p. 507–514, 2017.

OLIVEIRA, Victor Pereira *et al.* Survival and growth of tree species after kaolin mining in eastern Amazonia, Brazil: accelerating restoration through physical alteration of Technosol. **Plant and Soil**, Dordrecht, 2025.

PIRHOFER-WALZL, Karin *et al.* Nitrogen transfer from forage legumes to nine neighbouring plants in a multi-species grassland. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 350, n. 1–2, p. 71–84, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-011-0882-z>. Acesso em: 4 nov. 2024.

R, R Development Core Team. **Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2024.

ROCCI, Katherine S. *et al.* Bridging 20 Years of Soil Organic Matter Frameworks: Empirical Support, Model Representation, and Next Steps. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, Washington, v. 129, n. 6, p. e2023JG007964, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2023JG007964>. Acesso em: 23 nov. 2024.

ROCCI, Katherine S. *et al.* Impacts of nutrient addition on soil carbon and nitrogen stoichiometry and stability in globally-distributed grasslands. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 159, n. 3, p. 353–370, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-022-00932-w>. Acesso em: 12 nov. 2024.

RODRÍGUEZ, Antonio; CANALS, Rosa Maria; SEBASTIÀ, M. Teresa. Positive Effects of Legumes on Soil Organic Carbon Stocks Disappear at High Legume Proportions Across Natural Grasslands in the Pyrenees. **Ecosystems**, New York, v. 25, n. 4, p. 960–975, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-021-00695-9>. Acesso em: 1 nov. 2024.

SANTOS, Humberto Gonçalves *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5^aed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2018.

SENA, Kenton L. *et al.* Development of mine soils in a chronosequence of forestry-reclaimed sites in eastern kentucky. **Minerals**, Basel, ano 11, n. 4, 1 abr. 2021. p. 422. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/4/422/htm>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SHI, Zeyu *et al.* Develop a Soil Quality Index to Study the Results of Black Locust on Soil Quality below Different Allocation Patterns. **Land**, Basel, v. 10, n. 8, p. 785, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/10/8/785/htm>. Acesso em: 27 nov. 2024.

SHOUMIK, Baig Abdullah Al *et al.* Dynamics of soil organic carbon and total nitrogen in particulate and mineral-associated organic matter fractions under different continuous land use patterns across Europe. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 381, n. 109411, 2025.

SILVA, Jônatas Pedro *et al.* Combined legume and non-legume residues management improve soil organic matter on an Oxisol in Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 46, p. 1–22, 2022.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 13. ed. EUA:USDA Natural Resources Conservation Service, 2022.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W. *et al.* (org.). **Methods of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775–833. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssabookser5.2.c37>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TEIXEIRA, Rafael S. *et al.* Impact of fertilization on cover crops and microbial community on a bauxite-mined soil undergoing reclamation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 182, n. 4, p. 515–523, 2019.

TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3^a edição. Distrito Federal: EMBRAPA, 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>.

VALENTE, Fernanda Daniele de Almeida *et al.* Growth, biomass and carbon stocks in forest cover planted in an area of bauxite mining in rehabilitation. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 43, p. 1–15, 2019.

VALENTE, Fernanda D.A. *et al.* Influence of different tree species on autotrophic and heterotrophic soil respiration in a mined area under reclamation. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 32, n. 15, p. 4288–4299, 2021.

VALENTE, Fernanda D. Almeida *et al.* Native multispecies and fast-growing forest root biomass increase C and N stocks in a reclaimed bauxite mining area. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 195, n. 1, p. 1–19, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-022-10720-6>. Acesso em: 30 nov. 2024.

VIEIRA, Evandro Alves; GALVÃO, Fernanda Cristina Andrade; BARROS, Ana Lúcia. Influence of water limitation on the competitive interaction between two Cerrado species and the invasive grass *Brachiaria brizantha* cv. Piatã. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 135, p. 206–214, 2019.

VILAS BOAS, Hiran F. *et al.* Soil organic carbon recovery and coffee bean yield following bauxite mining. **Land Degradation & Development**, Hoboken, v. 29, n. 6, p. 1565–1573, 2018.

VILLARINO, Sebastián H. *et al.* A large nitrogen supply from the stable mineral-associated soil organic matter fraction. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 59, n. 7, p. 833–841, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-023-01755-z>. Acesso em: 12 nov. 2024.

WEIL, Ray R. *et al.* Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, Oxon, v. 18, n. 1, p. 3–17, 2003.

WU, Gao Lin *et al.* Legumes Functional Group Promotes Soil Organic Carbon and Nitrogen Storage by Increasing Plant Diversity. **Land Degradation & Development**, Ho, v. 28, n. 4, p. 1336–1344, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ldr.2570>. Acesso em: 1 nov. 2024.

WUADEN, Camila Rosana *et al.* Carbon and nitrogen stocks in a Rhodic Nitisol under different tillage methods and mineral and organic fertilizers. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 47, 2023.

CAPÍTULO 2 - MATÉRIA ORGÂNICA E QUALIDADE DO SOLO EM ÁREA SOB REABILITAÇÃO CULTIVADA COM GRAMÍNEA FORRAGEIRA PÓS-MINERAÇÃO PARA BAUXITA

RESUMO

A recuperação da matéria orgânica do solo (MOS) e da qualidade do solo em áreas pós-mineradas para bauxita é um processo que demanda tempo e manejo apropriado. A implantação de plantas com elevada contribuição de biomassa e adubação eficiente são opções para alcançar essa recuperação. Logo, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a MOS e a qualidade do solo de uma área pós-minerada para bauxita manejada com gramínea forrageira e adubação química e orgânica. O estudo foi conduzido em São Sebastião da Vargem Alegre, MG, Brasil. Após a mineração para bauxita e reconfiguração topográfica, foi feito o plantio de gramínea forrageira com diferentes adubações. As parcelas experimentais foram compostas por: adubação química no plantio (AQ); e adubação química + orgânica no plantio (AQO), que foi a adubação AQ + 30 t ha⁻¹ de cama de frango. Duas áreas próximas também foram avaliadas: área de gramínea forrageira minerada, em que houve a entrada de animais durante o processo de reabilitação (PA); e mata nativa (MN). Oito meses após a implantação do experimento, os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) da matéria orgânica particulada (MOP) retrataram quedas em >50% nas profundidades de 0-10 para o tratamento com AQ. No tratamento AQO, houve aumento nos teores de C-MOP e N-MOP em todas as profundidades, sendo superiores a 100% para N-MOP. Entretanto, no período pós-mineração de 2019 a 2022, o C-MOP e o N-MOP do tratamento com AQ compensou as perdas sofridas, havendo incrementos de 155 e 136%, respectivamente, na profundidade de 0-10 cm. Conseqüentemente a esses fatos, após 43 meses de reabilitação, os teores de MOS em diferentes frações não variou entre os tratamentos com AQ e AQO. Em relação ao desenvolvimento de plantas após 43 meses de reabilitação, a biomassa de parte aérea em AQO foi 56,6 % superior a AQ, entretanto a biomassa total de raiz de AQ foi 28% superior à AQO. Considerando os dados de raízes por profundidade, AQ foi superior a AQO apenas na profundidade de 0-10 cm, não havendo diferença nas demais profundidades. O IQS não apontou diferença entre AQ, AQO e PA (0,6 ±0,02), entretanto a MN demonstrou os maiores valores (0,81 ±0,04). Conclui-se que a aplicação de cama de frango promoveu efeitos nas frações da MOS apenas nos primeiros meses após a mineração, mas esses efeitos não foram observados em nenhuma profundidade (até 60 cm) do solo após 43 meses. Da mesma forma, o índice de qualidade do solo (IQS) não diferiu entre AQ e AQO.

Palavras-chave: Carbono; Nitrogênio; Raiz; Fracionamento; Braquiária.

CHAPTER 2 - SOIL ORGANIC MATTER AND QUALITY IN A POST-MINING BAUXITE AREA UNDER RECOVERY WITH PASTURE

ABSTRACT

The recovery of soil organic matter (MOS) and soil quality in post-bauxite-mined areas is a process that requires time and appropriate management. The establishment of plants with high biomass contribution and efficient fertilization are strategies to achieve this recovery. Therefore, the objective of this study was to evaluate MOS and soil quality in a post-bauxite-mined area managed with forage grass and chemical and organic fertilization. The study was conducted in São Sebastião da Vargem Alegre, MG, Brazil. After bauxite mining and topographic reconfiguration, forage grass was planted under different fertilization regimes. The experimental plots consisted of: chemical fertilization at planting (AQ); and chemical + organic fertilization at planting (AQO), where AQO included AQ plus 30 t ha⁻¹ of poultry litter. Two nearby areas were also evaluated: a post-mined forage grass area where grazing occurred during rehabilitation (PA); and a native forest area (MN). Eight months after the experiment was established, the carbon (C) and nitrogen (N) contents of particulate organic matter (MOP) showed declines >50% from 0–10 cm depth in AQ. In AQO, there was an increase in C-MOP and N-MOP at all depths, exceeding 100% for N-MOP. However, in the post-mining period from 2019 to 2022, C-MOP and N-MOP in AQ recovered, with increases of 155% and 136%, respectively, at 0–10 cm depth. Despite these trends, after 43 months of rehabilitation, MOS contents in different fractions did not differ between AQ and AQO. Regarding plant development, shoot biomass in AQO was 56.6% higher than in AQ, whereas total root biomass was 28% higher in AQ than in AQO. Root data by depth indicated that AQ outperformed AQO only at 0–10 cm, with no differences observed at deeper layers. The soil quality index (IQS) showed no difference among AQ, AQO, and PA ($\approx 0.6 \pm 0.02$), although MN exhibited the highest values (0.81 ± 0.04). It is concluded that poultry litter application had an effect on MOS fractions only during the early months following mining, but these effects were not observed at any soil depth (up to 60 cm) after 43 months. Similarly, IQS did not differ between AQ and AQO.

Keywords: Carbon; Nitrogen; Root; Fractionation; *Brachiaria*.

1. INTRODUÇÃO

A bauxita é a matéria prima para a produção do alumínio, o que torna a extração dessa rocha essencial para a sociedade. Entretanto, o processo de mineração para bauxita envolve a remoção da vegetação e grande movimentação do solo, visto que o *topsoil* é retirado da área, depositado em leiras e, somente após a mineração, retornado para área original (Cavalcante *et al.*, 2019; Gardioli *et al.*, 2023). Todas essas etapas da mineração para bauxita causam grandes perdas na qualidade química, física e biológica do solo e tornam a reabilitação dessas áreas um desafio (Borges *et al.*, 2019; Valente, *et al.*, 2023).

A reabilitação de áreas pós-mineradas para bauxita é necessária para que o solo volte a desempenhar suas funções ecossistêmicas, seja para o desenvolvimento da vegetação nativa ou culturas agrícolas. As empresas mineradoras de bauxita no Brasil devem, por lei, recuperar a área minerada e devolvê-las ao produtor com as culturas manejadas antes do processo de mineração. O processo de reabilitação em áreas mineradas na Zona da Mata Mineira, por exemplo, tem duração de três a quatro anos, que vai depender das condições da área minerada e o tipo de cultura a ser implantada (Cavalcante *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2017; Valente *et al.*, 2021). Após o processo de reabilitação, a área minerada deve possuir condições que permita ao produtor a retomada de suas atividades agrícolas, assim como eram realizadas antes da mineração (INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 14, DE 1º DE JULHO DE 2024).

A adoção de técnicas e manejos conservacionistas, como a manutenção do solo coberto e o uso de plantas com sistema radicular robustos são práticas fundamentais na recuperação da qualidade do solo (Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023; Valente *et al.*, 2023). As gramíneas forrageiras, como as braquiárias, são plantas rústicas, de rápido crescimento e adaptadas às condições tropicais, o que as tornam uma boa alternativa para a reabilitação de áreas degradadas (Bicharanloo *et al.*, 2024; Conceição *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2017). O sistema radicular das gramíneas forrageiras possui a capacidade de melhorar a estruturação do solo e aportar considerável quantidade de C em profundidade (Cavalcante *et al.*, 2019; Valani *et al.*, 2022). Junto à escolha correta de plantas nas áreas pós-mineradas, a adubação adequada é primordial para a recuperação do solo, visto que, a bauxita normalmente é oriunda de áreas de solos de baixa fertilidade (Melo *et al.*, 2018; Vilas Boas *et al.*, 2018). Além da adubação química, a adubação orgânica é uma prática recomendada para essas áreas, pelo potencial em propiciar maiores aportes de C ao solo (Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023).

A MOS é considerada um dos melhores indicadores de qualidade do solo, visto que está relacionada a CTC do solo, agregação, retenção de umidade, atividade biológica, entre outros

(Cavalcante *et al.*, 2019; Teixeira *et al.*, 2019; Vilas Boas *et al.*, 2018). Além de influenciar todos esses atributos atrelados a manutenção da capacidade produtiva dos solos, e da manutenção do provimento de serviços ecossistêmicos, em âmbito global, é um importante sumidouro de CO₂ atmosférico.

A perda de MOS pós-mineração é um dos grandes problemas para a qualidade do solo, visto que sua recuperação no solo pode demorar décadas (Antonelli *et al.*, 2018; Carneiro *et al.*, 2008). Logo, o uso de indicadores que apontem manejos mais eficientes em curto intervalo de tempo é necessário, como, por exemplo, a determinação de frações mais lábeis da MOS e a atividade de enzimas. (Cá *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2025). A sistematização de indicadores pode ser usada para composição de um índice de qualidade do solo (IQS), o que permite uma avaliação mais detalhada e assertiva para uma condição específica de determinado ambiente (Borges *et al.*, 2019; Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023). O IQS possui a vantagem de analisar apenas aqueles indicadores mais importantes para uma condição específica, de modo a economizar recursos e tempo (Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023; Celis *et al.*, 2024). Borges *et al.* (2019) desenvolveram um IQS para solos pós-mineração para bauxita da região da Zona da Mata Mineira, sendo selecionado indicadores representantes da qualidade química (soma de bases), física (densidade do solo), orgânica (carbono lábil) e biológica (atividade da fosfatase ácida). O uso desse índice permite o acompanhamento dos níveis de qualidade do solo ao longo do tempo, além de poder compará-lo às áreas de referência, como a remanescentes de vegetação nativa da região.

Manejos que melhorem a qualidade do solo devem ser estudados e aprimorados para uma reabilitação mais eficiente de áreas pós-mineradas, dado os impactos profundos dessa atividade no solo. Logo, objetivou-se avaliar os teores de MOS e a qualidade do solo de uma área pós-minerada para bauxita manejada com gramínea forrageira e adubação química e orgânica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

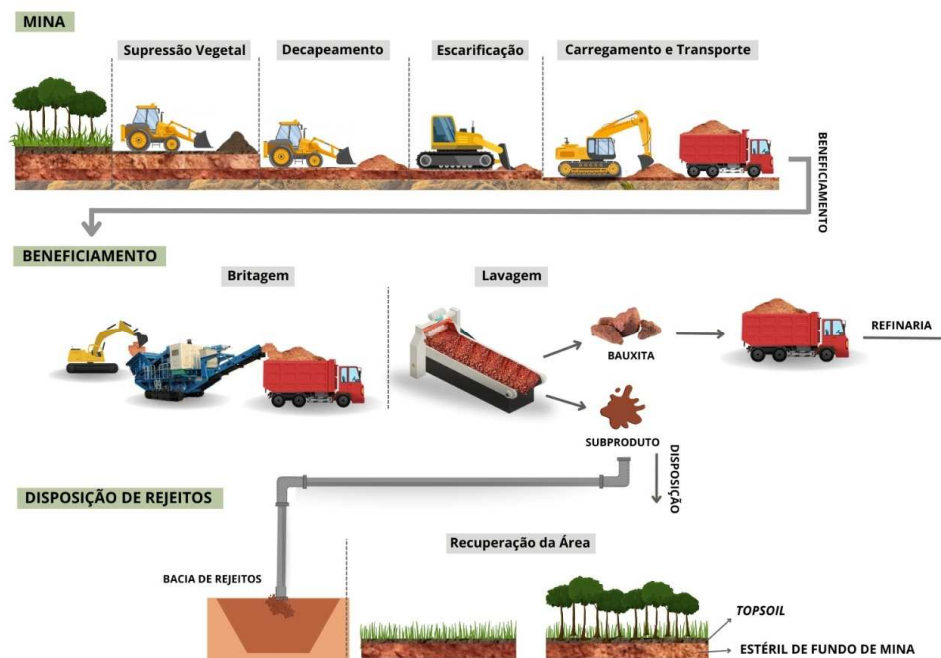
2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em São Sebastião da Vargem Alegre, Zona da Mata de Minas Gerais (21° 1' 45" S, 42° 34' 12" O). O relevo da região é forte ondulado e o clima predominante é do tipo Cwa (Köppen), com verões quentes e chuvosos e invernos secos, sendo a precipitação

e temperatura média anual de 1287 mm e 20,3 °C, respectivamente (Valente *et al.*, 2021). O solo predominante da região é do tipo Latossolo Vermelho Amarelo, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018), que corresponde a um Oxisoil (Soil Survey Staff, 2022) e a um Orthodystric Ferralsol, in the World Reference Base for Soil Resources (IUSS World Group WRB, 2022).

A área experimental esteve ocupada por gramínea forrageira por cerca de 30 anos antes do início da mineração para bauxita, realizada em 2018 pela Companhia Brasileira de Alumínio - Votorantim Metais. No processo de extração de bauxita, o *topsoil* (camada superficial do solo de aproximadamente 0,60 m de espessura) foi retirado da área e armazenado em leiras para o processo de lavra de bauxita. Após a lavra, descompactou-se o subsolo (estéril de fundo da mina) com subsolador de haste longa (1 m de profundidade) a cada 1 m de distância e o *topsoil* foi retornado para a área minerada para o processo de reconfiguração topográfica. Após retorno do *topsoil*, 6,0 t ha⁻¹ de calcário e 2 t ha⁻¹ de fosfato natural reativo (Bayóvar) foram aplicados em toda área experimental e, em seguida, realizado uma subsolagem intermediária (0,50 m de profundidade) (Figura 1).

Figura 1. Esquema do processo de mineração para bauxita e reabilitação das áreas mineradas

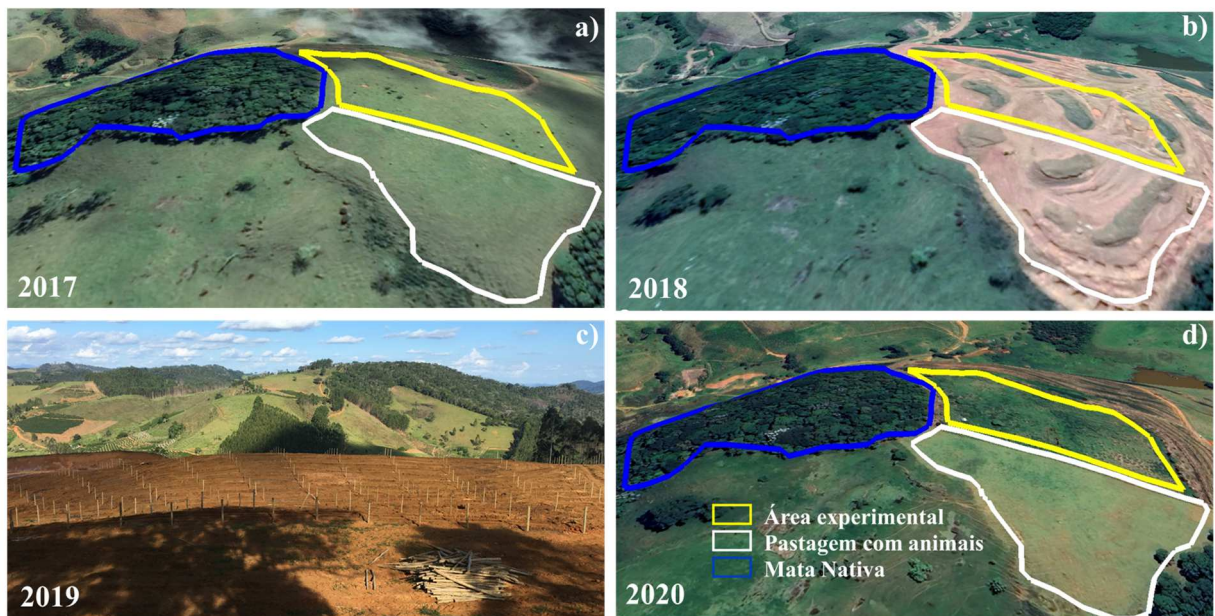


Fonte: Vieira (2025)

O experimento com gramínea forrageira foi implantado em novembro de 2018, em uma área de aproximadamente 1,0 ha. O experimento foi disposto em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com seis repetições. As unidades experimentais ($\approx 720 \text{ m}^2$) foram compostas

por dois tratamentos: adubação química no plantio (AQ), com aplicação de 500 kg ha⁻¹ de fertilizante NPK 10-30-10 no plantio (adubação padrão da empresa); e adubação química + orgânica no plantio (AQO), que foi a adubação AQ + 30 t ha⁻¹ de cama de frango (base seca). Duas áreas de referência próximas ao local do experimento também foram analisadas: uma área de remanescente de mata nativa (MN); e uma área de gramínea forrageira minerada junto a área experimental e que recebeu a mesma adubação de AQ, mas que houve a entrada de animais durante o processo de reabilitação (PA) (Figura 2). A área PA possui histórico de uso semelhante a área experimental, sendo que passou pelas mesmas práticas de reabilitação.

Figura 2. Representação da cobertura ou uso do solo na área experimental e de áreas de referência em a) pré mineração, b) em processo de mineração para bauxita; c) implantação do experimento e d) pós-mineração com manejo de gramínea forrageira



O plantio das sementes de Braquiária marandu e capim Myiagui (*Urochloa brizantha* cv Marandu e *Panicum Maximum* cv Miyagui, respectivamente) foi realizado de forma mecanizada em área total, utilizando 80 kg ha⁻¹ de sementes viáveis juntamente com o fertilizante. As sementes e o fertilizante foram misturados manualmente e então aplicados a lanço na superfície do solo, deslocando o trator com o distribuidor por cada tratamento.

2.2. Coleta e análise de solo e material vegetal

As coletas de solo foram realizadas em pré (agosto de 2017) e pós-mineração (julho 2019 e julho de 2022) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade. As amostras deformadas foram coletadas com trado (seis repetições por unidade experimental), levadas para laboratório, secas a sombra e peneiradas (2 mm) para a obtenção da terra fina seca

ao ar (TFSA). A caracterização química e física do solo (Tabela 1) foi feita conforme Teixeira *et al.* (2017), sendo o pH em água (1:2,5) determinado por potenciometria; o K e o P disponível foram extraídos em Mehlich-1 e determinado por colorimetria e espectrofotometria de chama, respectivamente; o Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos por KCl 1 mol L^{-1} , sendo o Ca^{2+} e Mg^{2+} determinados por espectrometria de absorção atômica e o Al^{3+} por titulometria com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$; o H+Al foi extraído por acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em pH 7,0 e determinado por titulometria. A argila, silte e areia foram obtidos por dispersão física (50 rpm por 16h) e química (NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$) com determinação da areia por tamisamento e argila e silte pelo método da pipeta. A determinação da Ds foi pelo método do anel volumétrico.

A quantificação de biomassa de parte aérea e raízes foi realizada em junho de 2022 (43 meses após a implantação do experimento). A parte aérea da gramínea forrageira foi cortada e pesada em três pontos ($\approx 30 \text{ m}^2$) de cada unidade experimental. Subamostras foram coletadas para a determinação da massa seca. A coleta de raízes foi feita junto a coleta de solo, com sonda de oito cm de diâmetro nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, totalizando seis subamostras em cada unidade experimental. As raízes coletadas foram separadas por catação manual com pinças, em seguida, foram lavadas com água corrente e secas em estufa a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingirem peso constante.

Tabela 1. Caracterização química e física de áreas pós-mineradas para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira e diferentes adubações e caracterização de áreas de referência em São Sebastião da Vargem Alegre, MG

ID	pH H ₂ O	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	T	P-rem	Cascalho	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
		mg dm ⁻³		----- cmolc dm ⁻³ -----					mg L ⁻¹		----- % -----			
Profundidade de 0-10 cm														
AQ	5,8 ±0,0	117,6 ±19	119 ±13	3,3 ±0,2	1,7 ±0,2	0,0 ±0	6,2 ±0,2	11,6 ±0,1	13,0 ±0,4	16,9 ±0,7	13,2 ±0,5	7,55 ±0,4	14,7 ±0,9	64,5 ±1,3
AQO	5,7 ±0,1	128,0 ±37	104,7 ±8	2,8 ±0,4	2,6 ±1,0	0,0 ±0	6,3 ±0,5	12,0 ±1,3	14,0 ±1,0	17,2 ±1,5	14,3 ±1,0	7,60 ±0,4	15,0 ±1,5	63,1 ±1,6
PA	5,7 ±0,0	62,1 ±20	77 ±17	2,7 ±0,1	1,4 ±0,3	0,0 ±0	5,4 ±0,2	9,7 ±0,2	13,2 ±0,6	12,4 ±2,1	12,8 ±2,1	10,7 ±0,5	17,7 ±1,5	58,8 ±2,7
MN	4,4 ±0,0	3,3 ±1	67 ±5	0,3 ±0,1	0,3 ±0,1	1,8 ±0	15,6 ±1,3	16,3 ±1,2	10,7 ±1,6	3,7 ±1,0	13,9 ±3,2	11 ±0,2	17,1 ±1,6	58 ±3,3
Profundidade de 10-20 cm														
AQ	5,3 ±0,0	18,2 ±2	65 ±4	1,5 ±0,1	0,7 ±0,2	0,1 ±0	7,9 ±0,1	10,3 ±0,2	9,3 ±0,4	18,1 ±0,7	13,4 ±0,4	7,33 ±0,3	14,0 ±0,7	65,3 ±0,9
AQO	5,4 ±0,1	30,2 ±8	61 ±3	1,6 ±0,3	0,9 ±0,3	0,1 ±0	7,6 ±0,5	10,4 ±0,4	9,4 ±1,0	17,2 ±1,5	14,6 ±0,8	7,42 ±0,3	13,1 ±1,3	64,9 ±1,6
PA	5,3 ±0,0	7,2 ±2	56 ±8	1,1 ±0,1	0,5 ±0,0	0,1 ±0	6,9 ±0,2	8,6 ±0,3	8,7 ±0,5	9,8 ±1,4	11,3 ±0,3	10,9 ±0,4	16,6 ±0,9	61,2 ±1,5
MN	4,4 ±0,1	2,2 ±1	57 ±4	0,2 ±0,0	0,2 ±0,0	1,5 ±0	13,4 ±1,2	13,8 ±1,2	7,6 ±1,3	4,1 ±1,4	12,5 ±1,4	11,3 ±0,6	16,3 ±0,8	59,9 ±2,3
Profundidade de 20-40 cm														
AQ	5,2 ±0,0	9,3 ±1	51 ±3	0,8 ±0,1	0,4 ±0,1	0,2 ±0	7,8 ±0,2	9,1 ±0,3	7,9 ±0,5	20,6 ±1,3	13,9 ±0,5	7,52 ±0,3	15,3 ±1,1	63,2 ±1,0
AQO	5,2 ±0,1	11,2 ±3	46 ±4	0,8 ±0,1	0,4 ±0,2	0,2 ±0	7,7 ±0,4	9,0 ±0,3	8,1 ±0,8	17,9 ±0,8	15,7 ±1,1	7,28 ±0,5	16,3 ±1,0	60,7 ±1,8
PA	5,2 ±0,1	2,9 ±1	38 ±6	0,4 ±0,0	0,2 ±0,0	0,1 ±0	5,3 ±0,7	6,0 ±0,8	5,2 ±1,2	11,3 ±1,7	13,3 ±1,8	10,5 ±0,3	22,5 ±6,3	53,8 ±7,9
MN	4,5 ±0,1	1,4 ±0	36 ±4	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	1,1 ±0	11,7 ±1,7	12,0 ±1,7	5,8 ±1,6	4,0 ±1,95	12 ±0,5	10,7 ±0,2	15,8 ±1,5	61,5 ±1,8
Profundidade de 40-60 cm														
AQ	5,2 ±0,0	12,4 ±2	46 ±3	0,7 ±0,1	0,4 ±0,1	0,1 ±0	6,0 ±0,5	7,2 ±0,5	4,8 ±0,7	21,1 ±1,2	15,2 ±0,6	7,65 ±0,3	21,2 ±1,7	55,9 ±2,0
AQO	5,2 ±0,0	14,8 ±4	44 ±7	0,7 ±0,1	0,4 ±0,2	0,0 ±0	5,3 ±0,2	6,5 ±0,3	4,5 ±0,6	19,7 ±1,1	17,3 ±2,0	7,63 ±0,6	23,2 ±1,5	51,8 ±2,7
PA	5,1 ±0,0	2,7 ±1	30 ±9	0,3 ±0,1	0,2 ±0,1	0,0 ±0	3,5 ±0,9	4,1 ±1,0	3,3 ±1,4	12,7 ±3,2	15,6 ±3	8,5 ±1,2	26,1 ±6,4	49,7 ±4,4
MN	4,7 ±0,1	1,3 ±0	24 ±5	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,8 ±0	11,0 ±1,5	11,1 ±1,5	4,9 ±1,1	7,2 ±3,9	13,4 ±2,3	9,3 ±1,3	22 ±6,7	55,3 ±3,5

ID: identificação; AQ: Adubação química; AQO: Adubação química + orgânica; PA: gramínea forrageira com entrada de animais; MN: Remanescente de mata nativa; P-rem: Fósforo remanescente. Medida de dispersão: erro padrão.

2.3. Determinação de carbono, nitrogênio e atividade de enzimática

A matéria orgânica do solo foi fracionada em associada aos minerais (MAM) e particulada (MOP) (Cambardella; Elliot, 1992). Dez gramas de TFSA e 30 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio (5 mol L^{-1}) foram adicionados em tubos falcon e agitadas por 15 h em um agitador horizontal (120 rpm e a 20°C). Após a agitação, as amostras foram peneiradas ($53 \mu\text{m}$, 170 mesh), sendo a fração remanescente na peneira a MOP e a fração tamisada a MAM. Em seguida, ambas frações foram secas em estufa a 60°C até peso constante. As amostras de MOP e MAM foram maceradas e passadas em peneiras de $0,149 \text{ mm}$ (100 mesh). O teor de carbono (C) e nitrogênio (N) da MOP e da MAM nos diferentes tempos de amostragens foram quantificados com o espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS) de fluxo contínuo (ANCA-GSL, 20-20, Sercon, Crewe-UK). O estoque total de C e N foi calculado multiplicando o teor destas variáveis pelo volume e a densidade do solo de cada uma das camadas analisada.

Para a determinação do C lábil, amostras de TFSA foram tamisadas em peneira de $0,5 \text{ mm}$ e submetidas a extração em KMnO_4 $0,33 \text{ mol L}^{-1}$. A estimativa do C lábil foi por meio de espectroscopia de absorção molecular com leitura da absorbância a 565 nm (Blair; Lefroy; Lisle, 1995 modificado por Weil *et al.*, 2003).

A atividade enzimática da fosfatase ácida (AcP) foi determinada conforme Tabatabai (1994). Amostras de solo foram coletadas na camada de $0\text{-}5 \text{ cm}$, imediatamente colocadas em caixa de isopor com gelo, e armazenadas a 4°C . A AcP foi obtida por meio de extração e determinação colorimétrica (EAM com leitura a 410 nm) do p -nitrofenil liberado quando a amostra de solo passa por incubação com solução tamponada contendo p -nitrofenol-fosfato (PNP).

2.4. Índice de qualidade do solo

O índice de qualidade do solo (IQS) foi composto por variáveis representantes da qualidade orgânica (C lábil), microbiológica (AcP), física (Ds) e química do solo (SB), respectivamente, predefinidos por Borges *et al.* (2019). Os valores dos indicadores foram normalizados e convertidas em pontuações que variaram de 0 a 1. Para os indicadores que “maior é melhor” (C lábil, AcP e SB), o maior valor recebeu nota 1, sendo as demais notas relativas a esta. Para a Ds, o cálculo foi o mesmo, mas a nota 1 foi para aquele de menor valor,

ou seja, “menor é melhor”. O IQS foi obtido pela soma dos valores dos indicadores, considerando os seus diferentes pesos (C lábil= 30%, Acp= 29%, Ds= 30% e SB= 11%).

2.5 Análise estatística

Os dados obtidos aos 43 meses de reabilitação do solo foram submetidos à análise de variância (ANOVA), verificando os pressupostos de normalidade, homogeneidade e homocedasticidade. Em seguida, os dados foram comparados pelo teste Student-Newman-Keuls (SNK) a 5% de probabilidade utilizando o software R versão 3.4.1 (R Development Core Team, 2024).

3. RESULTADOS

3.1 Variação dos teores de C e N antes e após a mineração

Após oito meses da implantação do experimento (julho de 2019), os teores de C-MAM e N-MAM nas diferentes profundidades apresentaram declínio evidente em relação às condições pré-mineração (Figura 3). Esse declínio foi maior na profundidade de 0-10 cm do tratamento com AQ, totalizando 37% para C-MAM e 43% para N-MAM. Nesse mesmo período, os teores de C-MOP e N-MOP retrataram quedas no tratamento com AQ, mas apenas nas profundidades de 0-10 (>50%) e 10-20 cm (>17%) (Figura 4). No tratamento com AQO, houve aumento nos teores de C-MOP e N-MOP em todas as profundidades, sendo superiores a 100% para N-MOP. Oito meses após a implantação do experimento, considerando a média de todas profundidades analisadas, os teores no tratamento com AQO foram superiores a AQ em 6, 14, 69 e 171% para C-MAM, N-MAM, C-MOP e N-MOP, respectivamente. No período de 2019 a 2022, os aportes de C e N da MAM e da MOP foram maiores nos tratamentos com AQ em relação a AQO, independente da profundidade. O destaque maior foi para C-MOP e o N-MOP no solo que recebeu o tratamento AQ, que apresentaram incrementos de 155 e 136%, respectivamente, na profundidade de 0-10 cm.

Figura 3. Teor de carbono orgânico (C) e nitrogênio da matéria orgânica associada aos minerais (MAM) pré e pós-mineração (8 e 43 meses de reabilitação) em diferentes profundidades do solo de áreas mineradas para bauxita em reabilitação com gramínea forrageira e adubação química (AQ) e adubação química + orgânica (AQO).

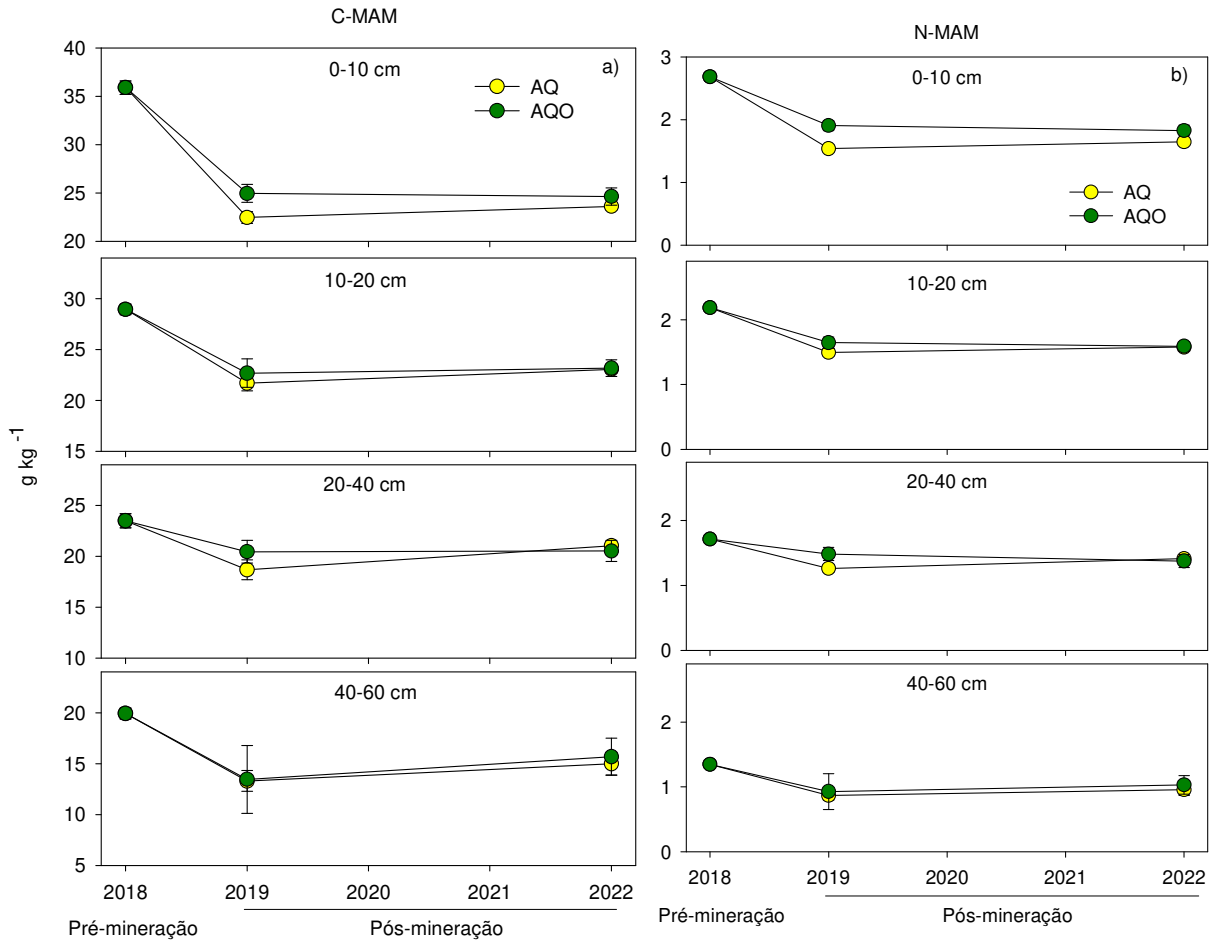
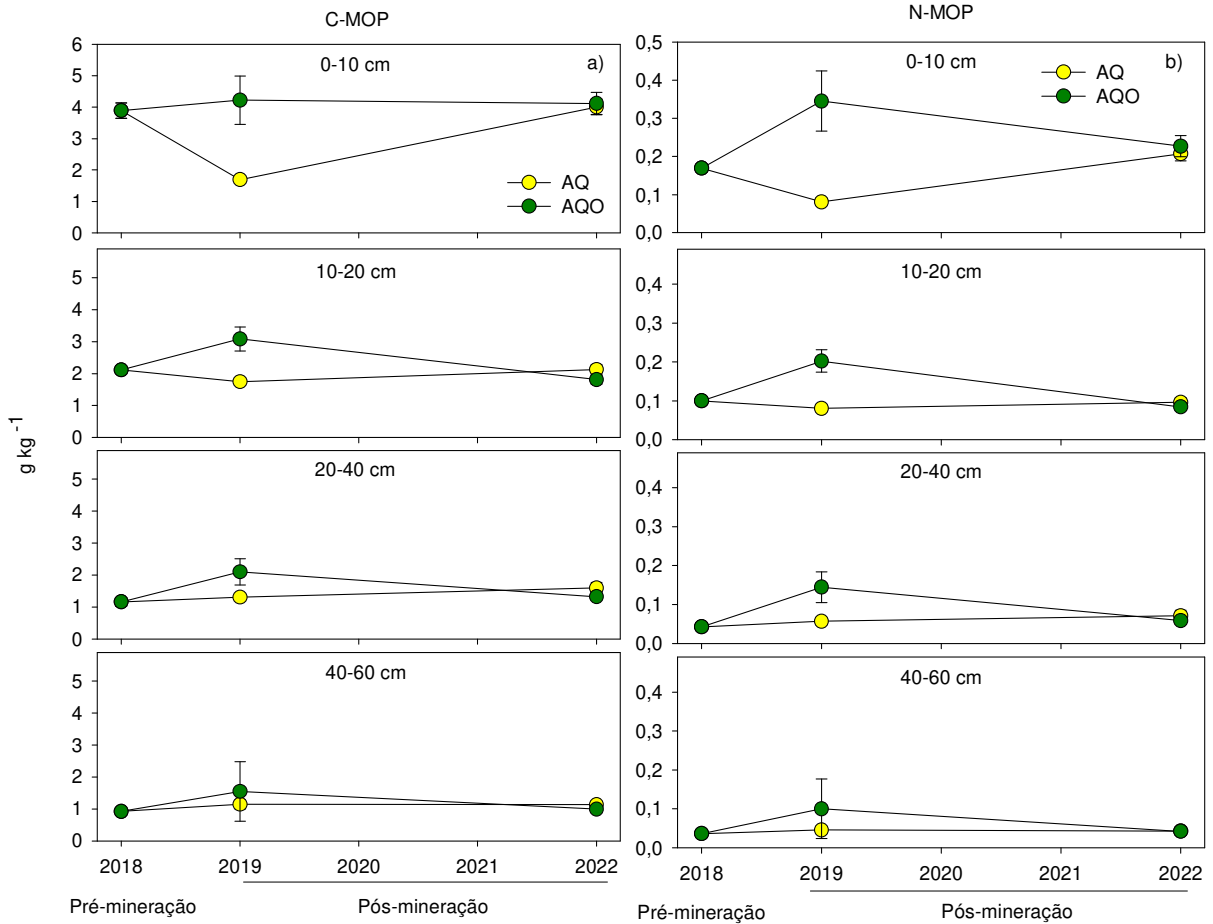


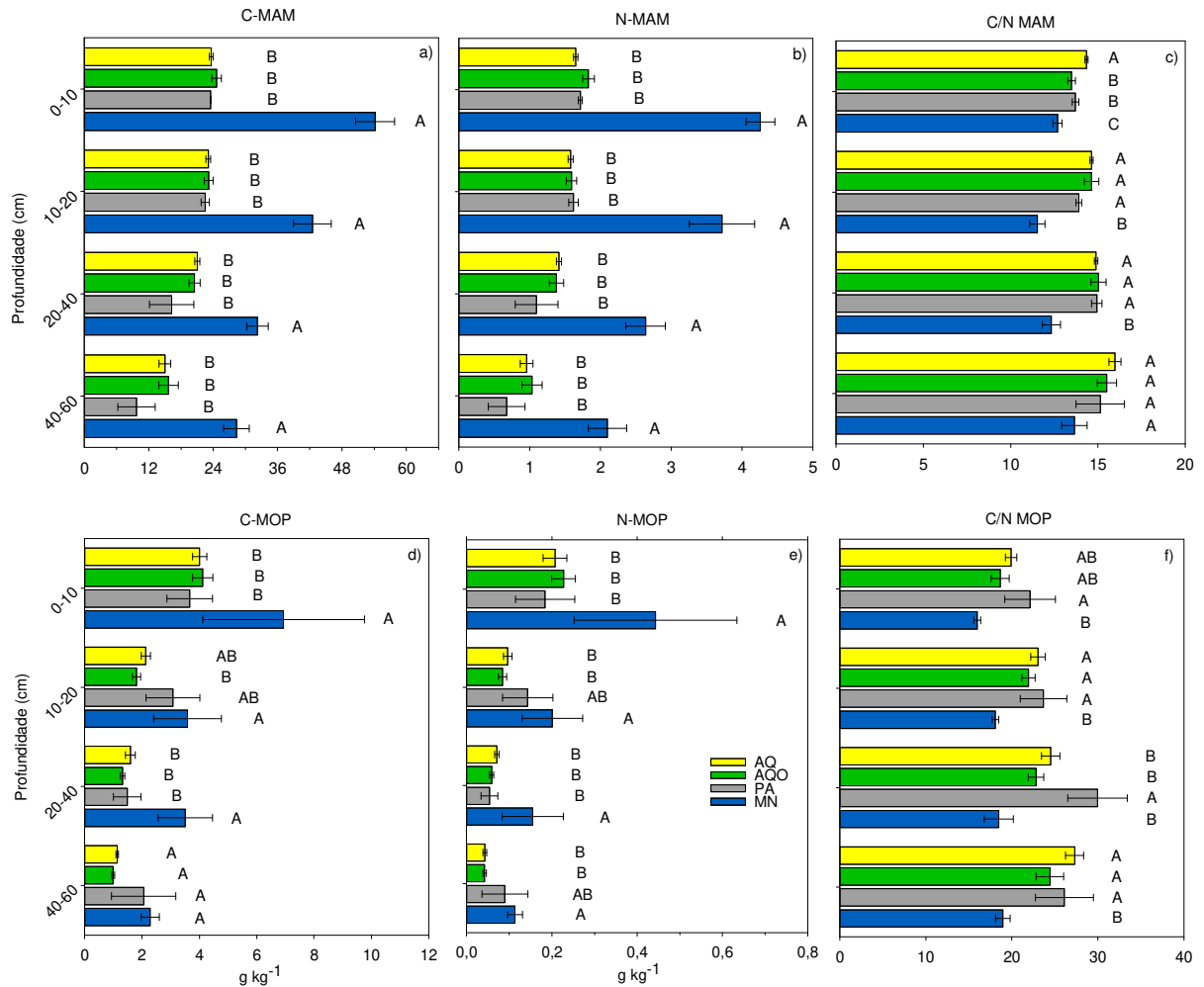
Figura 4. Teor de carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) da matéria orgânica particulada (MOP) pré e pós-mineração (8 e 43 meses de reabilitação) em diferentes profundidades do solo de áreas mineradas para bauxita em reabilitação com gramínea forrageira e adubação química (AQ) e adubação química + orgânica (AQO)



3.2 Atributos biológicos do solo após 43 meses de reabilitação

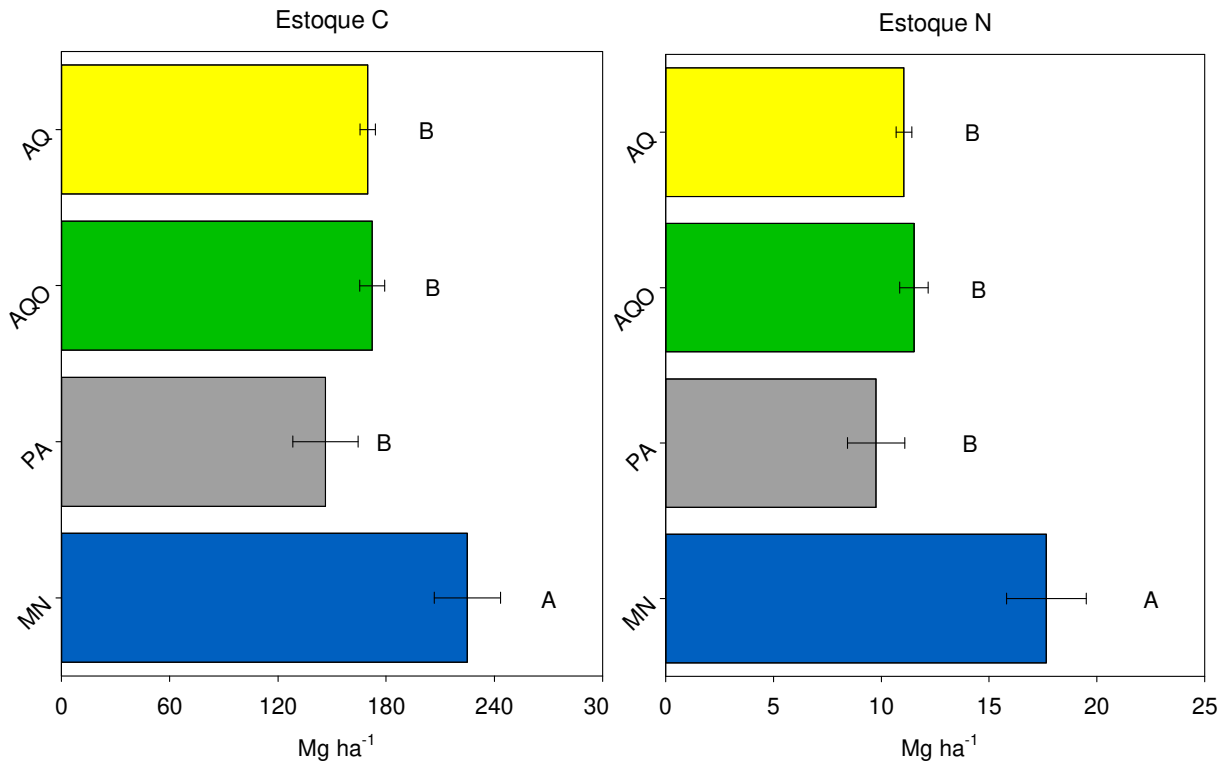
Os teores de C e N da MAM e da MOP após 43 meses de reabilitação, de modo geral, foram semelhantes em todas as profundidades, sendo que na mata nativa observou-se os maiores teores, e os tratamentos com AQ, AQO e PA não diferiram entre si (Figura 5). Os teores médios de C-MAM, C-MOP, N-MAM e N-MOP para os tratamentos com AQ e AQO na profundidade de 0-10 cm foram de $24,1 \pm 0,6$, $4,1 \pm 0,3$, $1,7 \pm 0,1$, $0,2 \pm 0,1$ g kg⁻¹, respectivamente. A relação C/N da MAM e da MOP foi menor na MN nas diferentes profundidades. A relação C/N MAM do tratamento com AQ ($14,3 \pm 0,2$) foi superior a AQO ($13,5 \pm 0,2$) apenas na profundidade 0-10 cm. De modo geral, a relação C/N da MOP pouco diferiu entre os solos com AQ, AQO e PA.

Figura 5. Teor de carbono orgânico (C), nitrogênio (N) e relação C/N da matéria orgânica associada aos minerais (MAM) e particulada (MOP) em diferentes profundidades do solo de área pós-minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira. AQ: adubação química, AOO: adubação química + orgânica, PA = gramínea forrageira minerada manejada com animais e MN = mata nativa. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si para uma mesma profundidade



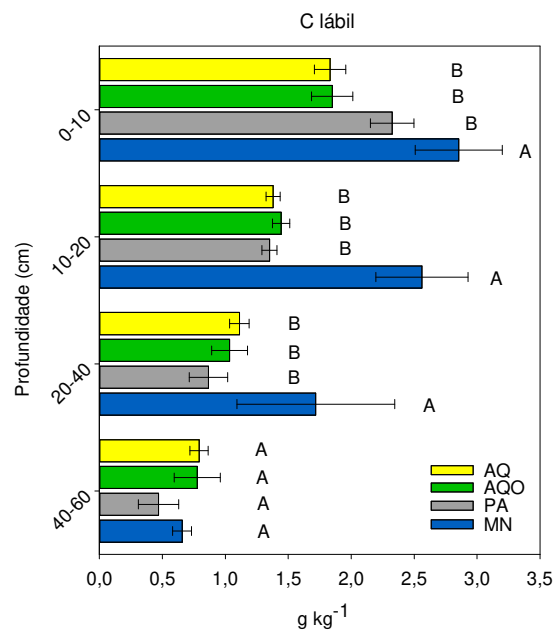
O estoque de C e N não indicou diferenças entre as áreas com gramíneas forrageiras ($\approx 163 \pm 10$ e $\approx 11 \pm 1$ Mg ha⁻¹, respectivamente), entretanto a mata nativa apresentou os maiores valores (225 ± 18 e 18 ± 2 Mg ha⁻¹, respectivamente) (Figura 6).

Figura 6. Estoque de carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) do solo na profundidade de 0-60 cm de uma área pós-minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira. AQ: adubação química, AQO: adubação química + orgânica, PA = gramínea forrageira manejada com animais e MN = mata nativa



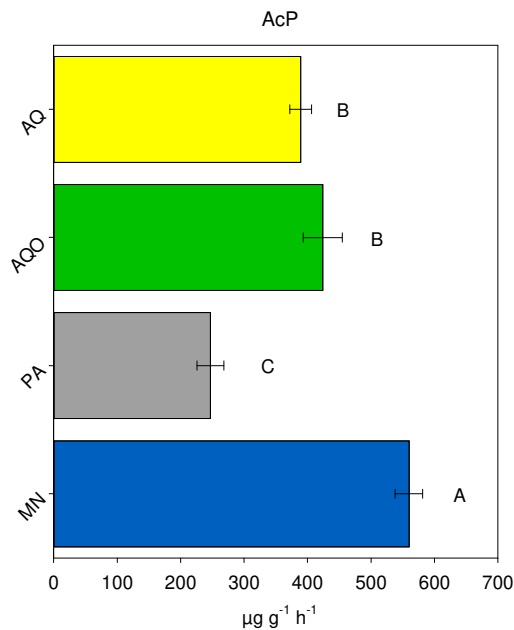
O C lábil não diferiu entre os tratamentos com AQ, AQO e PA, entretanto MN apresentou os maiores valores em cada profundidade analisada (Figura 7).

Figura 7. Teor de carbono (C) lábil de uma área minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira. AQ: adubação química, AQO: adubação química + orgânica, PA = gramínea forrageira minerada manejada com animais e MN = mata nativa



A AcP também não diferiu entre os tratamentos com AQ e AQO ($\approx 407 \pm 2 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$), entretanto estes tratamentos foram superiores a PA ($247 \pm 21 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$), mas inferiores a MN ($560 \pm 22 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) (Figura 8).

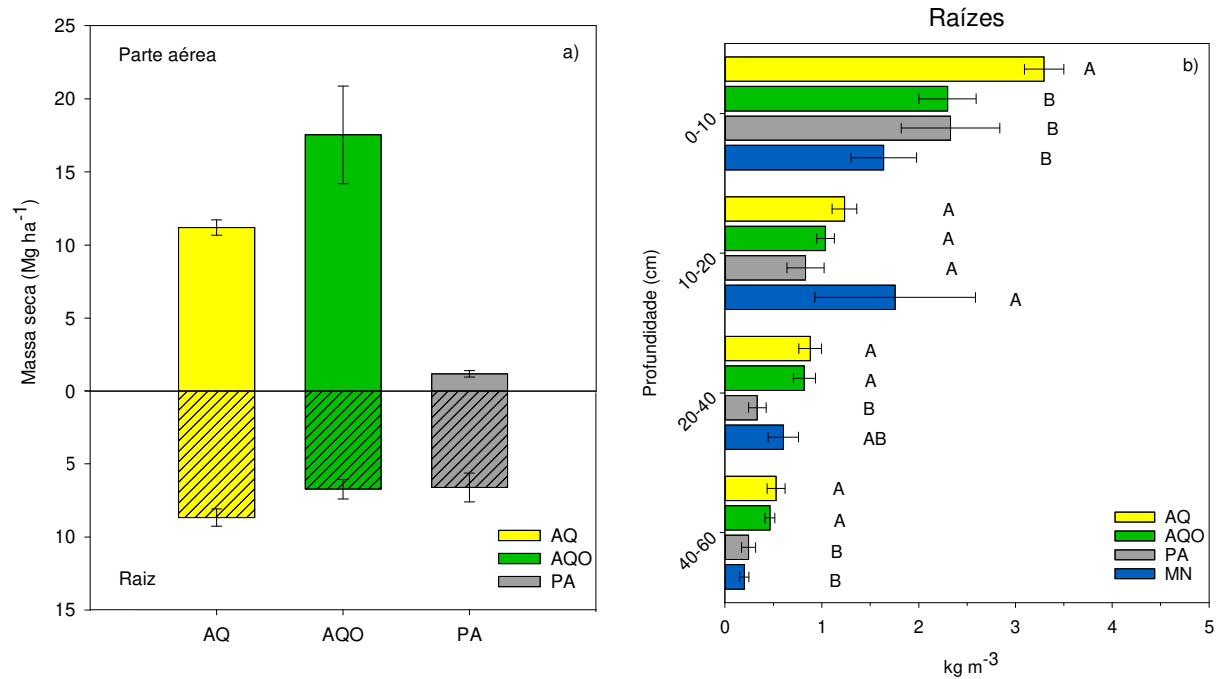
Figura 8. Atividade enzimática da fosfatase ácida (AcP) de uma área minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira. AQ: adubação química, AQO: adubação química + orgânica, PA = gramínea forrageira minerada manejada com animais e MN = mata nativa



3.3 Biomassa de parte aérea e raiz

A aplicação de 30 Mg ha^{-1} cama de frango na implantação do experimento influenciou o desenvolvimento de gramínea forrageira após 43 meses. A biomassa de parte aérea (base seca) da gramínea forrageira com adubação química + orgânica (AQO) foi 56,6 % superior à adubação química isoladamente (AQ) e quase dez vezes maior que a PA. Os resultados de biomassa de raiz apresentaram comportamento diferente, sendo o tratamento com AQ e PA $\approx 28\%$ superior a AQO. Logo, o valor da relação parte aérea/raiz das gramíneas forrageiras com AQO (2,6) foi duas vezes superior a AQ (1,3). Considerando os dados de raízes por profundidade, as gramíneas com AQ apresentaram biomassa superior a AQO apenas na profundidade de 0-10 cm, não havendo diferença nas demais profundidades. Adicionalmente, os tratamentos com AQ e AQO apresentaram maior biomassa de raízes que as áreas de referência nas profundidades de 20-40 e 40 a 60 cm (Figura 9).

Figura 9. Massa seca total de parte aérea e raiz (até 60 cm) e detalhamento de raízes nas diferentes profundidades de uma gramínea forrageira com 43 meses de processo de reabilitação com adubação química (AQ) e química + orgânica (AQO) após mineração para bauxita. Áreas de referência: PA = pastagem minerada manejada com animais e MN = mata nativa. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si para uma mesma profundidade



3.4 Índice de qualidade do solo e análise de componentes principais

Não foram observadas diferenças no índice de qualidade do solo (IQS) entre os solos com AQ, AQO e PA ($0,6 \pm 0,02$), entretanto a MN demonstrou apresentar os maiores índices ($0,81 \pm 0,04$) (Figura 10). Em relação a análise de componentes principais (ACP), as áreas com AQ, AQO e PA se correlacionaram com variáveis ligadas a fertilidade do solo (K, P, Mg, Ca,) enquanto que MN se correlacionou com as variáveis associadas a atributos orgânicos e ao IQS. O uso da ACP não possibilitou distinguir os solos com AQ, AQO e PA, separando apenas MN dos demais tratamentos (Figura 11).

Figura 10. Índice de qualidade do solo (IQS) de uma área minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira. AQ: adubação química, AQO: adubação química + orgânica, PA = pastagem minerada manejada com animais e MN = mata nativa

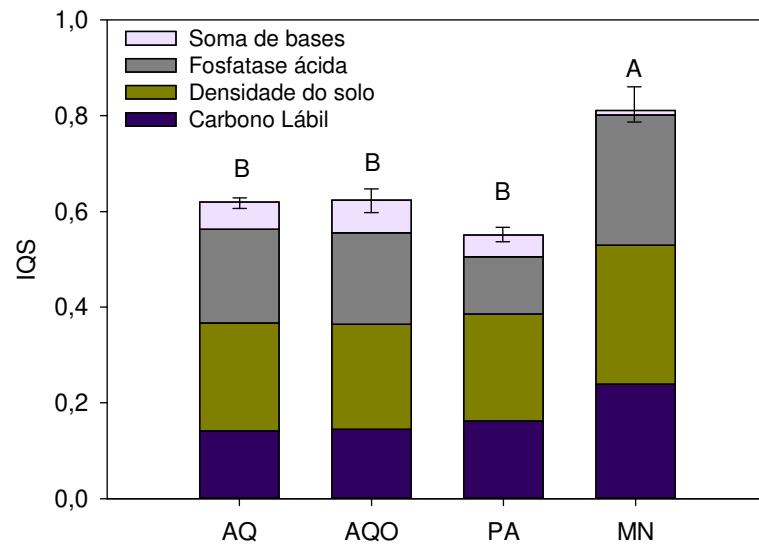
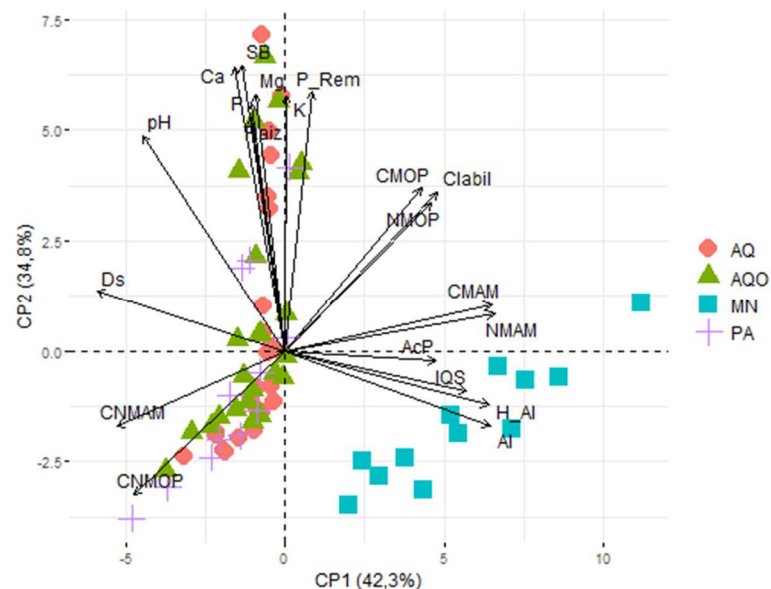


Figura 11. Análise de componentes principais das variáveis analisadas de uma área minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira. AQ: adubação química, AQO: adubação química + orgânica, PA = pastagem minerada manejada com animais e MN = mata nativa



4. DISCUSSÃO

4.1 Teores de C e N antes e após a mineração

A mineração para bauxita causa perdas consideráveis na MOS (teores de C e N), com quedas que podem ser superiores a 70% nos teores de C (Oliveira *et al.*, 2017). A intensa

movimentação do solo no processo de mineração provoca a ruptura dos agregados e impõe estresse à microbiota, resultando na exposição da MOS anteriormente protegida e acelerando sua oxidação (Cavalcante *et al.*, 2019). Além disso, o tempo de armazenamento do *topsoil* em leiras pode agravar o problema, pois, nessa etapa, não há aporte de C pelas plantas, enquanto a atividade microbiana persiste, intensificando a oxidação do C no solo (Wick *et al.*, 2009). O horizonte superficial do solo, por ser o mais rico em MOS, está sujeito a maiores perdas desse atributo. Somando a isso, o horizonte superficial sofre processo de diluição (Teixeira *et al.*, 2019), já que horizontes mais profundos (mais pobres em argila e MOS) são misturadas a ele, fato que diminui o potencial de proteção de C pelas argilas (Lavalley; Soong; Cotrufo, 2019) e torna a reabilitação desta camada ainda mais difícil.

Entre os anos de 2019 a 2022 (8 a 43 meses de reabilitação), os teores de C e N MAM apresentaram pouca variação. Este resultado indica que, após a adubação de implantação, o sistema é capaz de se retroalimentar, conseguindo manter a MOS mesmo sem a entrada de insumos externos. Neste período de 8 a 43 meses, a dinâmica da MOS esteve relacionada a entrada de C oriundos da parte aérea da gramínea forrageira e do seu sistema radicular e rizodeposições. Entretanto, os ganhos de C foram contrabalanceados as perdas no sistema, seja pela atividade microbiana, efeito *priming* de raízes e por erosão. A avaliação da reabilitação do solo durante 3 a 4 anos, como no presente estudo, ainda representa um período relativamente curto, pois a reabilitação de áreas pós-mineradas é lenta (Valente *et al.*, 2019). A recuperação dos teores de C e N da MAM pode demorar mais de 10 anos para alcançar as condições pré-mineração, mesmo com uso de técnicas conservacionistas (Capítulo 1). Carneiro *et al.* (2008) observara em áreas pós-mineradas para bauxita, teores de C e N similares à pré-mineração com 18 anos de reabilitação. Logo, a dinâmica da MOS e suas frações deve ser acompanhada ao longo dos anos, de modo a entender se os manejos adotados permitem o avanço da recuperação do solo.

O C e N da fração MOP são sensíveis às mudanças de manejo do solo e a aplicação de adubos orgânicos após o processo de mineração tem grande importância para essa fração (Cao *et al.*, 2021; Valente, 2023). Teores elevados de C e N nesta fração são base para o desenvolvimento da fauna e microbiota do solo, além da ciclagem de nutrientes e incrementos de MOS (Fulton-Smith; Cotrufo, 2019; Niu *et al.*, 2024). Entretanto, no presente estudo, a adição de cama de frango resultou em acréscimos nos teores de C e N da MOP apenas em um curto período de tempo (Figura 4). Após 43 meses, não houve diferença no efeito da adição da cama de frango nos teores de C e N da MOP dos solos com as distintas adubações (AQ e AQO),

o que pode ser um indicativo de que neste instante já havia um aporte de resíduos parecido de plantas nos dois sistemas.

4.2 Atributos biológicos do solo após 43 meses de reabilitação

A adubação orgânica com cama de frango pode aumentar os estoques de C e N de solos degradados, sendo um manejo de grande importância para a recuperação de solos pós-mineração para bauxita (Oliveira *et al.*, 2017; Valente *et al.*, 2023; Vilas Boas *et al.*, 2018). O C e N associados a MAM, fração mais estável no solo, podem demorar longos períodos de tempo para distinguir diferentes tipos de manejo, fato que pode explicar a não diferença entre os tipos de adubação (AQ e AQO) (Carvalho *et al.*, 2023; Fulton-Smith; Cotrufo, 2019; Shoumik *et al.*, 2025). Entretanto, a adubação orgânica + química resultou na formação de uma MOS de menor relação C/N estabilizada na fração mais fina do solo (MAM) da camada superficial (Figura 5). A adição de compostos mais lábeis no solo, presentes na cama de frango, possibilita a formação mais eficiente de MOS na fração MAM. A formação dessa MOS ocorre através da adsorção de compostos solúveis oriundos desse material, e/ou pela necromassa ou metabólitos da atividade microbiana (Gioacchini *et al.*, 2024; Lavalley; Soong; Cotrufo, 2019). Na fração MOP, a relação C/N teve pouca variação entre as gramíneas forrageiras, provavelmente devido às semelhanças entre as plantas dessas áreas e a não entrada de insumos externos nos últimos 43 meses. A menor relação C/N da MAM e da MOP de MN se deve a maior diversidade e eficiência dos microrganismos nessa área, além da maior variedade e qualidade dos resíduos (Valente *et al.*, 2023).

O C lábil também não apresentou diferenças entre distintos manejos de gramínea forrageira, mesmo sendo esse indicador considerado sensível a mudanças de manejo do solo (Cá *et al.*, 2022; Cavalcante *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2020). Os efeitos da adição de cama de frango no C-MOP, N-MPOP e C lábil parecem ser mais evidentes apenas nos primeiros anos após sua aplicação, não sendo observados após 43 meses. Além disso, o maior desenvolvimento do sistema radicular na área que recebeu apenas adubação química pode ter compensado a falta de adubação orgânica (Figura 9), o que resultou na não diferença em relação as frações mais lábeis de MOS. Maris *et al.* (2021) encontraram que o uso de gramíneas sem a adição de adubação orgânica, foi capaz de fixar mais C no solo do que outras plantas de cobertura (centeio e leguminosas) que receberam adubação orgânica durante quatro anos.

Apesar de PA estar em um manejo não conservacionista (sem entrada de insumos externos e com pastejo de bovinos) desde a implantação da gramínea forrageira pós-mineração,

os teores de C e N da MAM e da MOP, além do C lábil não diferenciaram de uma gramínea forrageira mantida sem cortes ou entrada de animais (tratamentos com AQ e AQO). Esses resultados corroboram com o fato de que as gramíneas forrageiras mesmo em condições de manejo inadequado (em estágio de degradação), pode permitir a manutenção dos teores de MOS por alguns anos (Chan *et al.*, 2011; Esteban *et al.*, 2019; Nogueira *et al.*, 2016). Além da capacidade do sistema radicular em manter os níveis de MOS, vale destacar que o pastejo pode estimular a maior formação de raízes novas e os animais liberam seus dejetos de alta labilidade na área, fatores que também contribuem para a formação de MOS (Fornara; Flynn; Caruso, 2020; Wilson *et al.*, 2018). A diferença dos estoques de C e N, além dos teores de C lábil das gramíneas forrageiras para a MN era esperado, visto que essas gramíneas forrageiras foram profundamente afetadas pela mineração e estão em processo de reabilitação, enquanto que MN está em um estágio mais próximo de equilíbrio com o ecossistema local.

A atividade de fosfatase ácida (AcP) foi analisada neste trabalho por ser considerada a melhor indicadora de qualidade microbiológica para áreas mineradas para bauxita em processo de reabilitação na Zona da Mata Mineira (Borges *et al.*, 2019). A análise de enzimas do solo, de modo geral, possui como característica a capacidade de diferenciar os tipos manejos em um curto intervalo de tempo, sendo uma ferramenta de grande importância em áreas em processo de reabilitação (Yin *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025). Maiores valores de AcP para MN são esperados, pois a atividade microbiológica nesses ambientes é tida como referência (Borges *et al.*, 2019; Ruiz-Dager; Paolini, 2022). Entretanto, os menores valores de AcP em PA apontam um maior nível de degradação deste último ambiente, fato não evidenciado pela análise de diferentes frações de MOS. A partir dos resultados de AcP, é possível inferir que é necessário ter cautela em relação a entrada de animais em áreas recém mineradas, visto que o solo ainda é sensível à atividade agropecuária, podendo sofrer com processos erosivos e degradação da atividade microbiana (Spletzer *et al.*, 2024; Teixeira *et al.*, 2019). A continuidade do manejo inadequado do solo pós-mineração retarda o processo de reabilitação dessas áreas, podendo tornar a atividade agropecuária insustentável ao longo do tempo (Borges *et al.*, 2019; Valente *et al.*, 2023).

4.3 Biomassa de parte aérea e raízes

A condução da gramínea forrageira com adubação química + orgânica apresentou maior massa de parte aérea em relação a gramínea forrageira que recebeu somente adubação química,

fato relacionado a maior quantidade adicional de nutrientes aportados, já que houve aplicação de 30 Mg ha⁻¹ de cama de frango no tratamento com AQO. Maior biomassa de gramínea forrageira pode propiciar maior proteção do solo contra processos erosivos, além favorecer a ciclagem biogeoquímica de nutrientes e ser fonte de C para os microrganismos do solo (Gao *et al.*, 2025; Ming *et al.*, 2024; Teixeira *et al.*, 2019). Apesar do maior desenvolvimento de parte aérea da gramínea forrageira com AQO, o crescimento de raízes deste tratamento foi menor em relação aquele que recebeu apenas adubação química, especificamente na camada de 0-10 cm de profundidade. Doses maiores de fertilizantes podem aumentar a relação parte aérea/raízes, visto que a maior disponibilidade de nutrientes no solo permite alocação preferencial na parte aérea de gramíneas, não havendo a necessidade competitiva dessas plantas em produzir sistemas radiculares mais densos (Fornara *et al.*, 2016; Fornara; Banin; Crawley, 2013; Głab; Kacorzyk, 2011).

A entrada de animais em áreas recém mineradas, como ocorreu na área PA, pode retardar o processo de reabilitação, pois o pastoreio pode diminuir consideravelmente a biomassa de parte aérea da gramínea forrageira e, conseqüentemente, a proteção do solo (Romero-Ruiz *et al.*, 2024). A baixa cobertura do solo por plantas traz vários prejuízos, principalmente em condições pós-mineração para bauxita, em que a estrutura física do solo está negativamente alterada (Borges *et al.*, 2019; Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023). Solos expostos estão mais vulneráveis a processos erosivos, além de estarem mais susceptíveis ao aumentar a Ds, a diminuição da porosidade do solo e a perdas de MOS (Ma *et al.*, 2022; Ming *et al.*, 2024). A menor biomassa de raízes em profundidade da área PA (20-40 e 40-60 cm) também pode estar relacionada aos prejuízos causados pela entrada de animais, como também pela menor fertilidade dessas áreas (Tabela 1), que compromete o investimento em raízes profundas por essas plantas (Kang *et al.*, 2025; Tozer *et al.*, 2024)

O uso do solo com gramíneas forrageiras é o mais comum na região de estudo, razão de ocorrer maior quantidade de processos de reabilitação com gramínea forrageira. O manejo correto para o bom desenvolvimento da gramínea forrageira em área em processo de reabilitação pós-mineração é essencial, entretanto a entrada de animais nessas áreas durante o processo de reabilitação deveria ser evitada. Importante ressaltar que mesmo após o final do processo de reabilitação pela empresa mineradora, os produtores devem manejar a gramínea forrageira adequadamente, respeitando a lotação recomendada por área, além de realizar adubações e divisão das áreas em piquetes (Mosier *et al.*, 2021; Xu; Jagadamma; Rowntree, 2018).

4.4 Índice de qualidade do solo (IQS) e análise de componentes principais (ACP)

O índice de qualidade é uma forma eficiente de avaliar o estágio de reabilitação de áreas pós-mineradas (Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023; Shi *et al.*, 2021), entretanto no presente estudo não foram observadas entre as áreas estudadas (AQ, AQO e a PA). Apesar dos valores IQS dos tratamentos com AQ e AQO serem inferiores a MN, seus valores podem ser considerados relativamente elevados após 43 meses de manejo da gramínea forrageira, considerando que, em uma área com 11 anos de reabilitação com cafeeiro (Capítulo 1), o valor de IQS (0,61) foi parecido com os encontrados neste estudo. Esses resultados indicam a elevada capacidade das gramíneas em recuperar da qualidade de solos pós-minerados de bauxita (Borges *et al.*, 2019; Cavalcante; Silva; Oliveira, 2023).

Não foi possível distinguir os efeitos dos tratamentos com AQ, AQO e PA a partir da análise de PCA, o que retrata a similaridade do solo entre as áreas de gramínea forrageira. Devido ao grande impacto que a mineração causou nas áreas de gramíneas forrageiras, mais tempo poderia ser necessário para que o conjunto dos indicadores avaliados fossem capazes de distinguir essas áreas. Os tratamentos com AQ, AQO e PA refletiram numa maior correlação dessas áreas com nutrientes do solo. Entretanto, os atributos orgânicos estiveram relacionados com MN, dada a não mineração desta área e a maior conservação.

5. CONCLUSÃO

A aplicação da adubação orgânica associada a adubação química no processo reabilitação de uma área pós-minerada para bauxita com gramínea forrageira não promoveu aumento nos teores de MOS (C, N nas diferentes frações) em relação a adubação química isoladamente, após 43 meses de reabilitação, independentemente das profundidades avaliadas (até 60 cm). Da mesma forma, o índice de qualidade do solo (IQS) não diferiu entre os tipos de adubação.

O monitoramento de áreas pós-mineradas precisa ser realizado ao longo de períodos mais extensos, a fim de melhor entender como diferentes estratégias de manejos podem alterar o processo de recuperação da MOS e da qualidade do solo ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ANTONELLI, Paul M. *et al.* Long term carbon sequestration potential of biosolids-amended copper and molybdenum mine tailings following mine site reclamation. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 117, p. 38–49, 2018.
- BICHARANLOO, Bahareh *et al.* Nitrogen fertilisation reduces the contribution of root-derived carbon to mineral-associated organic matter formation at low and high defoliation frequencies in a grassland soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, p. 1–14, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-024-06835-z>. Acesso em: 28 jan. 2025.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Clayton South, v. 46, n. 7, p. 1459–1466, 1995.
- BORGES, Silvano R. *et al.* Practices for rehabilitating bauxite-mined areas and an integrative approach to monitor soil quality. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 30, n. 7, p. 866–877, 2019.
- CÁ, Jorge *et al.* C and N stocks in silvopastoral systems with high and low tree diversity: Evidence from a twenty-two year old field study. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 833, p. 155298, 2022.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Hoboken, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.
- CAO, Han bing *et al.* Organic matter fractions within macroaggregates in response to long-term fertilization in calcareous soil after reclamation. **Journal of Integrative Agriculture**, London, v. 20, n. 6, p. 1636–1648, 2021.
- CARNEIRO, Marco Aurélio Carbone *et al.* Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronosseqüências de reabilitação após a mineração de bauxita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 621–632, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/ZwZ5yxXXTspQGG8H8sSpmWw/?lang=pt>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- CARVALHO, Martha Lustosa *et al.* Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools – a literature review. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 47, n. e0220130, 2023.
- CAVALCANTE, Douglas Monteiro *et al.* Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 107, n. March, p. 105668, 2019.
- CAVALCANTE, Douglas Monteiro; SILVA, Ivo Ribeiro; OLIVEIRA, Teógenes Senna. Soil quality indicators for monitoring the short-term effects of mined soil rehabilitation strategies for bauxite. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 47, p. e0220126, 2023.
- CELIS, Ricardo Andrés Oviedo *et al.* Conceptual and practical challenges of assessing soil

quality. **Soil Use and Management**, Hoboken, v. 40, n. 4, p. 13137, 2024.

CHAN, K. Y. *et al.* Soil carbon dynamics under different cropping and pasture management in temperate Australia: Results of three long-term experiments. **Soil Research**, Clayton South, v. 49, n. 4, p. 320–328, 2011. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/sr/SR10185>. Acesso em: 22 jan. 2025.

CONCEIÇÃO, Marcela C. G. da *et al.* Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. **Agricultural Sciences**, London, v. 8, n. 9, p. 904–913, 2017. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=78912>. Acesso em: 28 jan. 2025.

DONG, Lei *et al.* Effect of grazing exclusion and rotational grazing on labile soil organic carbon in north China. **European Journal of Soil Science Journal**, Issy-Les-Moulineaux, v. 72, n. 1, p. 372–384, 2020.

ESTEBAN, Diego Alexander Aguilera *et al.* Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 187, p. 60–71, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198718305919>. Acesso em: 29 mar. 2019.

FORNARA, Dario A. *et al.* Long-term nutrient fertilization and the carbon balance of permanent grassland: Any evidence for sustainable intensification?. **Biogeosciences**, Gottingen, v. 13, n. 17, p. 4975–4984, 2016.

FORNARA, Dario A.; BANIN, Lindsay; CRAWLEY, Michael J. Multi-nutrient vs. nitrogen-only effects on carbon sequestration in grassland soils. **Global change biology**, Hoboken, v. 19, n. 12, p. 3848–3857, 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23907927/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FORNARA, Dario A.; FLYNN, David; CARUSO, Tancredi. Effects of nutrient fertilization on root decomposition and carbon accumulation in intensively managed grassland soils. **Ecosphere**, Hoboken, v. 11, n. 4, p. e03103, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ecs2.3103>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FULTON-SMITH, Sarah; COTRUFO, M. Francesca. Pathways of soil organic matter formation from above and belowground inputs in a Sorghum bicolor bioenergy crop. **GCB Bioenergy**, Hoboken, v. 11, n. 8, p. 971–987, 2019.

GAO, Ming *et al.* Land degradation decreased crop productivity by altering soil quality index generated by network analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 246, p. 106354, 2025.

GARDIOLI, Luiz Fernando Negriz *et al.* N fertilization did not raise soil greenhouse gas emissions in a reforested reclaimed-mine site over a short-term study. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 194, p. 107040, 2023.

GIOACCHINI, P. *et al.* Effect of long-term compost fertilization on the distribution of organic carbon and nitrogen in soil aggregates. **Catena**, Amsterdam, v. 240, n. 107968, 2024.

GŁAB, Tomasz; KACORZYK, Piotr. Root distribution and herbage production under different

management regimes of mountain grassland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 113, n. 2, p. 99–104, 2011.

IUSS Working Group WRB. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES**. 4. ed. Vienna, 2022.

KANG, Saruul *et al.* High grazing pressure accelerates changes in community assembly over time in a long-term grazing experiment in the desert steppe of northern China. **Oecologia**, New York, v. 207, n. 1, p. 1–14, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-024-05647-3>. Acesso em: 28 jan. 2025.

LAVALLEE, Jocelyn M.; SOONG, Jennifer L.; COTRUFO, M. Francesca. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, Hoboken, n. July 2019, p. 261–273, 2019.

MA, Zhiwen *et al.* A Meta-Analysis of Soil Organic Carbon Response to Livestock Grazing in Grassland of the Tibetan Plateau. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 21, p. 14065, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/14065/htm>. Acesso em: 23 jan. 2025.

MARIS, Stefania Codruta *et al.* Cover crops, compost, and conversion to grassland to increase soil C and N stock in intensive agrosystems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 119, n. 1, p. 83–101, 2021.

MELO, Vander Freitas *et al.* Soil quality and reforestation of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) after laterite-type bauxite mining in the Brazilian Amazon forest. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 125, p. 111–118, 2018.

MING, Jiao *et al.* Light grazing promotes soil water infiltration of the rehabilitated grassland in the hilly region of the Loess Plateau. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 206, n. 107324, 2024.

MOSIER, Samantha *et al.* Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands. **Journal of Environmental Management**, London, v. 288, p. 112409, 2021.

NIU, Guoxiang *et al.* Subtropical forest macro-decomposers rapidly transfer litter carbon and nitrogen into soil mineral-associated organic matter. **Forest Ecosystems**, Beijing, v. 11, n. 100172, 2024.

NOGUEIRA, Leandro Ribeiro *et al.* Biological Properties and Organic Matter Dynamics of Soil in Pasture and Natural Regeneration Areas in the Atlantic Forest Biome. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, n. e0150366, 2016.

OLIVEIRA, Dener Márcio da Silva *et al.* Carbon Fluxes from Different Pools in a Mined Area under Reclamation in Minas Gerais State, Brazil. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 28, n. 2, p. 507–514, 2017.

R, R Development Core Team. **Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2024.

ROMERO-RUIZ, Alejandro *et al.* An agrogeophysical modelling framework for the detection

of soil compaction spatial variability due to grazing using field-scale electromagnetic induction data. **Soil Use and Management**, Hoboken, v. 40, n. 2, 2024.

RUIZ-DAGER, Magaly; PAOLINI, Jorge. Biological indicators of lacustrine and alluvial soils in Venezuela under different land use. Part 2. Assessment of soil quality. **Terra Latinoamericana**, Chapingo, v. 40, p. e967, 2022.

SANTOS, Humberto Gonçalves *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5^aed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2018.

SHI, Zeyu *et al.* Develop a Soil Quality Index to Study the Results of Black Locust on Soil Quality below Different Allocation Patterns. **Land**, Basel, v. 10, n. 8, p. 785, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/10/8/785/htm>. Acesso em: 27 nov. 2024.

SHOUMIK, Baig Abdullah Al *et al.* Dynamics of soil organic carbon and total nitrogen in particulate and mineral-associated organic matter fractions under different continuous land use patterns across Europe. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 381, n. 109411, 2025.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 13. ed. EUA:USDA Natural Resources Conservation Service, 2022.

SPLETOZER, Aline Gonçalves *et al.* Surface runoff in six years of rehabilitation of two areas after bauxite mining in Southeastern Brazil. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 202, p. 107231, 2024.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W. *et al.* (org.). **Methods of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775–833. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssabookser5.2.c37>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TEIXEIRA, Rafael S. *et al.* Impact of fertilization on cover crops and microbial community on a bauxite-mined soil undergoing reclamation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 182, n. 4, p. 515–523, 2019.

TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3^a edição. Distrito Federal: EMBRAPA, 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>.

TOZER, Katherine N *et al.* Effect of three defoliation frequency treatments and drought on perennial ryegrass herbage and root growth and water-soluble carbohydrate reserves. **Grassland Research**, Hoboken, v. 3, n. 4, p. 347–363, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qlr2.12105>. Acesso em: 28 jan. 2025.

VALANI, Gustavo Pereira *et al.* Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 220, p. 105357, 2022.

VALENTE, Fernanda Daniele de Almeida *et al.* Growth, biomass and carbon stocks in forest cover planted in an area of bauxite mining in rehabilitation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, p. 1–15, 2019.

VALENTE, Fernanda D.A. *et al.* Influence of different tree species on autotrophic and heterotrophic soil respiration in a mined area under reclamation. **Land Degradation and Development**, Hoboken, v. 32, n. 15, p. 4288–4299, 2021.

VALENTE, Fernanda D. A. *et al.* Litterfall production, decomposition and litter nutrient contents in a mined area revegetated with different forest species. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 47, p. e0220122, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/wy8WGBbZrN9KCKQDqsztfs/?lang=en>. Acesso em: 30 nov. 2024.

VALENTE, Fernanda D. Almeida *et al.* Native multispecies and fast-growing forest root biomass increase C and N stocks in a reclaimed bauxite mining area. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 195, n. 1, p. 1–19, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-022-10720-6>. Acesso em: 30 nov. 2024.

VILAS BOAS, Hiran F. *et al.* Soil organic carbon recovery and coffee bean yield following bauxite mining. **Land Degradation & Development**, Hoboken, v. 29, n. 6, p. 1565–1573, 2018.

WEIL, Ray R. *et al.* Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, Oxon, v. 18, n. 1, p. 3–17, 2003.

WICK, A. F. *et al.* Soil aggregation and organic carbon in short-term stockpiles. **Soil Use and Management**, Hoboken, v. 25, n. 3, p. 311–319, 2009.

WILSON, Chris H. *et al.* Grazing enhances belowground carbon allocation, microbial biomass, and soil carbon in a subtropical grassland. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 24, n. 7, p. 2997–3009, 2018.

XU, Sutie; JAGADAMMA, Sindhu; ROWNTREE, Jason. Response of Grazing Land Soil Health to Management Strategies: A Summary Review. **Sustainability 2018, Vol. 10, Page 4769**, Basel, v. 10, n. 12, p. 4769, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/12/4769/htm>. Acesso em: 25 fev. 2025.

YIN, Xiaolei *et al.* Reclamation leads to loss of soil organic carbon and molecular complexity: Evidence from natural to reclaimed wetlands. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 248, p. 106436, 2025.

ZHANG, Xingfeng *et al.* Organic Amendments Enhance the Remediation Potential of Economically Important Crops in Weakly Alkaline Heavy Metal-Contaminated Bauxite Residues. **Agriculture**, Basel, v. 15, n. 1, p. 15, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/1/15/htm>. Acesso em: 23 jan. 2025.

APÊNDICE

Tabela S1. Atributos químicos, físicos e biológicos de solo de área pré-mineração para bauxita e pós-mineração (6 meses após a reconfiguração topográfica) e atualmente em processo de reabilitação com cafeeiro manejado com diferentes plantas de cobertura e adubações

Atributo	Unidade	Profundidade (cm)			
		Pré-mineração 0-20	Pós mineração		
		0-20	0-20	20-40	40-60
Carbono orgânico total (C)	dag/kg	3,61	1,46	1,30	0,78
C-MAM	dag/kg	-	1,19	1,22	0,69
C-MOP	dag/kg	-	0,27	0,08	0,09
Carbono orgânico lábil	g/kg	2,84	0,59	-	-
Nitrogênio total (N)	dag/kg	0,25	0,10	0,09	0,05
N-MAM	dag/kg	-	0,08	0,08	0,05
N-MOP	dag/kg	-	0,02	0,004	0,004
pH H ₂ O (1:2,5)		5,64	5,23	5,10	4,98
P	mg/dm ³	7,87	1,05	0,74	0,78
K	cmolc/dm ³	0,19	0,07	0,10	0,10
Ca ²⁺	cmolc/dm ³	1,92	0,37	0,48	0,62
Mg ²⁺	cmolc/dm ³	0,54	0,13	0,16	0,19
S	mg/dm ³	-	4,58	11,50	18,50
Mn	mg/dm ³	14,3	5,04	5,13	9,05
Fe	mg/dm ³	96,5	174,91	187,34	156,68
Cu	mg/dm ³	-	0,60	0,72	1,50
Zn	mg/dm ³	10,9	1,25	1,06	1,27
Al ³⁺	cmolc/dm ³	0,10	0,10	0,06	0,00
H + Al	cmolc/dm ³	7,22	3,91	4,09	3,55
Fósforo remanescente (P-rem)	mg/dm ³	5,02	5,55	8,61	9,59
Capacidade de troca catiônica	cmolc/dm ³	9,86	4,48	4,83	4,46
Argila	g/kg	450	640	590	520
Silte	g/kg	200	70	90	110
Areia	g.kg	350	290	320	370
Densidade do solo (Ds)	kg/dm ³	0,69	1,25	1,33	1,42
Microporosidade	dm ³ /dm ³	0,28	0,25	0,28	0,28
Macroporosidade	dm ³ /dm ³	0,45	0,32	0,26	0,22
Porosidade total	dm ³ /dm ³	0,73	0,57	0,54	0,50
Fosfatase ácida	µg <i>p</i> -nitrofenol/h/g solo	223,3	79,1	-	-
Fosfatase alcalina	µg <i>p</i> -nitrofenol/h/g solo	38,2	0,00	-	-
β-Glicosidade	µg <i>p</i> -nitrofenol/h/g solo	64,9	21,8	-	-

C e N determinado em IRMS; C lábil determinado por espectrofotometria de absorção molecular; P e K disponíveis extraídos em Mehlich-1 e determinados com fotometria de chama e espectrometria; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ extraídos por KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por fotometria e titulometria; Mn, Fe, Cu e Zn extraídos por Mehlich-1 e determinados por espectrofotometria de absorção atômica. H+Al extraído por acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ em pH 7,0 e determinado por titulometria; Argila, silte e areia obtidos por dispersão física (50 rpm por 16h) e química (NaOH 0,1 mol L⁻¹). Métodos de acordo com EMBRAPA (TEIXEIRA et al., 2019). Tabela adaptada de Borges (2013).

Tabela S2. Cargas fatoriais rotacionadas (*loadings*) e comunalidades de três fatores calculados a partir dos atributos do solo (camada de 0–20 cm) de três áreas: pré-mineração cobertos com floresta nativa e cafeeiros, pós-mineração (6 meses após a reconstrução do solo minerado de bauxita) e 19 meses após a reabilitação com cafeeiros sob diferentes fertilizantes e plantas de cobertura plantadas nas entrelinhas.

Grupo de indicadores	Atributo do solo	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Comunalidade
Orgânico	Carbono orgânico total	-0,96	-0,12	-0,19	0,98
	Carbono orgânico lábil	-0,94	-0,21	-0,12	0,94
	Nitrogênio total	-0,95	-0,11	-0,27	0,99
Químico	P	-0,06	0,09	0,86	0,86
	Mn	-0,43	-0,26	-0,91	0,91
	Fe	-0,61	-0,42	-0,27	0,77
	Zn	-0,72	-0,59	-0,27	0,94
	pH	-0,27	0,84	0,28	0,86
	Al ³⁺	0,85	-0,92	-0,10	0,84
	H + Al	-0,88	-0,42	-0,10	0,96
	Fósforo disponível	-0,17	0,55	0,79	0,92
	Soma de bases	-0,09	0,70	0,29	0,95
Físico	Densidade do solo	0,28	0,92	0,02	0,92
	Microporosidade	0,95	0,07	0,01	0,86
	Macroporosidade	-0,41	-0,80	-0,52	0,93
	Porosidade total (TP)	-0,27	-0,90	-0,07	0,90
Microbiológico	Atividade da fosfomonoesterase ácida (AcP)	-0,97	-0,09	-0,12	0,97
	Atividade da fosfomonoesterase alcalina	-0,79	0,21	0,82	0,82
	Atividade da β-glicosidase	-0,93	-0,24	-0,24	0,75
	Atividade respiratória da biomassa microbiana	-0,34	0,59	0,06	0,60
	Autovalor (Eigenvalue)	11,47	4,85	1,12	
	Variância explicada (%)	57,43	24,47	5,58	
	Variância cumulativa explicada (%)		82,16	87,74	

* Os atributos do solo orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos selecionados como indicadores da qualidade do solo estão em negrito. Fonte: (Teixeira *et al.*, 2019).

Tabela S3. Porcentagem da matéria orgânica associada aos minerais (MAM) e particulada (MOP) e cascalho de uma área pós-minerada para bauxita em processo de reabilitação com cafeeiro manejado 11 anos com diferentes adubações (Ad) e plantas de cobertura (Cob)

Ad	Cob	Profundidade 0-20 cm			Profundidade 20-40 cm			Profundidade 40-60 cm		
		% MAM	% MOP	% Cascalho	% MAM	% MOP	% Cascalho	% MAM	% MOP	% Cascalho
AC	SP	80,3	19,7	6,7	80,5	19,5	4,9	77,8	22,2	7,4
AC	L	78,4	21,6	4,5	78,6	21,4	5,3	77,1	22,9	10,1
AC	B	78,2	21,8	5,1	77,4	22,6	10,0	77,5	22,5	8,5
AC	B+L	76,2	23,8	5,1	76,8	23,2	7,4	77,0	23,0	9,8
CF	SP	79,7	20,3	9,4	80,6	19,4	10,3	80,9	19,1	9,4
CF	L	79,1	20,9	3,9	80,8	19,2	8,5	81,8	18,2	9,0
CF	B	83,1	16,9	7,2	83,3	16,7	9,0	81,2	18,8	15,9
CF	B+L	79,7	20,3	5,7	80,0	20,0	10,7	79,4	20,6	14,8
AQ	SP	79,2	20,8	9,5	78,7	21,3	12,6	80,3	19,7	15,0
AQ	L	79,8	20,2	8,2	80,5	19,5	14,7	80,2	19,8	15,5
AQ	B	80,9	19,1	5,2	80,1	19,9	7,6	80,8	19,2	9,3
AQ	B+L	79,4	20,6	8,4	79,2	20,8	7,6	80,4	19,6	12,2
CF+Q	SP	76,3	23,7	5,4	78,0	22,0	8,9	77,2	22,8	13,6
CF+Q	L	80,1	19,9	5,3	79,2	20,8	9,3	78,5	21,5	14,0
CF+Q	B	79,9	20,1	4,5	77,8	22,2	9,9	78,8	21,2	13,1
CF+Q	B+L	78,9	21,1	5,3	76,6	23,4	6,5	77,6	22,4	10,5
Pós-mineração Tempo 0		66,5	33,5	6,2	77,4	22,6	8,9	72,1	27,9	11,8

AC: Controle; CF: cama de frango; AQ: Ad. química; CF+Q = cama de frango + ad. química. SP = sem plantas; L = leguminosas; B = braquiária; e B+L = braquiária + leguminosa.

Tabela S4. Valores dos indicadores do índice de qualidade do solo (IQS) de uma área pós-mineração para bauxita em processo de reabilitação com cafeeiro manejado 11 anos com diferentes adubações (AC = Controle; AO = adubação orgânica; AQ = adubação química; O + Q = adubação orgânica + química) e plantas de cobertura (SP= sem planta; L = leguminosa; B = braquiária, B + L = braquiária + leguminosa)

Adubação	Planta de cobertura	C lábil	Ds	AcP	SB
		g kg ⁻¹	g cm ⁻³	µg g ⁻¹ h ⁻¹	cmolc dm ⁻³
AC	SP	1,2 ±0,3	1,43 ±0,05	146 ±26	1,1 ±0,5
AC	L	1 ±0,2	1,29 ±0,02	187 ±21	0,9 ±0,4
AC	B	1,8 ±0,4	1,28 ±0,02	146 ±11	1,1 ±0,2
AC	B+L	1,9 ±0,1	1,36 ±0,03	260 ±26	1,2 ±0,4
CF	SP	2 ±0,6	1,29 ±0,03	161 ±27	4,9 ±0,8
CF	L	2,3 ±0,5	1,31 ±0,05	180 ±32	4,6 ±0,7
CF	B	2 ±0,1	1,29 ±0,01	302 ±72	5,3 ±0,3
CF	B+L	2,7 ±0,5	1,26 ±0,03	190 ±28	4,9 ±0,8
AQ	SP	1,8 ±0,3	1,3 ±0,05	155 ±31	4,8 ±0,3
AQ	L	2,1 ±0,3	1,31 ±0,02	146 ±11	5,6 ±0,7
AQ	B	1,7 ±0,3	1,36 ±0,04	135 ±11	5,1 ±0,7
AQ	B+L	2,1 ±0,4	1,32 ±0,03	163 ±23	4,9 ±0,7
CF+Q	SP	1,5 ±0,3	1,34 ±0,03	186 ±26	6,4 ±0,4
CF+Q	L	1,8 ±0,3	1,34 ±0,04	162 ±16	6,2 ±0,6
CF+Q	B	2,6 ±0,5	1,35 ±0,02	245 ±20	7 ±0,6
CF+Q	B+L	2,9 ±0,4	1,34 ±0,01	256 ±25	7,8 ±0,4
Café não minerado		2,8 ±0,3	1,26 ±0,08	206 ±27	3,8 ±0,6
Mata nativa		3,2 ±0,2	0,91 ±0,08	501 ±28	0,5 ±0,1

Carbono (C) lábil, densidade do solo (Ds), atividade da fosfatase ácida (AcP) e soma de bases (SB).

Tabela S5. Teores de nutrientes da parte aérea de gramíneas forrageiras de área minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação manejadas com adubação química (AQ) e adubação química + orgânica (AQO)

Ad	P	K	P	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
----- dag kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----					
AQ	0,2 ±0	1,3 ±0,1	0,5 ±0	0,3 ±0	0,1 ±0	2,1 ±0,1	122,7 ±11,2	19,3 ±1,4	253,7 ±34,6	12,2 ±0,9	0,2 ±0
AQO	0,2 ±0	1,5 ±0,2	0,4 ±0	0,3 ±0	0,1 ±0	2,3 ±0,2	87,7 ±13,3	22 ±1	221,2 ±32,5	11,4 ±1,7	0,2 ±0

Tabela S6. Porcentagem da matéria orgânica associada aos minerais (MAM) e particulada (MOP) em diferentes profundidades de uma área minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira. AQ: adubação química, AQO: adubação química + orgânica, PA = pastagem minerada manejada com animais e MN = mata nativa

Identificação	% MAM	% MOP	% MAM	% MOP	% MAM	% MOP	% MAM	% MOP
	0-10 cm		10-20 cm		20-40 cm		40-60 cm	
AQ	80,0	20,0	81,7	18,3	82,4	17,6	83,2	16,8
AQO	80,4	19,6	82,5	17,5	83,2	16,8	85,0	15,0
PA	76,9	23,1	76,0	24,0	83,6	16,4	72,3	27,7
MN	76,3	23,7	77,5	22,5	81,6	18,4	79,2	20,8

Tabela S7, Valores dos indicadores do índice de qualidade do solo (IQS) de uma área minerada para bauxita com 43 meses de reabilitação com gramínea forrageira, AQ: adubação química, AQO: adubação química + orgânica, PA = pastagem minerada manejada com animais e MN = mata nativa

Identificação	C lábil g kg ⁻¹	Ds g cm ⁻³	AcP μg g ⁻¹ h ⁻¹	SB cmolc dm ⁻³
AQ	1,9 ±0,1	1,23 ±0,01	389 ±23	5,1 ±0,6
AQO	1,7 ±0,1	1,26 ±0,02	424 ±31	5,7 ±0,8
PA	1,8 ±0,1	1,23 ±0,01	247 ±17	3 ±0,2
MN	2,7 ±0,4	0,95 ±0,03	560 ±24	0,6 ±0,1

Carbono (C) lábil, densidade do solo (Ds), atividade da fosfatase ácida (AcP) e soma de bases (SB),

Figura S1. Desenvolvimento do feijoeiro e milho em uma área experimental pós-mineração de bauxita em recuperação com cafeeiro manejado 11 anos com diferentes adubações e plantas de cobertura



Figura S2. Aplicação de cama de aviário na área experimental pós-mineração em novembro de 2018. PA = pastagem minerada manejada com animais

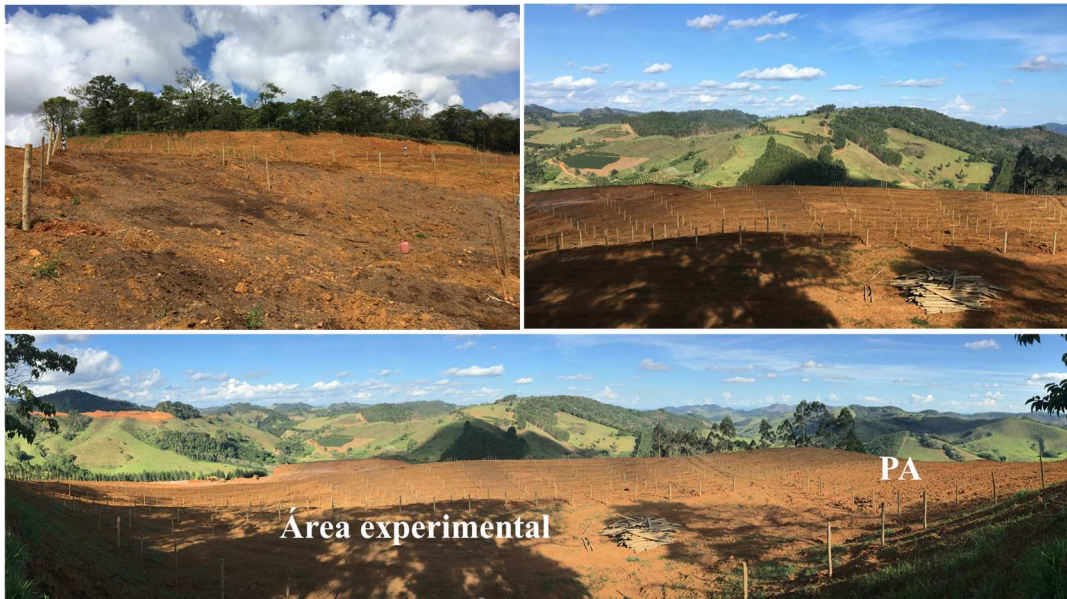


Figura S3. Área experimental pós-mineração de bauxita com pastagem manejada com adubação química e orgânica em fevereiro de 2019. PA = pastagem com entrada de animais



Figura S4. Coleta de parte aérea de pastagem (julho de 2022) de uma área pós-mineração de bauxita em processo de recuperação com adubação química e orgânica



Figura S5. Coleta e separação de raízes de uma área pós-minerada de bauxita em processo de recuperação com adubação química e orgânica



Figura S6. Área experimental- de pastagem após corte da parte aérea em 2022. PA = pastagem com entrada de animais



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reabilitação de áreas mineradas para bauxita é um processo lento, que demanda vários anos. A recuperação da MOS e qualidade do solo requer um manejo adequado, sendo essenciais a conservação do solo, o uso de insumos agrícolas e a cobertura do solo com plantas.

O uso de cama de frango + adubo químico junto a braquiária + leguminosas na entrelinha do cafeeiro é um manejo promissor para melhorias na qualidade do solo de áreas mineradas para bauxita. Este manejo é capaz de aumentar o teor de MOS em superfície e subsuperfície.

A aplicação de cama de frango foi fundamental em áreas de cafeeiro após a mineração para bauxita. No entanto o seu uso na reabilitação de áreas com gramíneas forrageiras não se diferenciou das áreas que só receberam adubação química.

As gramíneas forrageiras cobrem rapidamente o solo e possuem considerável biomassa radicular, características desejáveis para reabilitação de áreas mineradas. Entretanto, o manejo destas gramíneas deve ser feito corretamente, pois o seu pastejo de forma inadequada pode resultar em perdas na qualidade do solo, que primeiramente afeta a qualidade microbiológica do solo.

O monitoramento contínuo de áreas pós-mineradas para bauxita é essencial para o sucesso da reabilitação. O uso de indicadores que melhor reflitam a qualidade do solo é uma alternativa eficaz para o acompanhamento da evolução das etapas da reabilitação.