

**AMANDA DE ABREU ANUNCIAÇÃO**

**COBERTURAS DE PILHAS DE ESTÉRIL DA MINERAÇÃO DE FERRO E  
EFEITOS NA GERMINAÇÃO DO BANCO DE SEMENTES DO *TOPSOIL***

Dissertação 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 *Magister Scientiae*.

Orientador: Igor Rodrigues de Assis

Coorientadores: Raphael B. Alves Fernandes  
Eduardo Gusmão Pereira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2023**

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

T

A636c  
2023

Anunciação, Amanda de Abreu, 1996-  
Coberturas de pilhas de estéril da mineração de ferro e  
efeitos na germinação do banco de sementes do *topsoil* / Amanda  
de Abreu Anunciação. – Viçosa, MG, 2023.  
1 dissertação eletrônica (78 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Igor Rodrigues de Assis.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Solos, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.616>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Degradação. 2. Recuperação ecológica. 3. Ferro -  
Minas e mineração. 4. Bioengenharia. 5. Bancos de sementes.  
6. Topossolo. I. Assis, Igor Rodrigues de, 1980-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.  
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.  
III. Título.

CDD 22. ed. 631.45


**AMANDA DE ABREU ANUNCIACÃO**

**COBERTURAS DE PILHAS DE ESTÉRIL DA MINERAÇÃO DE FERRO E  
EFEITOS NA GERMINAÇÃO DO BANCO DE SEMENTES DO *TOPSOIL***

Dissertação 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 *Magister Scientiae*.


APROVADA: 28 de julho de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 AMANDA DE ABREU ANUNCIACAO  
Data: 04/10/2023 12:25:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Amanda de Abreu Anunciação  
Autora

Documento assinado digitalmente  
 IGOR RODRIGUES DE ASSIS  
Data: 04/10/2023 15:25:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Igor Rodrigues de Assis  
Orientador

*Aos meus pais, Mauro e Maria Aparecida  
e irmãos, Marcos e Matheus*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por sua infinita bondade e por me permitir chegar até aqui.

À Universidade Federal de Viçosa pela minha formação e ao Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade de realizar o Mestrado. Obrigada a todos os professores, técnicos, servidores e funcionários que contribuíram e foram essenciais para a minha formação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Vale pelo financiamento do projeto e apoio no experimento em campo.

Ao professor Igor Rodrigues de Assis pela orientação desde a graduação e nesse trabalho. Agradeço pelo apoio, incentivo, conselhos, paciência e exigências. Agradeço por todas as oportunidades que me proporcionou. Obrigada por tanto.

Ao professor Raphael Bragança pelo carinho e acolhimento nas sábias palavras quando eu não me senti capaz.

Aos co-orientadores, Raphael Bragança e Eduardo Gusmão, e à banca pelas contribuições, críticas e sugestões nesse trabalho.

Aos colegas do laboratório de Recuperação Ambiental, em especial, Daniel Nunes, Ana Paula Altoé, Fernanda Almeida, Rugana Imbaná e Sandro Moreira por tornar essa jornada mais leve e por sempre serem tão solícitos a ajudar. Agradeço aos estagiários do laboratório, em especial a Nathália Vieira, pela participação ativa e toda contribuição nesse trabalho.

Agradeço imensamente ao Sandro Moreira, Heitor Palma, professor Raphael Bragança, a Daniela Pinheiro e toda equipe Sete pelo apoio nas atividades em campo e nas coletas.

Aos técnicos dos laboratórios do Departamento de Solos, em especial ao Cláudio Brustolini e Adriana do Laboratório de Física do Solo, ao João Milagres e Humberto Rosado do Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE). Obrigada pela paciência e ajuda, eu aprendi muito com vocês.

Aos colegas do LIE pela ajuda, cafezinhos da tarde, conversas e por tornarem os dias de trabalho mais leves.

Aos meus amigos, Cintia Neves, Renato Welmer Veloso, Vinicius Petersen, Leticia Almeida e Mariana Gomes que apesar da distância física sempre se fizeram presentes, me apoiaram, me ouviram e me acolheram.

Agradeço todos aqueles que contribuíram para a execução desse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

## RESUMO

ANUNCIACÃO, Amanda A, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Coberturas de pilhas de estéril da mineração de ferro e efeitos na germinação do banco de sementes do *topsoil***. Orientador: Igor Rodrigues de Assis. Coorientadores: Raphael Bragança Alves Fernandes e Eduardo Gusmão Pereira

Reservas de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero geralmente estão associadas a presença de ecossistemas singulares, os Campos Rupestres Ferruginosos (CRF), que são constantemente ameaçados e impactados pela mineração. A recuperação dos CRF após os impactos causados pela atividade minerária é um grande desafio devido as especificidades que esse ecossistema apresenta. O impacto ambiental é inerente a mineração, mudanças bruscas são causadas na paisagem e passivos ambientais como pilhas de estéril são gerados. A bioengenharia de solos é uma técnica muito empregada para a recuperação de áreas degradadas pela atividade minerária. A transposição de *topsoil*, aplicação de biomantas e mais recentemente, aplicação de manta projetada, são exemplos de técnicas amplamente utilizadas. A transposição do *topsoil* é uma técnica muito vantajosa, pois este material é fonte de um banco de sementes viáveis, contém propriedades químicas, físicas e biológicas que podem potencializar os resultados da revegetação. Cada uma destas técnicas citadas é utilizada individualmente, mas a utilização destas em consórcio com o *topsoil* pode ser uma alternativa para potencializar os resultados da revegetação, principalmente em condições de inclinação como taludes de pilhas de estéril evitando a sua perda por erosão. No entanto, pouco se sabe sobre a influência dessas associações nas propriedades do substrato de taludes de pilhas de estéril, no estabelecimento da vegetação, nas propriedades e no banco de sementes do *topsoil*. Por conseguinte, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a influência das diferentes técnicas de bioengenharias de solos em associação ou não nas propriedades físicas, químicas e biológicas das pilhas de estéril e a capacidade de germinação do banco de sementes do *topsoil* dos campos ferruginosos. Para esse estudo, foram realizados dois experimentos. Um experimento foi montado em pilha de estéril com o objetivo de avaliar a influência de diferentes técnicas de bioengenharia de solos em associação ou não, nas propriedades químicas, físicas e biológicas do substrato de pilha de estéril, sobre o estabelecimento da cobertura vegetal e sobre a erosão das pilhas de estéril. O experimento seguiu delineamento inteiramente casualizado com três repetições. Os tratamentos consistiram em: Hidrossemeadura (H); Hidrossemeadura + biomanta (B); Hidrossemeadura + manta projetada (MP); Hidrossemeadura + *topsoil* (T);

*Topsoil* + hidrossemeadura (T+H). Após dez meses de da montagem do experimento foi avaliada a cobertura pela vegetação e foram realizadas análises químicas, físicas e biológicas do substrato e avaliada a cobertura pela vegetação. Diferenças quanto a cobertura vegetal e características do substrato foram encontradas entre associações das técnicas de bioengenharia. Os tratamentos não se diferenciaram quanto a perda de sedimentos por erosão. O tratamento com biomanta se destacou positivamente entre os demais tratamentos. Um segundo experimento foi conduzido em casa de vegetação com objetivo de avaliar a influência da manta projetada sob umidade controlada na germinação do banco de sementes de um *topsoil* de CRF. O experimento seguiu delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 2 x 4, com quatro repetições. O primeiro fator consiste na presença e ausência de manta projetada sobre o *topsoil* e o segundo fator em quatro diferentes umidades com valores aproximados equivalentes a 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da C.C., monitorada diariamente por gravimetria para a reposição da água perdida durante 180 dias. Foram avaliadas a emergência (quantificação e identificação) de plantas, a germinação por meio do Índice de Velocidade de Emergência (IVE) e a diversidade de espécies foi avaliada por meio do índice de Shannon Weaver ( $H'$ ), do índice de equabilidade de Pielou (J) e do índice de Simpson (1-D). Ao final dos seis meses foram realizadas as análises químicas e físicas do *topsoil*. Após término do período experimental foram contabilizados 214 indivíduos em todas as unidades experimentais, sendo identificadas doze espécies presentes no banco de sementes do *topsoil* utilizado. Foi encontrada uma baixa diversidade de espécies. A manta influenciou negativamente na germinação das sementes do *topsoil*. A umidade não foi significativa quanto a diferença no número de indivíduos, mas esta influenciou na disponibilidade de nutrientes, mostrando ser importante o seu controle.

**Palavras-chave:** Recuperação de áreas degradadas. Bioengenharia de solos. Banco de sementes. Campo rupestre ferruginoso. Mineração.

## ABSTRACT

ANUNCIACÃO, Amanda A, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2023. **Covers for iron mining sterile waste piles and effects on topsoil seed bank germination.** Adviser: Igor Rodrigues de Assis. Co-Advisers: Raphael Bragança Alaves Fernandes and Eduardo Gusmão Pereira.

Iron ore reserves in the Quadrilátero Ferrífero region are generally associated with the presence of unique ecosystems known as Ferruginous Rocky Fields (CRF), which are constantly threatened and impacted by mining activities. The recovery of CRF after the impacts caused by mining activities is a significant challenge due to the specific characteristics of this ecosystem. Environmental impact is inherent in mining, leading to abrupt changes in the landscape and the generation of environmental liabilities such as waste piles. Soil bioengineering is a widely employed technique for the restoration of areas degraded by mining activities. Topsoil transposition, the application of bio-mats, and more recently, the use of projected mats, are examples of commonly used techniques. Topsoil transposition is a highly advantageous technique because this material serves as a source of viable seed banks and contains chemical, physical, and biological properties that can enhance re-vegetation outcomes. Each of these mentioned techniques is typically used individually, but their combined use with topsoil can be an alternative to enhance re-vegetation results, especially on steep slopes such as waste pile slopes, thus preventing erosion. However, little is known about the influence of these combinations on the properties of waste pile substrates, vegetation establishment, topsoil properties, and seed bank germination. Consequently, this study was conducted with the aim of assessing the influence of different soil bioengineering techniques, both in combination and individually, on the physical, chemical, and biological properties of waste piles and the germination capacity of the topsoil seed banks in ferruginous fields. For this study, two experiments were conducted. One experiment was set up on a waste pile to evaluate the influence of different soil bioengineering techniques, both in combination and individually, on the chemical, physical, and biological properties of the waste pile substrate, vegetation cover establishment, and erosion of waste piles. The experiment followed a completely randomized design with three replicates. The treatments included: Hydroseeding (H); Hydroseeding + bio-mat (B); Hydroseeding + projected mat (MP); Hydroseeding + topsoil (T); Topsoil + hydroseeding (T+H). After ten months of experiment setup, vegetation cover was evaluated, and chemical, physical, and biological analyses of the substrate were performed. Differences in

vegetation cover and substrate characteristics were found among combinations of soil bioengineering techniques. However, treatments did not differ significantly in terms of sediment loss due to erosion. The treatment with bio-mat stood out positively among the other treatments. A second experiment was conducted in a greenhouse to assess the influence of projected mats under controlled humidity on the germination of the seed bank of a CRF topsoil. The experiment followed a randomized block design in a 2 x 4 factorial arrangement, with four replicates. The first factor consisted of the presence and absence of a projected mat on the topsoil, and the second factor included four different humidity levels, approximately equivalent to 60%, 70%, 80%, and 90% of the field capacity, monitored daily by gravimetry to replenish lost water over 180 days. Plant emergence (quantification and identification), germination using the Emergence Velocity Index (IVE), and species diversity assessed by the Shannon-Weaver index (H'), Pielou's evenness index (J), and Simpson's index (1-D) were evaluated. At the end of the six-month period, chemical and physical analyses of the topsoil were conducted. After the experimental period, a total of 214 individuals were counted in all experimental units, with twelve species identified in the topsoil seed bank. Low species diversity was observed, and the projected mat negatively influenced seed germination in the topsoil. Humidity levels did not significantly affect the number of individuals, but they did influence nutrient availability, emphasizing the importance of humidity control.

**Keywords:** Degraded area restoration. Soil bioengineering. Seed bank. Ferruginous rocky field. Mining.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	11
REFERÊNCIAS .....	14
INFLUÊNCIA DA COBERTURA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS DE PILHAS DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO DE FERRO.....	16
1. INTRODUÇÃO .....	20
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
3. RESULTADOS.....	25
4. DISCUSSÃO.....	34
5. CONCLUSÕES.....	38
6. REFERÊNCIAS .....	40
INFLUÊNCIA DA MANTA PROJETADA SOBRE A GERMINAÇÃO DO BANCO DE SEMENTES DE UM <i>TOPSOIL</i> DE CAMPO RUPESTRE FERRUGINOSO .....	44
1. INTRODUÇÃO .....	48
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	49
3. RESULTADOS.....	54
4. DISCUSSÃO.....	62
5. CONCLUSÕES.....	64
6. REFERÊNCIAS .....	65
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	68
ANEXO .....	69

## INTRODUÇÃO GERAL

A mineração faz parte da história do Brasil. A exploração dos recursos minerais se tornou, a partir do século XVII, a principal atividade no país, contribuindo para a interiorização da ocupação do território brasileiro. A mineração está entre as principais atividades econômicas do país impactando diretamente em seu desenvolvimento econômico, social e o posicionando no ranking dos maiores produtores de minério do mundo (ARAUJO; FERNANDES, 2016).

O setor mineral exerce significativa influência no PIB brasileiro, no qual segundo o Anuário Mineral Brasileiro de 2022 o setor faturou 250 bilhões de reais e gerou mais de 204 mil empregos diretos (contribuição de 5 % no PIB). A principal substância produzida é o minério de ferro com participação de 61,4 % no faturamento. Os principais estados contribuintes são Minas Gerais, Pará, Bahia, Goiás, São Paulo e Mato Grosso. Especificamente em Minas Gerais a região do Quadrilátero Ferrífero se destaca como produtora de minério de ferro desde o período colonial (CAVALCANTI et al., 2021).

Reservas minerais de ferro dessa região geralmente estão associadas a presença de ecossistemas singulares, os campos rupestres ferruginosos, que são constantemente ameaçados e impactados pela mineração (JACOBI et al., 2007a; MESSIAS et al., 2012). Os campos rupestres são ambientes caracterizados pela presença de vegetação herbácea, adaptadas as condições de solo raso de baixa fertilidade e ao déficit hídrico. Essas características adaptativas o atribuem um elevado grau de endemismo sendo considerado um ambiente de “*hot spot*” de biodiversidade (JACOBI; CARMO; VINCENT, 2008; REZENDE et al., 2021; SCHAEFER et al., 2016).

A mineração gera desenvolvimento econômico e social, mas também impactos ambientais, como mudanças bruscas na paisagem com a supressão da vegetação e remoção do solo superficial. Da operação inicial até beneficiamento do minério, passivos ambientais são gerados como as barragens de contenção de rejeitos, as pilhas de estéril e mais atualmente a pilhas de rejeitos filtrados (RAMOS et al., 2022). Ambientes degradados pela exploração mineral devem ser recuperados seguindo um plano, especificando as técnicas a serem utilizadas na recuperação ambiental, sendo essa obrigatoriedade garantida na legislação brasileira (GASTAUER et al., 2019).

As pilhas de estéril são formadas a partir do material gerado no decapeamento da mina de lavra a céu aberto. Este material não é aproveitado por não possuir valor econômico e é depositado em pilhas (IBRAM, 2016). O estéril é caracterizado por ser um material heterogêneo e de baixa fertilidade natural, o que dificulta o estabelecimento da vegetação e torna um desafio

a recuperação dessas áreas. Para que a vegetação se estabeleça é necessário a adoção de técnicas de recuperação como por exemplo a bioengenharia de solos (SOLERA et al., 2018).

A bioengenharia de solos é uma técnica muito utilizada no processo de recuperação de áreas degradadas pela mineração, principalmente em áreas inclinadas como taludes. Esta técnica utiliza de materiais biologicamente ativos como plantas, associados com materiais inertes, como pedras, madeiras e palhadas, para estabilização dos solos (FARRAG; ABAYAZID, 2023). Entre as vantagens de se utilizar a bioengenharia de solos está a redução da erosão, pois as raízes das plantas contribuem para a agregação do solo; redução do impacto da água da chuva pela cobertura do solo, reduzindo o selamento superficial e favorecendo a infiltração da água; criação de habitat para microfauna por meio da vegetação e implantação de mantas, regulando a temperatura e umidade do solo. Como principal desvantagem está a implantação dependente das características ambientais da área fazendo com que cada projeto seja muito específico (PUNETHA; SAMANTA; SARKAR, 2019).

A implantação de biomantas, adubação verde via hidrossemeadura e uso de *topsoil*, são exemplos das técnicas de bioengenharia utilizadas, tendo como objetivos principais o rápido recobrimento da área, redução dos processos erosivos e incremento de matéria orgânica. A adubação verde atua na melhoria da qualidade química, física e biológica do solo, auxiliando também na manutenção da umidade e temperatura (FERREIRA et al., 2016). As biomantas são feitas de materiais biodegradáveis, eficientes na proteção do solo contra erosão devido a imediata cobertura (PUNETHA; SAMANTA; SARKAR, 2019).

Por sua vez, o *topsoil* é a camada superficial do solo, que guarda a história da área de onde foi removida, sendo importante fonte de matéria orgânica, microrganismos, banco de sementes e propágulos. Ainda, o *topsoil* contém propriedades químicas e biológicas que são de fundamental importância para o crescimento vegetal recuperando espécies nativas e favorecendo sua permanência no ambiente (REZENDE et al., 2021). O incremento de matéria orgânica no solo pela utilização do *topsoil* influi nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo contribuindo com a CTC, estabilização da matéria orgânica e a mais longo prazo na agregação e porosidade do solo (COTRUFO; LAVALLEE, 2022). A utilização do *topsoil* é uma alternativa bastante favorável a recuperação de ambientes de campos rupestres, possibilitando o resgate de espécies nativas desses ambientes por meio do seu banco de sementes e favorecendo a sucessão ecológica (ANDRADE AMARAL et al., 2016; REZENDE et al., 2021).

O *topsoil* é, portanto, um material de alto valor para a recuperação de áreas mineradas, sendo possível seu uso associado a outras técnicas de bioengenharia de solos para revegetação

de taludes de pilha de estéril. No entanto, pouco se sabe sobre a influência dessas associações nas propriedades do substrato de taludes de pilhas de estéril, no estabelecimento da vegetação, nas propriedades e no banco de sementes do *topsoil*. Assim, a presente Dissertação realizou uma abordagem de estudo dividida em dois capítulos intitulados: *i) Influência da cobertura nas propriedades físicas, químicas e biológicas de pilhas de disposição de estéril de mineração de ferro e ii) Influência da manta projetada na germinação do banco de sementes de um topsoil de campo rupestre ferruginoso*. No qual possui o objetivo geral de avaliar a influência das diferentes técnicas de bioengenharias de solos em associação ou não nas propriedades físicas, químicas e biológicas das pilhas de estéril e a capacidade de germinação do banco de sementes do *topsoil* dos campos ferruginosos.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE AMARAL, L. et al. Viability of using topsoil ferruginous yoke in the restoration of a waste dump. **Bosque (Valdivia)**, v. 37, n. 2, p. 379–387, 2016.
- ARAUJO, E. R.; FERNANDES, F. R. C. Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. Em: **Conflitos Ambientais na Indústria Mineira e Metalúrgica: o passado e o presente**. [s.l: s.n.]. p. 65–88.
- CAVALCANTI, J. A. D. et al. Geo-Mining Heritages of the Mariana Anticline Region, Southeast of Quadrilátero Ferrífero-MG, Brazil: Qualitative and Quantitative Assessment of Chico Rei and Passagem Mines. **Geoheritage**, v. 13, n. 4, p. 98, 16 dez. 2021.
- COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Academic Press Inc., 2022. v. 172p. 1–66.
- FARRAG, S.; ABAYAZID, Z. Different Approaches of Soil Stabilization: A Comprehensive Review. **SSRN Electronic Journal**, 2023.
- FERREIRA, E. DE M. et al. Recuperação de áreas degradadas, adubação verde e qualidade da água. **Revista Monografias Ambientais**, v. 7, n. 7, p. 1646–1656, 2016.
- GASTAUER, M. et al. Mine land rehabilitation in Brazil: Goals and techniques in the context of legal requirements. **Ambio**, v. 48, n. 1, p. 74–88, 11 jan. 2019.
- IBRAM, 2016. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília.
- JACOBI, C. M. et al. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, v. 16, n. 7, p. 2185–2200, 7 jun. 2007.
- JACOBI, C. M.; CARMO, F. F. DO; VINCENT, R. DE C. Estudo fitossociológico de uma comunidade vegetal sobre canga como subsídio para a reabilitação de áreas mineradas no quadrilátero ferrífero, MG. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 345–353, abr. 2008.
- MESSIAS, M. C. T. B. et al. Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 1, p. 230–242, mar. 2012.
- PUNETHA, P.; SAMANTA, M.; SARKAR, S. Bioengineering as an Effective and Ecofriendly Soil Slope Stabilization Method: A Review. Em: **Advances in Natural and Technological Hazards Research**. [s.l.] Springer, Cham, 2019. v. 50p. 201–224.
- RAMOS, S. J. et al. Changes in soil properties during iron mining and in rehabilitating minelands in the Eastern Amazon. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 4, p. 256, 7 abr. 2022.
- REZENDE, L. A. L. et al. Topsoil depth influences the recovery of rupestrian grasslands degraded by mining. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 8 dez. 2021.

SCHAEFER, C. E. et al. Soils Associated with Rupestrian Grasslands. Em: **Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 55–69.

SOLERA, M. L. et al. Modelos estruturais de bioengenharia de solos na revegetação de pilhas de estéril em mineração a céu aberto. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 47, p. 74–88, 2018.

## INFLUÊNCIA DA COBERTURA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS DE PILHAS DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO DE FERRO

### RESUMO

A atividade minerária é essencial para o desenvolvimento das atividades humanas, entretanto, o impacto ambiental é inerente a essa atividade e passivos ambientais como pilhas de estéril são gerados. Os materiais destas pilhas possuem características químicas, físicas e biológicas muito heterogêneas, com baixa fertilidade, de tal forma que o estabelecimento da vegetação não é espontâneo. A utilização de técnicas de bioengenharia de solos em associação pode potencializar o sucesso da revegetação dessas áreas. Este trabalho objetivou avaliar a influência de diferentes técnicas de bioengenharia de solos em associação ou não, nas propriedades químicas, físicas e biológicas do substrato de pilha de estéril, sobre o estabelecimento da cobertura vegetal e sobre a erosão das pilhas de estéril. Um experimento foi montado em pilha de estéril na Mina Capitão do Mato em Nova Lima (MG), utilizando-se uma única face do talude em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. As unidades amostrais consistiram em parcelas com dimensões aproximadas de 10 m x 20 m. Em todas as parcelas foram instaladas estruturas para captação e coleta de sedimentos provenientes da erosão. Os tratamentos consistiram em: Hidrossemeadura (H); Hidrossemeadura + biomanta (B); Hidrossemeadura + manta projetada (MP); Hidrossemeadura + *topsoil* (T); *Topsoil* + hidrossemeadura (T+H). Amostras compostas do substrato e da vegetação foram coletadas em cada tratamento dez meses após a montagem do experimento. As coletas do substrato foram realizadas em duas profundidades, 0-2,5 cm e 2,5-10 cm e foram submetidas as análises químicas, físicas e biológicas. A cobertura vegetal foi avaliada por meio da quantificação da área coberta por meio de imagens ortorretificadas obtidas por drone e pela quantificação da produção de biomassa. Os sedimentos também foram coletados neste mesmo período e este material foi quantificado e submetido a análises química e física. Os dados obtidos foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett para testar a normalidade e homocedasticidade, respectivamente. Atendidas as pressuposições da estatística paramétrica na sequência foram realizados a análise de variância (ANOVA) considerando 5 % de significância. Posteriormente, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,1$ ). As características de baixa fertilidade, reduzida atividade microbiana, baixo pH, reduzido teor de matéria orgânica comum dos ambientes de atividade minerária permaneceram mesmo após

aplicação dos tratamentos com elevadas doses de adubação, entretanto foram identificadas diferenças entre os tratamentos utilizados. As coberturas com *topsoil* apresentaram maior teor de argila, COT e CTC<sub>pH7,0</sub>. A cobertura hidrossemeadura + biomanta apresentou maiores teores disponíveis de fósforo, maior atividade microbiana e maior porcentagem de cobertura vegetal. A produção de biomassa não se diferiu entre os tratamentos. Os elementos potencialmente tóxicos analisados apresentaram teores semi-totais normais para a região do Quadrilátero Ferrífero. A cobertura hidrossemeadura + manta projetada apresentou o menor teor semi-total de arsênio. A massa de sedimentos perdidos por erosão hídrica não se diferiu entre os tratamentos, mas apresentou diferenças quanto a granulometria do material. A cobertura hidrossemeadura + biomanta se destacou entre as coberturas utilizadas apresentando melhores resultados quanto a disponibilidade de fósforo, maior cobertura vegetal e atividade microbiológica. A hidrossemeadura + manta projetada não apresentou resultados significativamente melhores quando comparadas as coberturas com biomanta e *topsoil*, mesmo contribuindo com maior quantidade de nutrientes. A hidrossemeadura, cobertura que não foi associada a outra técnica de bioengenharia, apresentou características químicas, físicas e biológicas do substrato menos favoráveis a revegetação, evidenciando o potencial da utilização das técnicas de bioengenharia em associação para a revegetação de taludes de pilhas de estéril.

**Palavras-chave:** Recuperação de áreas degradadas. Bioengenharia de solos. *Topsoil*. Mineração.

## ABSTRACT

Mining activity is essential for the development of human activities; however, environmental impact is inherent to this activity, and environmental liabilities such as waste rock piles are generated. The materials in these piles have highly heterogeneous chemical, physical, and biological characteristics, with low fertility, such that spontaneous vegetation establishment does not occur. The use of soil bioengineering techniques in combination can enhance the success of re-vegetation in these areas. This study aimed to evaluate the influence of different soil bioengineering techniques, in combination or not, on the chemical, physical, and biological properties of waste rock pile substrates, regarding vegetation cover establishment and erosion on the waste rock piles. An experiment was set up on a waste rock pile at the Capitão do Mato Mine in Nova Lima (MG), using a single face of the slope in a completely randomized design with three replications. Sample units consisted of plots with approximate dimensions of 10 m x 20 m. Structures for sediment collection due to erosion were installed in all plots. The treatments consisted of: Hydroseeding (H); Hydroseeding + biomat (B); Hydroseeding + engineered mat (MP); Hydroseeding + topsoil (T); Topsoil + hydroseeding (T+H). Composite samples of the substrate and vegetation were collected for each treatment ten months after the experiment setup. Substrate samples were collected at two depths, 0-2.5 cm and 2.5-10 cm, and underwent chemical, physical, and biological analyses. Vegetation cover was assessed by quantifying the covered area through orthorectified images obtained by drones and by quantifying biomass production. Sediments were also collected during this period, and this material was quantified and subjected to chemical and physical analyses. The obtained data were subjected to Shapiro-Wilk and Bartlett tests to assess normality and homoscedasticity, respectively. Assuming the assumptions of parametric statistics were met, an analysis of variance (ANOVA) was conducted at a 5% significance level. Subsequently, treatment means were compared using Tukey's test ( $p < 0.1$ ). Despite applying high doses of fertilization, the characteristics of low fertility, reduced microbial activity, low pH, and low organic matter content common in mining activity environments persisted; however, differences between the used treatments were identified. Topsoil coverages exhibited higher clay content, TOC, and  $CEC_{pH7.0}$ . The hydroseeding + biomat coverage presented higher available phosphorus levels, increased microbial activity, and a higher percentage of vegetation cover. Biomass production did not differ between treatments. The potentially toxic elements analyzed had normal semi-total concentrations for the Quadrilátero Ferrífero region. The hydroseeding + engineered mat coverage had the lowest semi-total arsenic content. The amount of sediment lost due to water

erosion did not differ between treatments but showed differences in material granulometry. The hydroseeding + biomat coverage stood out among the used coverages, presenting better results in terms of phosphorus availability, higher vegetation cover, and microbial activity. The hydroseeding + engineered mat coverage did not significantly outperform the biomat and topsoil coverages, even though it contributed with a higher nutrient quantity. Hydroseeding, a coverage not associated with another soil bioengineering technique, exhibited less favorable chemical, physical, and biological substrate characteristics for re-vegetation, highlighting the potential of using combined soil bioengineering techniques for revegetation of waste rock pile slopes.

**Keywords:** Restoration of degraded areas. Soil bioengineering. Topsoil. Mining.

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda por recursos minerais é crescente em todo o mundo e a exploração mineral se tornou essencial para o desenvolvimento das atividades humanas, trazendo como consequência o aumento das áreas mineradas. Estima-se que a área utilizada pela mineração em todo o mundo é de aproximadamente 101.583 km<sup>2</sup> (MAUS et al., 2022). No Brasil, a atividade minerária foi instalada quando ainda era colônia de Portugal, fazendo parte da história do país. Atualmente é uma importante atividade econômica e contribui com cerca de 5 % no Produto Interno Bruto. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, em 2022 o faturamento do setor mineral foi de R\$250 bilhões no qual, 61,4 % desse faturamento foi proveniente da extração de minério de ferro.

Apesar do desenvolvimento econômico e social e dos diversos benefícios que a mineração ocasiona, o impacto ambiental é inerente a essa atividade. Com a retirada da vegetação e do solo, todo o ecossistema local é afetado, degradando áreas com grande intensidade e produzindo passivos ambientais como, por exemplo, barragens de contenção de rejeito, pilhas de estéril e mais recentemente pilhas de rejeitos filtrados (RAMOS et al., 2022). O estéril consiste no material com pouco ou nenhum valor econômico retirado no processo de decapeamento da mina de lavra a céu aberto (IBRAM, 2016). Os materiais destas pilhas possuem características químicas e físicas muito heterogêneas, com baixa fertilidade de tal forma que o estabelecimento da vegetação não é espontâneo tornando um desafio a recuperação dessas áreas (SOLEIRA, 2018). Por este motivo, há uma demanda de estudos e desenvolvimento de técnicas para a recuperação dessas áreas.

A bioengenharia de solos é uma técnica difundida para a recuperação ambiental de áreas mineradas. Esta técnica utiliza de materiais biologicamente ativos como plantas, associado com materiais inertes, como pedras, madeiras e palhadas, para estabilização dos solos (FARRAG; ABAYAZID, 2023; PUNETHA; SAMANTA; SARKAR, 2019). As principais técnicas usadas tendo como objetivos principais o rápido recobrimento da área e a redução dos processos erosivos são a implantação de biomantas, adubação verde realizada por meio da hidrossemeadura, o uso de *topsoil* e mais recentemente a manta projetada.

O *topsoil* guarda a história da área de onde foi removido, é fonte de matéria orgânica, microrganismos, sementes e propágulos. Ao ser utilizado no processo de recuperação, o *topsoil* poderá favorecer a sucessão natural, recuperando espécies nativas e favorecendo sua permanência no ambiente (ANDRADE AMARAL et al., 2016; REZENDE et al., 2021). A manta projetada é uma técnica de cobertura do solo que consiste na utilização da

hidrossemeadura acrescida de um *mulch* de fibras vegetais enriquecidos com fibra de madeira, que é projetado por meio de bomba hidráulica nos taludes. Ao ser projetada, essa suspensão forma uma espécie de tecido que contribui com a cobertura do solo promovendo proteção contra processos erosivos até que a vegetação se estabeleça (CRUZ et al., 2017).

O rápido estabelecimento da vegetação além da imediata cobertura do estéril é fundamental para estabilização do talude e maior sustentabilidade do processo de recuperação. Portanto, diferentes materiais de cobertura podem acelerar ou retardar o estabelecimento da vegetação, podendo comprometer a curto prazo a estabilização e a recuperação das pilhas de estéril. A utilização das técnicas de bioengenharia de solos em associação pode potencializar o sucesso da revegetação de pilhas de estéril. Assim, o objetivo deste trabalho foi comparar diferentes técnicas de bioengenharia, associadas ou não, quanto os seus efeitos sobre as propriedades químicas, físicas e biológicas do substrato, sobre a erosão e sobre o estabelecimento da cobertura vegetal.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Um experimento foi instalado sobre pilha de disposição de estéril de mineração de ferro na mina de Capitão do Mato, pertencente à empresa VALE S.A. localizada no município de Nova Lima, Minas Gerais (coordenadas SIRGAS 2000 20° 6' 53,03" S, 43°55' 58,16" W, altitude de 1.360 m). A região está inserida na transição dos biomas Cerrado e Mata Atlântica, em fitofisionomia denominada Campo Rupestre Ferruginoso.

O clima da região é do tipo subtropical úmido (Cwa), com verões chuvosos e úmidos e invernos secos (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual varia de 1.300 a 2.100 mm e a temperatura média de 20 °C (AZEVEDO et al., 2011). Na região ocorrem com maior frequência os Cambissolos e Neossolos Litólicos, solos pouco desenvolvidos onde o material de origem exerce grande influência nas suas características, e com menor frequência ocorrem os Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos distróficos (FILHO, 2008).

O foco do experimento foi o uso de diferentes técnicas para a estabilização de talude de pilhas de estéril de mineração de ferro, de forma a controlar processos erosivos e aumentar o sucesso da revegetação. Os tratamentos consistiram em diferentes técnicas de bioengenharia associadas ou não, compondo cinco tratamentos: Hidrossemeadura (H); Hidrossemeadura + biomanta (B); Hidrossemeadura + manta projetada (MP); Hidrossemeadura + *topsoil* (T); *Topsoil* + hidrossemeadura (T+H). O experimento foi instalado considerando uma única face

do talude, voltado para sul, em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. As unidades amostrais consistiram em parcelas com dimensões aproximadas de 10 m x 20 m. Em todas as parcelas foram instaladas estruturas para captação e coleta de sedimentos. Estas estruturas foram localizadas na parte inferior das parcelas, confeccionadas com chapas de aço galvanizado que conduziam os sedimentos para caixas d'água de 250 L enterradas no pé do talude.

Na hidrossemeadura foi utilizado um mix de sementes composto por espécies de gramíneas e leguminosas com o objetivo de promover o rápido recobrimento da área, reduzir os processos erosivos e contribuir com a melhoria da qualidade do substrato. As espécies utilizadas foram: *Pennisetum glaucum* L. (milheto), *Lolium multiflorum* (azevém), *Brassica rapa* (nabo forrageiro), *Cajanus caja* (feijão guandu), *Crotalaria juncea*, *Crotalaria ochroleuca*, *Stylosanthes* sp., *Avena strigosa* (aveia forrageira) e *Helianthus annuus* (girassol). A hidrossemeadura foi realizada em associação com os insumos descritos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Insumos e quantidades aplicadas na hidrossemeadura em cada tratamento.

Insumo	Quantidade por cobertura (g m <sup>-2</sup> )				
	H	B	MP	T	T+H
Formulado NPK 06-30-06	50	50	150	50	50
FTE BR 12	7,5	7,5	22,5	7,5	7,5
Agrosilício	50	50	150	50	50
Mix de sementes	60	60	180	60	60
Condicionador orgânico	27	27	81	27	27
Agente adesivo	62,5	62,5	187,5	62,5	62,5

FTE BR12: fertilizante composto pelos nutrientes Cu (0,8 %), Mn (2 %), Zn (9 %) e S (1 %); Agrosilício: corretivo da acidez do solo composto por CaO (36 %) e MgO (9 %).

A aplicação do *topsoil* foi realizada adicionando 15 m<sup>3</sup> por parcela, de forma a ter uma camada de aproximadamente 5 cm de altura. O material foi disposto inicialmente na parte superior e distribuído em toda a parcela manualmente. A aplicação da manta projetada foi combinada com a hidrossemeadura. Para este tratamento, aos insumos descritos na Tabela 1 foram adicionados 102 g m<sup>-2</sup> de *mulch* de madeira (Verdetec ®). Na operação de formação da manta projetada foram utilizadas três aplicações da mistura, totalizando a dose indicada na Tabela 1. As aplicações foram realizadas com caminhão de hidrossemeadura, com tanques de 7.000 L de capacidade e destinado à cobertura de uma área de 2.000 m<sup>2</sup>. A biomanta utilizada foi a de capim (ALMAX 400 RU). A primeira aplicação da hidrossemeadura ocorreu em julho de 2021 dando sequência a montagem do experimento com aplicação da biomanta, manta projetada e *topsoil* nas parcelas pertinentes a cada tratamento.

Antes da instalação do experimento uma amostra composta do estéril e do *topsoil* formada por cinco amostras simples foram coletadas aleatoriamente na profundidade de 0-20 cm (Tabela 2).

**Tabela 2.** Caracterização física e química das amostras de estéril e *topsoil*

Atributos analisados	Estéril	<i>Topsoil</i>
Areia Fina (kg kg <sup>-1</sup> )	0,13	0,13
Areia Grossa (kg kg <sup>-1</sup> )	0,11	0,04
Silte (kg kg <sup>-1</sup> )	0,54	0,21
Argila (kg kg <sup>-1</sup> )	0,21	0,63
ADA (kg kg <sup>-1</sup> )	0,01	0,11
EU (kg kg <sup>-1</sup> )	0,24	0,31
Classificação Textural	Franco-Siltosa	Muito Argilosa
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,71	0,42
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,07	0,14
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,20
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,00	6,30
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,84	0,66
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,84	0,86
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,84	6,96
P (mg dm <sup>-3</sup> )	8,30	0,00
K (mg dm <sup>-3</sup> )	23,00	39,00
S (mg dm <sup>-3</sup> )	58,70	0,60
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,42	0,55
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	19,40	12,40
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	34,70	69,20
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,61	0,57
pH <sub>H2O</sub>	5,80	4,88
V (%)	45,70	9,50
m (%)	0,00	23,30
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	0,39	3,39
P-rem (mg L <sup>-1</sup> )	9,10	9,00

EU: equivalente de umidade; Ca<sup>2+</sup>: Cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup>: Magnésio trocável; Al<sup>3+</sup>: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de base; t: CTC efetiva; T: CTC a pH 7; P: Fósforo; K: Potássio; S: Enxofre; Cu: Cobre; Mn: Manganês; Fe: Ferro; Zn: Zinco; V: saturação por base, m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; P-rem: Fósforo remanescente.

Amostras de substrato foram coletadas aos 10 meses após a montagem do experimento nas profundidades de 0-2,5 cm e 2,5-10 cm, para a realização de análises químicas, físicas e biológicas. As análises químicas consistiram na determinação dos teores disponíveis de P, K, S, Fe, Mn e Zn; teores trocáveis de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, H+Al e determinação do pH em água segundo EMBRAPA (2017). Os teores semi-totais dos elementos As, Mn, Ni, Pb, Fe, Al, Zn,

Cu, Co e Cr foram determinados segundo a metodologia EPA 3051A (USEPA, 2007), com dosagem por espectrofotômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado – IPC-OES. O teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado por oxidação via úmida, conforme MEDONÇA e MATOS (2017). As análises físicas realizadas foram densidade de partícula (Dp), granulometria, argila dispersa em água (ADA) e equivalente de umidade, seguindo as metodologias descritas em EMBRAPA (2017). A eficiência de recuperação dos nutrientes P, K, S, Ca, Mg, Cu, Mn e Zn foi calculada por métodos balanceados descritos por Syers et al., (2008) (Equação 1).

$$ER (\%) = \frac{ne}{na} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

em que ER é a eficiência de recuperação do nutriente; ne é o nutriente exportado pela parte aérea da vegetação e na é a dose do nutriente aplicada.

Subamostras das amostras coletadas aos 10 meses de montagem do experimento foram conservadas sob refrigeração a aproximadamente 4 °C até o momento da realização das análises de carbono da biomassa microbiana (MEDONÇA e MATOS, 2017; TEDESCO et. al, 1995) e da respiração basal (RB), com posterior cálculo dos índices quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) e microbiano (qMic) (SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI, 2007). No intuito de entender melhor a dinâmica da matéria orgânica, foram quantificados os teores de carbono da matéria orgânica particulada (MOP) e carbono da matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992) e carbono lábil (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995).

Os sedimentos foram coletados no mesmo período de coleta do substrato, 10 meses após a montagem do experimento. Este material foi seco ao ar e pesado, após serem homogeneizados subamostras de aproximadamente 200 g foram retiradas e submetidas a análises de densidade de partículas, granulometria, teores de nutrientes disponíveis e COT.

A cobertura vegetal foi avaliada por meio da quantificação da área coberta e pela produção de biomassa. A avaliação da porcentagem da cobertura vegetal foi efetuada mediante uso de classificador de imagens RGB pelo método não supervisionado Iso Cluster utilizando o software ArcMap® 10.8 nos períodos de 10, 12 e 18 meses subsequentes a montagem do experimento. Estes períodos foram determinados levando em consideração a variação sazonal, sendo a primeira avaliação no final do período chuvoso, a segunda no meio do período seco e a terceira no final do período chuvoso. Para determinação da cobertura do solo a classificação foi realizada estabelecendo-se 4 classes de resposta espectral. As imagens RGB foram capturadas com drone DJI Phantom 4.

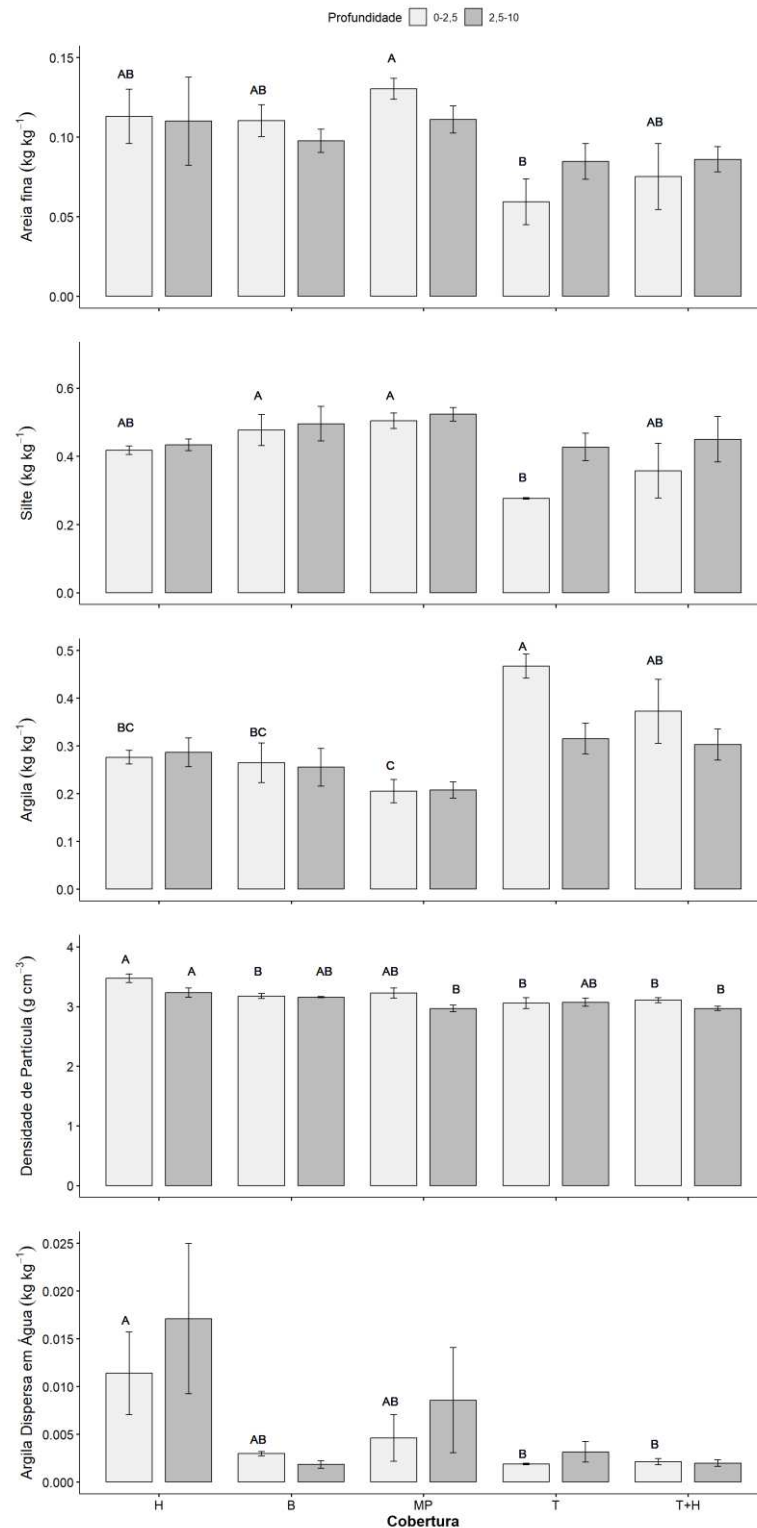
A produção de biomassa foi realizada pelo método direto de coleta realizadas nos períodos de 10 e 12 meses após a instalação do experimento. Para isto, amostras da parte aérea, sem distinção das espécies, foram coletadas em campo com o uso de um gabarito de 0,5 x 0,5 m, a partir do lançamento em cinco posições aleatórias em cada unidade experimental. As amostras do material vegetal foram reunidas em uma amostra composta por parcela, que foram secas em estufa de circulação forçada a 60 °C até obter peso constante e então pesadas e submetidas à digestão nitro perclórica na proporção 4:1 (v:v). Nos extratos foram determinados os teores de S, K, Mg, P, Ca, Zn, Cu, Mn e Fe por ICP OES.

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett para testar a normalidade e homocedasticidade, respectivamente. Atendidas as pressuposições da estatística paramétrica na sequência foram realizados a análise de variância (ANOVA) considerando 5 % de significância. Posteriormente, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,1$ ). Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no software R (R Core Team, 2022), utilizando o pacote ExpDes.pt (Ferreira et al., 2021).

### 3. RESULTADOS

A granulometria do estéril foi diferente entre as coberturas apenas na profundidade de 0 a 2,5 cm (Figura 1), sendo esta diferença majoritariamente inerente ao material depositado e sem relação com as coberturas implantadas, com exceção das parcelas que receberam *topsoil*. A cobertura hidrossemeadura + manta projetada apresentou maior média para areia fina e diferiu da cobertura hidrossemeadura + *topsoil*. As demais coberturas não diferiram quanto a granulometria do estéril. A cobertura hidrossemeadura + *topsoil* obteve maior média para proporção de argila ( $0,47 \text{ kg kg}^{-1}$ ) e se diferiu dos demais tratamentos.

O substrato com apenas hidrossemeadura apresentou densidade de partículas ( $D_p$ ) maior que dos demais tratamentos em ambas as profundidades (Figura 1). Os valores de  $D_p$  em todos os tratamentos foram superiores a  $3 \text{ g cm}^{-3}$ , acima do normalmente encontrado em solos ( $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ ), inclusive nas parcelas com *topsoil*. Diferenças foram encontradas entre os tratamentos para os teores de argila dispersa em água (ADA) na profundidade de 0-2,5 cm. O substrato que recebeu apenas a hidrossemeadura apresentou maior teor de ADA, enquanto os substratos sob *topsoil* apresentaram menor teor, não diferindo entre eles.

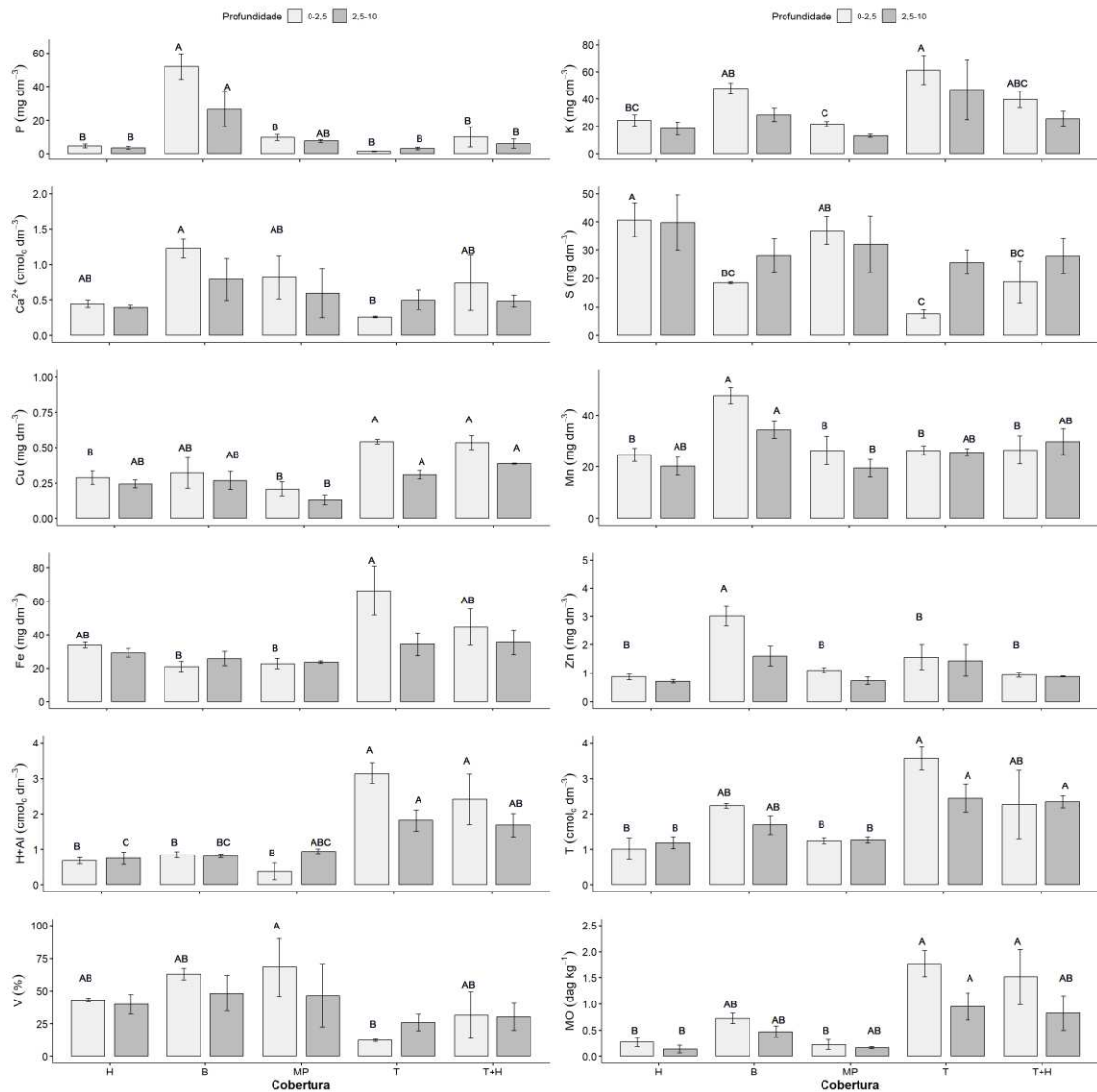


**Figura 1.** Areia fina (kg kg<sup>-1</sup>), Silte (kg kg<sup>-1</sup>), Argila (kg kg<sup>-1</sup>), Densidade de Partícula (g cm<sup>-3</sup>) e Argila Dispersa em Água (kg kg<sup>-1</sup>) nas profundidades de 0-2,5 cm e 2,5-10 cm de substrato de talude de pilha de estéril com a aplicação de Hidrossemeadura (H), Hidrossemeadura + Biomanta (B), Hidrossemeadura + Manta Projetada (MP), Hidrossemeadura + *Topsoil* (T) e *Topsoil* + Hidrossemeadura (T+H). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,1$ ). Médias que não apresentam letras não foram consideradas diferentes pelo teste estatístico. Barras verticais denotam erro padrão da média.

Dentre os nutrientes analisados, diferenças entre tratamentos foram encontradas para os teores de P, S, K, Ca, Cu, Mn, Fe e Zn (Figura 2). O teor de P disponível foi maior (97 %) na cobertura com hidrossemeadura + biomanta e não foram encontradas diferenças entre as demais coberturas na profundidade de 0-2,5 cm. As coberturas hidrossemeadura, hidrossemeadura + *topsoil* e *topsoil* + hidrossemeadura obtiveram teores de P disponível semelhantes na profundidade de 2,5-10 cm, e apenas a hidrossemeadura + biomanta apresentou maior teor disponível nesta camada.

Os teores disponíveis de K, S, Ca, Fe e Zn foram diferentes entre as coberturas apenas na camada de 0-2,5 cm (Figura 2). A cobertura hidrossemeadura + *topsoil* obteve maior teor de K (65 %), e os menores teores na hidrossemeadura + manta projetada. O teor de S disponível foi maior na hidrossemeadura (82 %) e os menores teores na hidrossemeadura + *topsoil*. A hidrossemeadura + biomanta apresentou maior teor de Ca disponível (80 %) e o hidrossemeadura + *topsoil* o menor teor não havendo diferenças entre as demais camadas. Os menores teores de Fe disponível ocorreram na hidrossemeadura + biomanta e os maiores na cobertura hidrossemeadura + *topsoil* (67 %). A maior disponibilidade de Zn foi encontrada na hidrossemeadura + biomanta, não havendo diferença entre as demais coberturas.

A disponibilidade de Cu e Mn diferiu entre as coberturas em ambas as profundidades avaliadas. Os teores disponíveis de Cu na camada de 0 a 2,5 cm foram maiores nas coberturas com *topsoil* (61 %), enquanto a disponibilidade de Mn foi menor nestas coberturas. Por outro lado, na camada de 2,5 a 10 cm, os maiores teores de Cu foram encontrados também nas coberturas com *topsoil*, mas para Mn os menores teores foram na cobertura hidrossemeadura + manta projetada.



**Figura 2.** P (mg dm<sup>-3</sup>), Ca<sup>2+</sup> (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), S (mg dm<sup>-3</sup>), Cu (mg dm<sup>-3</sup>), Mn (mg dm<sup>-3</sup>), Fe (mg dm<sup>-3</sup>), Zn (mg dm<sup>-3</sup>), H+Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), T (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), V (%), MO (dag kg<sup>-1</sup>) nas profundidade de 0-2,5 cm e 2,5-10 cm de substrato de talude de pilha de estéril com a aplicação de Hidrossemeadura (H), Hidrossemeadura + Biomanta (B), Hidrossemeadura + Manta Projetada (MP), Hidrossemeadura + *Topsoil* (T) e *Topsoil* + Hidrossemeadura (T+H). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey (p < 0,1). Médias que não apresentam letras não foram consideradas diferentes pelo teste estatístico. Barras verticais denotam erro padrão da média.

Os teores de acidez potencial (H+Al) foram semelhantes nas coberturas com *topsoil* e superiores aos encontrados nas demais coberturas, que não se diferenciaram entre si na camada de 0-2,5 cm (Figura 2). Comportamento semelhante ocorreu na camada de 2,5-10 cm, mas com teores menores para as coberturas com *topsoil* comparativamente a camada superficial, não sendo encontradas diferenças entre as camadas para as demais coberturas. A CTC pH<sub>7,0</sub> do estéril foi maior na cobertura hidrossemeadura + *topsoil*, em ambas as camadas. No entanto todas as amostras sob as diferentes coberturas apresentaram CTC pH<sub>7,0</sub> inferior a 4,00 cmol<sub>c</sub>

dm<sup>-3</sup>, mostrando a baixa reatividade e consequentemente a baixa capacidade de reter nutrientes destes substratos. A saturação por bases do estéril foi maior na cobertura hidrossemeadura + manta projetada e menor na cobertura hidrossemeadura + *topsoil* na camada superficial do solo. A maior V com manta projetada pode ser explicada pelo fato desta cobertura ter apresentado menor CTC pH<sub>7,0</sub>. Valores semelhantes foram encontradas em todos os tratamentos na camada de 2,5-10 cm. A matéria orgânica apresentou diferenças em ambas as profundidades avaliadas (Figura 2). Na profundidade de 0-2,5 cm as coberturas hidrossemeadura + *topsoil* apresentaram teores médios semelhantes e foram maiores que nas demais coberturas. Na profundidade de 2,5-10 cm a hidrossemeadura apresentou menor teor, e a cobertura hidrossemeadura + *topsoil* apresentou o maior teor de matéria orgânica. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças nesta camada.

A eficiência de recuperação dos nutrientes P, K, S, Ca, Mg, Cu, Mn e Zn estão apresentados na Tabela 3. A eficiência de recuperação de P e Mn não se diferiram entre os tratamentos. A cobertura hidrossemeadura + manta projetada apresentou as menores eficiências de recuperação dos nutrientes avaliados.

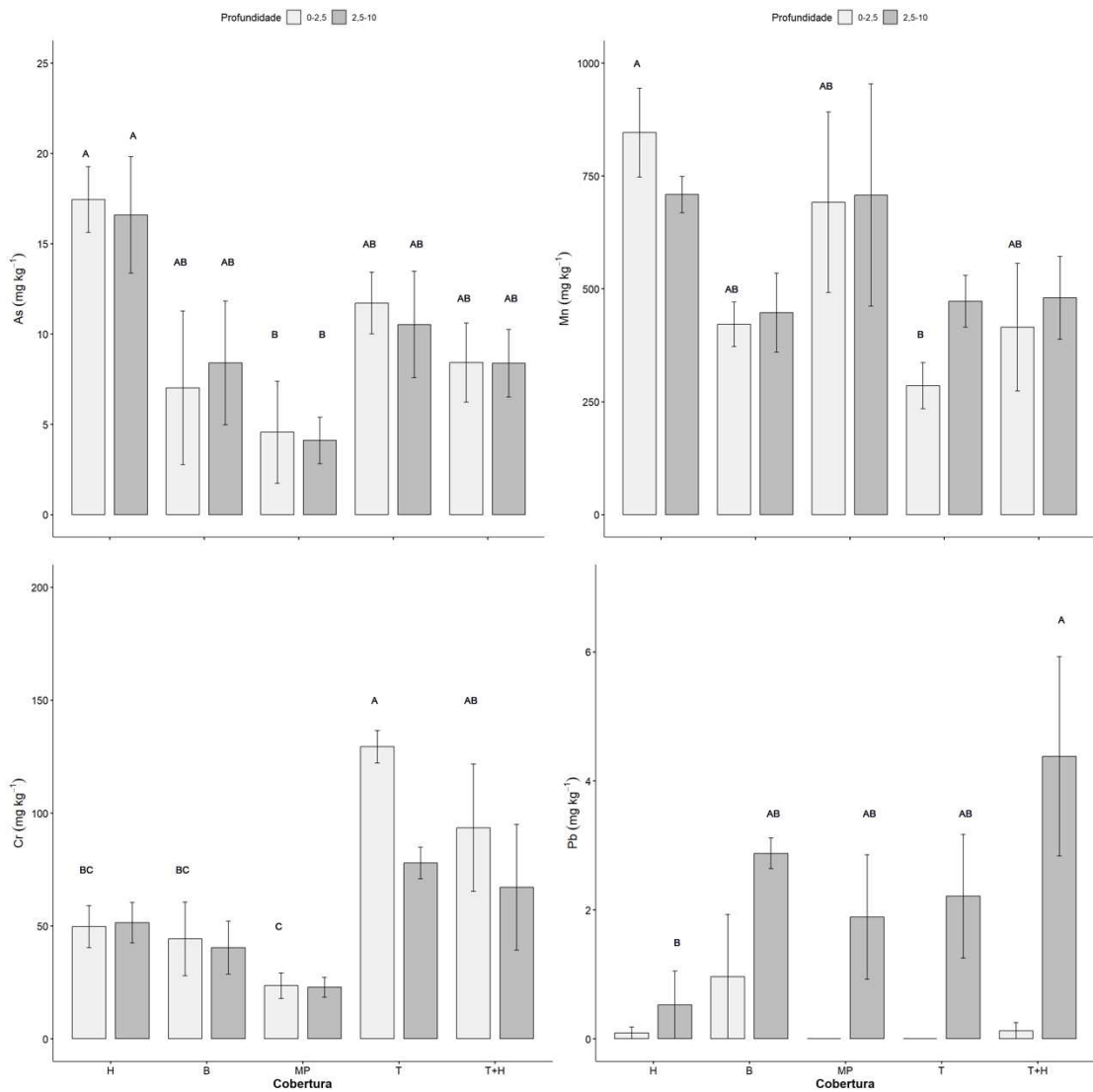
**Tabela 3.** Eficiência de recuperação (%) de nutrientes pela vegetação em substrato de talude de pilha de estéril com a aplicação de Hidrossemeadura (H), Hidrossemeadura + Biomanta (B), Hidrossemeadura + Manta Projetada (MP), Hidrossemeadura + *Topsoil* (T) e *Topsoil* + Hidrossemeadura (T+H). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,1$ ).

Coberturas	Eficiência de Recuperação (%)							
	P	K	S	Ca	Mg	Cu	Mn	Zn
H	2,91a	71,52a	22,33ab	71,54a	11,97ab	1,18ab	15,49a	0,30ab
B	4,52a	61,15ab	24,10ab	12,16b	12,00ab	1,21ab	16,89a	0,47a
MP	0,60a	19,29b	5,57b	4,53b	0,95c	0,32b	10,64a	0,11b
T	2,47a	61,49ab	31,28a	64,57ab	17,86a	1,30a	27,36a	0,44a
T+H	1,08a	30,02ab	11,73ab	27,67ab	4,93bc	0,63ab	15,46a	0,20ab

P: Fósforo; K: Potássio; S: Enxofre; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Cu: Cobre; Mn: Manganês; Zn: Zinco.

Dentre os elementos potencialmente tóxicos apenas o teor semi-total de As foi diferente entre as coberturas em ambas as profundidades (Figura 3). O maior teor de arsênio semi-total foi encontrado na hidrossemeadura (74 %), e o menor teor na hidrossemeadura + manta projetada. Apenas nesta última cobertura os teores de arsênio são inferiores ao valor de referência de qualidade (VRQ), 8 mg kg<sup>-1</sup>, para Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2010). Diferenças foram encontrados para os teores de Cr e Mn entre as coberturas apenas na camada de 0-2,5 cm, para Pb diferenças ocorreram na profundidade de 2,5-10 cm. Maior teor de Pb foi na cobertura *topsoil* + hidrossemeadura (88 %) e o menor teor na hidrossemeadura, demais

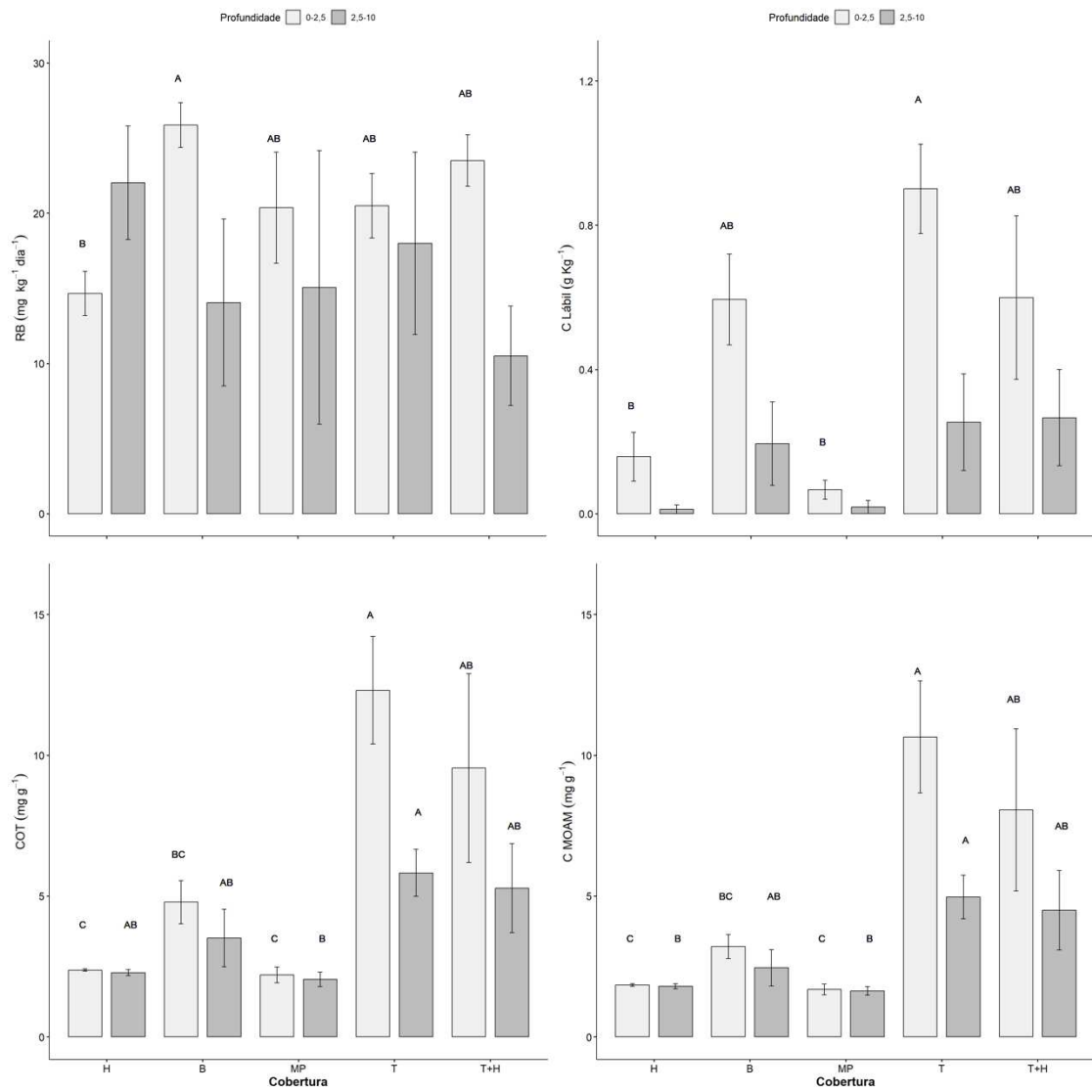
coberturas não diferiram. O maior teor de Cr foi no tratamento hidrossemeadura + *topsoil* (82 %) e o menor teor na hidrossemeadura + manta projetada na camada superficial. O teor de Mn foi maior na hidrossemeadura (66 %) e menor hidrossemeadura + *topsoil*, não diferindo entre as demais coberturas. De modo geral, os teores dos elementos potencialmente tóxicos encontram-se abaixo dos Valores de Investigação (VI) para atividade industrial estabelecidos pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº02 (MINAS GERAIS, 2010).



**Figura 3.** As ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), Mn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), Cr ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) e Pb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) nas profundidades de 0-2,5 cm e 2,5-10 cm de substrato de talude de pilha de estéril com a aplicação de Hidrossemeadura (H), Hidrossemeadura + Biomanta (B), Hidrossemeadura + Manta Projetada (MP), Hidrossemeadura + *Topsoil* (T) e *Topsoil* + Hidrossemeadura (T+H). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,1$ ). Médias que não apresentam letras não foram consideradas diferentes pelo teste estatístico. Barras verticais denotam erro padrão da média.

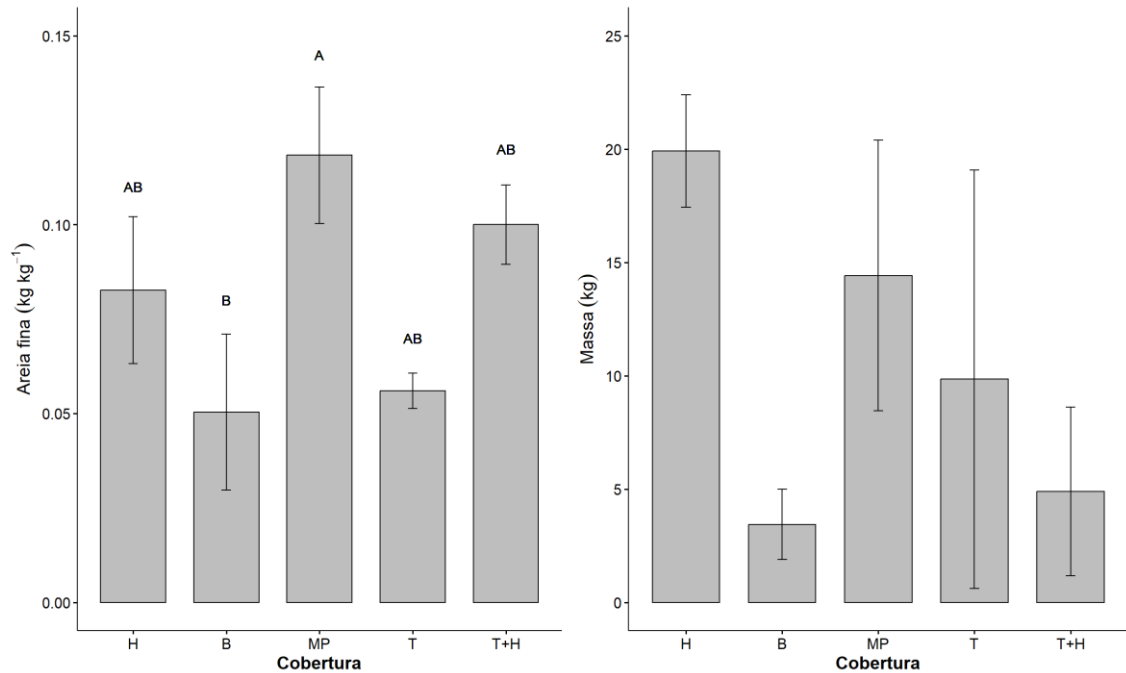
A respiração basal (RB), carbono lábil, carbono orgânico total (COT) e carbono proveniente da matéria orgânica associada aos minerais (C MOAM) apresentaram diferenças, o carbono proveniente da matéria orgânica particulada (C MOP), o quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e o quociente microbiano ( $qMic$ ) não diferiram entre as coberturas utilizadas (Figura 4). A cobertura hidrossemeadura + biomanta obteve a maior média de RB (43 %) e a menor média foi observada para a hidrossemeadura. As demais coberturas não diferiram quanto a RB na profundidade de 0-2,5 cm.

Os maiores teores de COT foram encontrados na cobertura hidrossemeadura + *topsoil* (82 %) e os menores na hidrossemeadura + manta projetada e hidrossemeadura, demais coberturas não apresentaram diferença em ambas as profundidades avaliadas (Figura 4). A cobertura hidrossemeadura + *topsoil* apresentou os maiores teores de carbono proveniente da MOAM (67 %), se diferenciando da hidrossemeadura e hidrossemeadura + manta projetada que obtiveram os menores teores na profundidade de 0-2,5 cm. Na a profundidade de 2,5-10 cm a cobertura hidrossemeadura + *topsoil* apresentou o maior teor de C MOAM (64 %) e os menores teores ocorreram na hidrossemeadura e hidrossemeadura + manta projetada. Os teores de carbono lábil na hidrossemeadura e hidrossemeadura + manta projetada foram semelhantes e menores que aqueles encontrados na hidrossemeadura + *topsoil*; as demais coberturas não diferiram na profundidade de 0-2,5 cm (Figura 4).



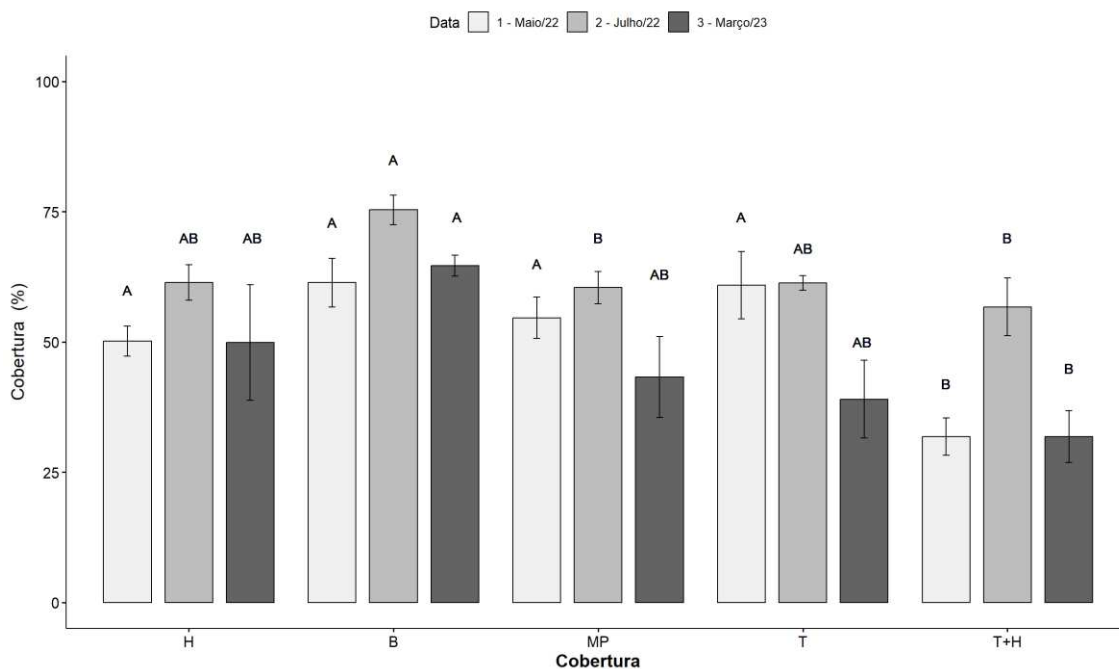
**Figura 4.** RB (mg kg<sup>-1</sup>dia<sup>-1</sup>), COT (mg g<sup>-1</sup>), C MOAM (mg g<sup>-1</sup>) nas profundidades de 0-2,5 cm e 2,5-10 cm de substrato de talude de pilha de estéril com a aplicação de Hidrossemeadura (H), Hidrossemeadura + Biomanta (B), Hidrossemeadura + Manta Projetada (MP), Hidrossemeadura + *Topsoil* (T) e *Topsoil* + Hidrossemeadura (T+H). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,1$ ). Médias que não apresentam letras não foram consideradas diferentes pelo teste estatístico. Barras verticais denotam erro padrão da média.

A massa dos sedimentos provenientes dos processos erosivos não se diferiu entre as coberturas. Este material se diferenciou apenas quanto ao teor de areia fina entre as coberturas utilizadas (Figura 5). A cobertura hidrossemeadura + manta projetada expressou maior teor de areia fina e a hidrossemeadura + biomanta o menor teor, as demais coberturas não diferiram.



**Figura 5.** Areia fina ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e Massa ( $\text{kg}$ ) nas profundidades de 0-2,5 cm e 2,5-10 cm de substrato de talude de pilha de estéril com a aplicação de Hidrossemeadura (H), Hidrossemeadura + Biomanta (B), Hidrossemeadura + Manta Projetada (MP), Hidrossemeadura + *Topsoil* (T) e *Topsoil* + Hidrossemeadura (T+H). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,1$ ). Médias que não apresentam letras não foram consideradas diferentes pelo teste estatístico. Barras verticais denotam erro padrão da média.

A massa de matéria seca da parte aérea das plantas não diferiu entre as coberturas, os resultados estão apresentados em anexo. A cobertura do substrato (%) pela vegetação apresentou diferenças nas cinco coberturas testadas, nos três períodos de avaliação realizados, sendo a primeira avaliação feita no final do período chuvoso, a segunda no meio do período seco e a terceira no final do período chuvoso (Figura 6). A precipitação média mensal nos meses avaliados foi de 53,40 mm no mês de maio, 0,20 mm em julho e 73,62 mm em março (CEMADEN, 2023). De maneira geral, a hidrossemeadura + biomanta apresentou maior cobertura com vegetação (65,60 %) e *topsoil* + hidrossemeadura a menor cobertura (36,04 %). As maiores variações entre os períodos chuvoso e seco ocorreram nos tratamentos com uso de *topsoil*. As maiores médias da porcentagem de cobertura do substrato ocorreram em julho de 2022 onde as coberturas que apresentaram diferença significativa entre si foram hidrossemeadura + biomanta, hidrossemeadura + manta projetada e *topsoil* + hidrossemeadura.



**Figura 6.** Porcentagem de cobertura (%) pela vegetação estimado por meio do uso de imagens ortorretificadas obtidas por drone em substrato de talude de pilha de estéril com a aplicação de Hidrossemeadura (H), Hidrossemeadura + Biomanta (B), Hidrossemeadura + Manta Projetada (MP), Hidrossemeadura + *Topsoil* (T) e *Topsoil* + Hidrossemeadura (T+H). Médias seguidas de mesma letra para Maio/22, Julho/22 e para Março/23 não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,1$ ). Médias que não apresentam letras não foram consideradas diferentes pelo teste estatístico. Barras verticais denotam erro padrão da média.

#### 4. DISCUSSÃO

Os solos de áreas de mineração de ferro geralmente caracterizam-se pela baixa fertilidade, biomassa microbiana, teor de matéria orgânica, CTC, e valores muito baixos de pH, além de problemas físicos como ausência de estrutura e muito material grosseiro (PIETRZYKOWSKI et al., 2022). Na área estudada essas características foram observadas mesmo após a implantação das técnicas de recuperação, nas quais doses elevadas de nutrientes foram aplicadas. Entretanto, o substrato sob as coberturas implantadas apresentou diferenças quanto aos atributos físicos, químicos e biológicos avaliados, indicando influência das diferentes técnicas utilizadas.

Os valores encontrados para a densidade de partícula foram maiores que  $3,00 \text{ g cm}^{-3}$ , acima do que é normalmente encontrado para solos ( $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ ) corroborando os resultados encontrados por Oliveira et al. (2022) para Latossolos Vermelhos no Quadrilátero Ferrífero. Este resultado evidencia a riqueza de óxidos-hidróxidos de ferro e alumínio nestes ambientes de geologia itabirítica que se constitui de mais de 50 % em peso de óxidos de ferro (SPIER et al., 2007). Diferenças encontradas entre as coberturas na camada superficial para os teores de

argila dispersa em água podem ter sido ocasionadas pela aplicação dos insumos. Albuquerque et al. (2000) observaram o aumento da argila dispersa em água ocasionadas por aplicação de calcário. A calagem em solos intemperizados ocasiona a substituição de cátions trivalente por cátions divalente no complexo de troca e o aumento de carga negativa, essas alterações promovem a expansão da dupla camada difusa e o aumento de forças repulsivas, o que pode ocasionar a dispersão das argilas (ALLEONI; MELLO; ROCHA, 2019). A cobertura também pode influenciar na dispersão das argilas, solos expostos ou com reduzida cobertura vegetal podem ter agregados destruídos devido a impactos da água da chuva ou irrigação aumentando a dispersão da argila e ocasionando o selamento superficial (SCHAEFER et al., 2002).

Diferenças encontradas entre as coberturas em relação aos teores de nutrientes pode ser justificada parte pela heterogeneidade natural do estéril. Diferenças nos teores de fósforo foram observadas entre as coberturas, no qual a disponibilidade de fósforo depende do teor de argila, matéria orgânica e atividade de microrganismos, presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e das formas predominantes dos óxidos (GÉRARD, 2016; GUEDES et al., 2020). Guedes et al., (2020) mostram que o fósforo em pilhas de estéril de mineração de ferro em Carajás em processo inicial de revegetação, predomina nas formas inorgânicas não lábil e moderadamente lábil, provenientes provavelmente da adição de fertilizantes e que o aumento da cobertura e da matéria orgânica contribuem para o aumento da labilidade.

Teores de fósforo disponível foram maiores no substrato sob cobertura hidrossemeadura + biomanta, valor enquadrado como muito bom segundo critérios estabelecidos para interpretação de análises do solo (ALVAREZ, V. V. H. et al., 1999). Esta cobertura também apresentou maior porcentagem de cobertura vegetal. Este resultado pode ser justificado pelo fato da biomanta funcionar como proteção física pois recobre o solo regulando a umidade e temperatura favorecendo a atividade microbiana e evita a erosão hídrica (LEKHA; KAVITHA, 2006; LEKHA, 2004). A erosão hídrica é uma das principais causas da perda de nutrientes do solo (YANG et al., 2023), Sharpley; Mcdowell; Kleinman (2001) mostraram que é um dos fatores que mais influenciam a perda de fósforo. Ainda, os maiores teores disponíveis de fósforo nessa cobertura podem ser justificados pela maior atividade dos microrganismos. A atividade microbiana pode aumentar a disponibilidade de fósforo solubilizando formas inorgânicas que estão adsorvidos as argilas e óxidos por meio de diferentes estratégias (HUSSAIN, 2019; RAWAT et al., 2021).

O tratamento hidrossemeadura + biomanta apresentou maior média para a respiração basal, indicando maior atividade microbiológica. Os organismos do solo desempenham diversas

funções, entre elas estão a ciclagem biogeoquímica de nutrientes e carbono no solo. Esta ciclagem biogeoquímica favorece o estabelecimento da vegetação que utiliza esses nutrientes reciclados (BARDGETT; VAN DER PUTTEN, 2014). A atividade microbiológica depende das proporções de nutrientes prontamente disponíveis, principalmente carbono para realizem suas atividades. Cleveland; Townsend; Schmidt (2002) mostraram que em solos intemperizados com baixa disponibilidade de nutrientes, a atividade dos microrganismos pode ser limitada pela disponibilidade de fósforo. Eles observaram também que a respiração basal foi maior, indicando maior atividade microbiológica, quando o fósforo não era um nutriente limitante. Assim sendo, a maior atividade dos microrganismos observada nessa cobertura pode ser justificada pela maior disponibilidade de fósforo. Em contrapartida, com maior atividade microbiológica há maior consumo das formas lábeis do carbono impedindo uma maior permanência desse carbono no solo, reduzindo suas chances de estabilização (CLEVELAND; TOWNSEND; SCHMIDT, 2002), resultado esse corroborando os menores teores de carbono associado a fração mineral encontrados neste tratamento.

A porcentagem de cobertura do substrato pela vegetação da hidrossemeadura se igualou a hidrossemeadura + biomanta. Entretanto, nessa cobertura, foram encontradas as menores médias nos teores disponíveis de fósforo, classificado como muito baixo (ALVAREZ, V. V. H. et.al., 1999). A menor disponibilidade de fósforo na hidrossemeadura pode ter afetado a atividade microbiológica, pois nesta, a respiração basal apresentou a menor taxa comparados as demais coberturas. A saturação de bases com a cobertura hidrossemeadura + manta projetada foi a maior, pois a cobertura com manta projetada recebeu três vezes mais a dose de nutrientes via adubação quando comparada com a cobertura hidrossemeadura. Esta diferença é devido ao processo operacional de implantação da manta projetada consistir no lançamento em três repetições dos insumos da hidrossemeadura acrescido de fibra de madeira.

Diferenças nos teores disponíveis de micronutrientes como cobre, ferro, manganês e zinco foram encontradas entre os tratamentos avaliados. A disponibilidade desses elementos depende das características do solo como pH, textura, mineralogia e teor de matéria orgânica, podendo ser adsorvidos nas argilas e nos óxidos de ferro e formar complexos organometálicos com a matéria orgânica (KABATA-PENDIAS, 2004; KIM et al., 2015). O substrato apresentou diferenças quanto a textura e o teor de matéria orgânica que podem justificar a diferença quanto a disponibilidade dos micronutrientes. Nas coberturas com *topsoil* ocorreram maiores teores de carbono orgânico total, carbono lábil e argila, na hidrossemeadura + biomanta ocorreu maiores teores de silte, essas coberturas apresentaram maior disponibilidade de micronutrientes. Na

cobertura hidrossemeadura + manta projetada ocorreram maiores teores de silte e areia fina, menores teores de carbono orgânico total, carbono lábil e apresentou os menores teores disponíveis dos micronutrientes.

O teor de manganês disponível no substrato foi alto em todas as coberturas estudadas. O manganês é um elemento essencial às plantas, mas em níveis altos pode ser tóxico (LYNCH; ST.CLAIR, 2004). A concentração elevada desse elemento pode estar associada a mineralogia local, uma vez que no Quadrilátero Ferrífero há o predomínio do ecossistema de cangas, caracterizados pela elevada concentração de ferro e manganês (SKIRYCZ et al., 2014). As espécies vegetais de ocorrência natural nesses ambientes apresentam adaptações fisiológicas que permitem a sua subsistência (JACOBI et al., 2007b). Geralmente as espécies que desenvolvem naturalmente nestes ambientes toleram estes elevados teores de manganês, mas no processo de revegetação, ações específicas podem ser necessárias visando a não toxidez das plantas de recobrimento necessárias na primeira etapa da revegetação.

A cobertura hidrossemeadura + manta projetada recebeu doses triplicadas de nutrientes em comparação com os outros tratamentos. No entanto, essa cobertura demonstrou a menor eficiência de recuperação de nutrientes. Esse resultado indica que a aplicação de doses elevadas de nutrientes não garante absorção eficiente pela vegetação. Como resultado, o uso da manta projetada pode refletir em uma subutilização de nutrientes e em um desperdício de recursos financeiros.

Os teores semi-totais encontrados para arsênio apresentaram valores maiores que o Valor de Referência de Qualidade (VRQ) estabelecido para o estado de Minas Gerais ( $8 \text{ mg kg}^{-1}$ ), entretanto De Souza et al. (2015) mostraram que um único valor de referência de qualidade para a concentração de metais e metaloides para o estado de Minas Gerais não é representativo devido a variabilidade do material de origem do solo e da pedogênese ao longo de todo o estado, sendo necessário o estabelecimento de um VRQ por região. Nesse mesmo estudo, foi encontrada uma concentração natural do arsênio de  $168 \text{ mg kg}^{-1}$  para a região do Quadrilátero Ferrífero corroborando com os resultados encontrados e indicando que se enquadram na concentração naturalmente encontrada para essa região, não indicando contaminação.

As variações encontradas quanto a cobertura vegetal nas áreas pode ser advinda das coberturas implantadas. Os materiais inseridos como a biomanta e o *mulch* da manta projetada contribuíram para o recobrimento inicial do solo, redução dos processos erosivos e das perdas de sementes, contribuindo com a manutenção da vegetação nas pilhas. Nas coberturas com

*topsoil*, não houve a inserção de materiais que contribuíssem com o recobrimento inicial, o que pode justificar as maiores variações da cobertura vegetal nos períodos observados.

Estudos mostram que a utilização do *topsoil* na recuperação de áreas de canga influenciam positivamente no crescimento e estabelecimento da vegetação nas áreas em que foram utilizados devido ao recrutamento de espécies do seu banco de sementes (ANDRADE AMARAL et al., 2016; REZENDE et al., 2021). Entretanto os tratamentos utilizados nesse estudo com a adição do *topsoil* não apresentaram melhor desenvolvimento da vegetação. Fowler et al., (2015), mostraram que no processo de transferência do *topsoil* há uma redução da germinação das sementes devido a homogeneização do material e mistura das camadas do solo além de perda de viabilidade das sementes germinarem. Estes fatores podem justificar em parte, a reduzida cobertura vegetal dos tratamentos com *topsoil*. Esses resultados mostram que avaliações da qualidade do *topsoil* e da viabilidade de seu uso devem ser realizadas antes da utilização.

O *topsoil* utilizado possui maior teor de argila e teor de matéria orgânica comparativamente ao substrato presente nas demais coberturas avaliadas. Essas características podem influenciar na melhoria da qualidade do substrato proporcionando condições para o estabelecimento da vegetação. A presença de argila pode influenciar na estabilização da matéria orgânica do solo, pois esta fração adsorve à superfície da matéria orgânica influenciando na sua estabilidade e persistência refletindo nos maiores teores de carbono associado aos minerais (ZHAO et al., 2023). Ainda, a matéria orgânica pode funcionar como um agente cimentante na agregação das argilas contribuindo com a estabilidade de agregados e com a construção estrutural (COTRUFO; LAVALLEE, 2022). Por conseguinte, esse incremento de matéria orgânica e de argila propiciado pela utilização do *topsoil* proporcionará melhoria da qualidade química e física do substrato e, futuramente, poderá apresentar resultados mais expressivos na cobertura vegetal e na sucessão ecológica nessas áreas quando comparados com as coberturas em que o *topsoil* não foi utilizado. Por conseguinte, o monitoramento ao longo do tempo é necessário quanto ao uso de *topsoil*, podendo apresentar melhores resultados em avaliações futuras.

## 5. CONCLUSÕES

O substrato presente na pilha de estéril possui características físicas, químicas e biológicas heterogêneas e de baixa fertilidade. Após a implantação das coberturas, juntamente com nutrientes, essas características se mantiveram. Não obstante, foi possível perceber que as

coberturas ocasionam diferenças nas propriedades químicas, físicas e biológicas do estéril e na cobertura pela vegetação.

A cobertura hidrossemeadura + biomanta se destacou apresentando a maior cobertura do estéril pela vegetação, assim como maior disponibilidade de fósforo e atividade biológica. A hidrossemeadura + manta projetada, técnica mais recente e amplamente sendo utilizada, não apresentou melhores resultados comparativamente as coberturas com manta biomanta e *topsoil*. Essa cobertura recebeu o triplo da dose de nutrientes em comparação aos demais tratamentos e apresentou baixa eficiência de recuperação dos nutrientes, refletindo em desperdícios.

As coberturas com *topsoil*, embora com melhores características químicas e físicas do substrato, não apresentaram melhor recobrimento e desenvolvimento das plantas. A avaliação da qualidade do *topsoil* é fundamental para decidir sobre seu uso ou não, uma vez que é uma atividade de elevado custo.

A hidrossemeadura, cobertura que não foi associada a outra técnica de bioengenharia, apresentou características químicas, físicas e biológicas do substrato menos favoráveis a revegetação quando comparado as demais coberturas onde foram realizadas associações de técnicas de bioengenharia, evidenciando o potencial da utilização das técnicas de bioengenharia em associação para a revegetação de taludes de pilhas de estéril.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A. et al. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 295–300, jun. 2000.
- ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 1381.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 43-60.
- ANDRADE AMARAL, L. et al. Viability of using topsoil ferruginous yoke in the restoration of a waste dump. **Bosque (Valdivia)**, v. 37, n. 2, p. 379–387, 2016.
- AZEVEDO, Ú. R. et al. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. **Geoparques do Brasil /Propostas - vol. 1**, p. 183–219, 2011.
- BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, v. 515, n. 7528, p. 505–511, 26 nov. 2014.
- BLAIR, G.; LEFROY, R.; 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**, v. 46, n. 7, p. 1459, 1995.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.
- CEMADEM, 2023. Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do Cemaden, Downloads de dados. Estações pluviométricas. Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>>. Acesso em: junho, 2023.
- CLEVELAND, C. C.; TOWNSEND, A. R.; SCHMIDT, S. K. Phosphorus limitation of microbial processes in moist tropical forests: Evidence from short-term laboratory incubations and field studies. **Ecosystems**, v. 5, n. 7, p. 680–691, 2002.
- COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Academic Press Inc., 2022. v. 172p. 1–66.
- CRUZ, E. J. S. et al. Estudo de caso utilização da manta vegetal projetada dupla para revegetação de taludes de estéril e rejeito de mineração/ Brasil. **Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales**, p. 1–25, 2017.

DE SOUZA, J. J. L. L. et al. Geochemistry and spatial variability of metal(loid) concentrations in soils of the state of Minas Gerais, Brazil. *Science of The Total Environment*, v. 505, p. 338–349, fev. 2015.

Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. Alleoni, Luíz; Mello, Jaime; Rocha, Wadson. *Química e mineralogia do solo, Parte II*. Viçosa. SBCS, 2019, p. 69-129.

EMBRAPA, 2017. Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF.

FARRAG, S.; ABAYAZID, Z. Different Approaches of Soil Stabilization: A Comprehensive Review. *SSRN Electronic Journal*, 2023.

FILHO, A. D. C. Solos e Ambientes do quadrilátero ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos tabuleiros costeiros. p. 245, 2008.

FERREIRA EB, Cavalcanti PP, Nogueira DA (2021). *\_ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues)\_*. R package version 1.2.2, <<https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>>.

FOWLER, W. M. et al. Evaluating restoration potential of transferred topsoil. *Applied Vegetation Science*, v. 18, n. 3, p. 379–390, jul. 2015.

GÉRARD, F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils — A myth revisited. *Geoderma*, v. 262, p. 213–226, jan. 2016.

GUEDES, R. S. et al. Phosphorus lability increases with the rehabilitation advance of iron mine land in the eastern Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 6, p. 390, 24 jun. 2020.

HUSSAIN, A. Combining phosphorus (P) with phosphate solubilizing bacteria (PSB) improved wheat yield and P uptake in alkaline soil. *Pure and Applied Biology*, v. 8, n. 2, 10 jun. 2019.

IBRAM, 2016. *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração*; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília.

IBRAM. *Mineração em números, 2022*. IBRAM, mineração do Brasil. Disponível em: <<https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>>. Acesso em: março, 2023.

JACOBI, C. M. et al. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, v. 16, n. 7, p. 2185–2200, 7 jun. 2007.

KABATA-PENDIAS, A. Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*, v. 122, n. 2–4, p. 143–149, out. 2004.

KIM, R.-Y. et al. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation—a critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 37, n. 6, p. 1041–1061, 5 dez. 2015.

LEKHA, K.; KAVITHA, V. Coir geotextile reinforced clay dykes for drainage of low-lying areas. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 24, n. 1, p. 38–51, fev. 2006.

LEKHA, K. R. Field instrumentation and monitoring of soil erosion in coir geotextile stabilised slopes—A case study. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 22, n. 5, p. 399–413, out. 2004.

LYNCH, J. P.; ST. CLAIR, S. B. Mineral stress: the missing link in understanding how global climate change will affect plants in real world soils. **Field Crops Research**, v. 90, n. 1, p. 101–115, nov. 2004.

MAUS, V. et al. An update on global mining land use. **Scientific Data**, v. 9, n. 1, p. 433, 22 jul. 2022.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. *Matéria orgânica do solo: métodos de análises*. - 2ª. ed. rev. e atualizada - Viçosa, MG: UFV- Gefert, 2017.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02, 8 de setembro de 2010. Diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas. Minas gerais.

Diário executivo de Minas Gerais, setembro de 2010. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=14670/>>. Acesso em: junho, 2023.

OLIVEIRA, D. A. DOS S. et al. Litossequência de solos na serra da moeda, quadrilátero ferrífero. **Geosciences = Geociências**, v. 40, n. 4, p. 1063–1080, 2 fev. 2022.

PIETRZYKOWSKI, M. et al. Impact of Tree Species and Substrates on the Microbial and Physicochemical Properties of Reclaimed Mine Soil in the Novel Ecosystems. **Forests**, v. 13, n. 11, p. 1858, 7 nov. 2022.

PUNETHA, P.; SAMANTA, M.; SARKAR, S. Bioengineering as an Effective and Ecofriendly Soil Slope Stabilization Method: A Review. Em: **Advances in Natural and Technological Hazards Research**. [s.l.] Springer, Cham, 2019. v. 50p. 201–224.

RAMOS, S. J. et al. Changes in soil properties during iron mining and in rehabilitating minelands in the Eastern Amazon. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 4, p. 256, 7 abr. 2022.

RAWAT, P. et al. Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 49–68, 30 mar. 2021.

REZENDE, L. A. L. et al. Topsoil depth influences the recovery of rupestrian grasslands degraded by mining. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 8 dez. 2021.

SCHAEFER, C. E. R. et al. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 5, p. 669–678, maio 2002.

SHARPLEY, A. N.; MCDOWELL, R. W.; KLEINMAN, P. J. A. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. **Plant and Soil**, v. 237, n. 2, p. 287–307, 2001.

SILVA, E. E. DA; AZEVEDO, P. H. S. DE; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO<sub>2</sub>). **Comunicado Técnico EMBRAPA**, v. 99, p. 1–4, 2007.

SKIRYCYZ, A. et al. Canga biodiversity, a matter of mining. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, 24 nov. 2014.

SOLERA, M. L. et al. Modelos estruturais de bioengenharia de solos na revegetação de pilhas de estéril em mineração a céu aberto. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 47, p. 74–88, 2018.

SPIER, C. et al. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Precambrian Research**, v. 152, n. 3–4, p. 170–206, 20 jan. 2007.

SYERS, J. K. et al. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. [s.l.] Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

TEDESCO, M. J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2 ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, 1995.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) E. **Method 3051A: microwave assisted acid digestion of sediments sludges, soils, and oils**. Test Methods Eval Solid Waste; p. 1-30. 2007.

YANG, X. et al. Estimating nutrient transport associated with water and wind erosion across New South Wales, Australia. **Geoderma**, v. 430, p. 116345, fev. 2023.

ZHAO, Z. et al. Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice–wheat cropping system. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 3665, 4 mar. 2023.

## INFLUÊNCIA DA MANTA PROJETADA SOBRE A GERMINAÇÃO DO BANCO DE SEMENTES DE UM *TOPSOIL* DE CAMPO RUPESTRE FERRUGINOSO

### RESUMO

Formações campestres ferruginosas e quartizíticas possuem elevado grau de endemismo e representa um “*hot spot*” de biodiversidade. Geralmente, esse tipo de vegetação está presente em solos com grandes reservas de minério de ferro e por este motivo são constantemente ameaçadas pela atividade minerária. A recuperação desses ambientes é um grande desafio devido a sua singularidade. Técnicas de bioengenharia de solos, como por exemplo a transposição de *topsoil* e implantação de mantas, são utilizadas para a recuperação desses ambientes impactados pela mineração. A utilização de mantas em consórcio com a utilização de *topsoil* pode ser uma alternativa para potencializar os resultados da revegetação e sucessão ecológica dessas áreas. Entretanto, pouco se sabe sobre a influência da utilização de mantas sobre os benefícios de uso do *topsoil* e na germinação do seu banco de sementes. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da utilização da manta projetada sob umidade controlada na germinação do banco de sementes de um *topsoil* de campo rupestre ferruginoso. Um experimento foi conduzido em casa de vegetação seguindo um delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 2 x 4, com quatro repetições. O primeiro fator consiste na presença e ausência de manta projetada sobre o *topsoil* e o segundo fator em quatro diferentes umidades. A manta projetada consiste em uma suspensão composta por cola, água e *mulch* de fibra de madeira e a umidade foi mantida a valores aproximados equivalentes a 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da C.C., monitorada diariamente por gravimetria para a reposição da água perdida durante 180 dias. As unidades experimentais foram formadas por bandejas plásticas com dimensões aproximadas de 30 x 22 x 10 cm. No fundo de cada bandeja foi adicionado brita zero coberta por manta geotêxtil do tipo Bidim e *topsoil*. A avaliação da emergência (quantificação e identificação) das plantas foi realizada durante seis meses após a montagem do experimento. A germinação foi avaliada por meio do Índice de Velocidade de Emergência (IVE). A diversidade de espécies foi avaliada por meio do índice de Shannon Weaver (H'), do índice de equabilidade de Pielou (J) e do índice de Simpson (1-D). Ao final dos seis meses foram realizadas as análises químicas e físicas do *topsoil*. Após término do período experimental foram contabilizados 214 indivíduos em todas as unidades experimentais, sendo identificadas doze espécies presentes no banco de sementes do *topsoil* utilizado. O Índice de

Velocidade de Emergência (IVE) apresentou diferença significativa na interação umidade e cobertura e foi maior na ausência de manta. Os índices de diversidade apresentaram valores baixos. Análises químicas, físicas e biológicas do solo foram realizadas após a desmontagem do experimento afim de avaliar as diferenças no crescimento da vegetação nas unidades experimentais. Foram encontradas diferenças no número de indivíduos na presença e ausência de manta. A umidade não foi significativa quanto a diferença no número de indivíduos, mas esta influenciou na disponibilidade de nutrientes, mostrando ser importante o seu controle. Os índices de diversidades avaliados diferiram apenas quanto a cobertura, apresentando maiores valores na ausência da manta. As variáveis do solo analisadas não explicaram claramente as diferenças encontradas quanto ao crescimento de plantas. A manta influenciou negativamente na germinação do banco de sementes do *topsoil*.

**Palavras-chave:** *Topsoil*. Banco de sementes. Recuperação de áreas degradadas.

## ABSTRACT

Rusty and quartzitic grassland formations exhibit a high degree of endemism and represent a biodiversity hotspot. Generally, this type of vegetation is found in soils with large iron ore reserves and is therefore constantly threatened by mining activities. The restoration of these environments is a significant challenge due to their uniqueness. Soil bioengineering techniques, such as topsoil transposition and the use of mats, are employed to rehabilitate mining-impacted areas. The use of mats in conjunction with topsoil may be an alternative to enhance the results of revegetation and ecological succession in these areas. However, little is known about the influence of mat usage on the benefits of topsoil and seed bank germination. Thus, the objective of this study was to assess the influence of the use of mats under controlled moisture conditions on the germination of the seed bank of a ferruginous rock field topsoil. An experiment was conducted in a greenhouse following a randomized block design in a 2 x 4 factorial arrangement, with four replicates. The first factor consisted of the presence and absence of mats applied to the topsoil, and the second factor involved four different moisture levels. The applied mat consisted of a suspension composed of glue, water, and wood fiber mulch, while moisture was maintained at approximately 60%, 70%, 80%, and 90% of the field capacity, monitored daily by gravimetry to replace lost water over 180 days. Experimental units were formed using plastic trays with approximate dimensions of 30 x 22 x 10 cm. At the bottom of each tray, crushed stone was added, covered with Bidim geotextile and topsoil. Plant emergence (quantification and identification) was evaluated for six months after the experiment setup. Germination was assessed using the Emergence Velocity Index (EVI). Species diversity was evaluated using the Shannon Weaver index ( $H'$ ), Pielou's evenness index ( $J$ ), and Simpson's index ( $1-D$ ). Chemical and physical analyses of the topsoil were conducted at the end of the six months. After the experimental period, 214 individuals were counted in all experimental units, with twelve species identified in the topsoil seed bank used. The Emergence Velocity Index (EVI) showed a significant difference in the moisture and cover interaction and was higher in the absence of the mat. Diversity indices exhibited low values. Chemical, physical, and biological soil analyses were conducted after dismantling the experiment to assess differences in vegetation growth in the experimental units. Differences in the number of individuals were found between the presence and absence of mats. Moisture did not significantly affect the number of individuals, but it influenced nutrient availability, highlighting its importance in control. Diversity indices only differed with respect to cover, showing higher values in the

absence of the mat. Soil variables analyzed did not clearly explain the differences observed in plant growth. The mat had a negative influence on the germination of the topsoil seed bank.

**Keywords:** Topsoil. Seed bank. Restoration of degraded areas.

## 1. INTRODUÇÃO

A vegetação do Quadrilátero Ferrífero, localizado em Minas Gerais, se caracteriza por formações campestres ferruginosas e quartizíticas. Os Campos Rupestres Ferruginosos são formações herbáceas arbustivas que se estabelecem em solos rasos e de baixa fertilidade, caracteriza-se pela presença de espécies adaptadas as condições de baixa fertilidade e déficit hídrico, por elevado grau de endemismo e representa um “*hot spot*” de biodiversidade (JACOBI; CARMO; VINCENT, 2008; REZENDE et al., 2021; SCHAEFER et al., 2016). Este tipo de vegetação geralmente está presente em solos com grandes reservas minerais de ferro e por este motivo são constantemente ameaçados pela atividade minerária (JACOBI et al., 2007a; MESSIAS et al., 2012). A singularidade que este ecossistema dispõe o confere uma baixa resistência e resiliência a alterações, sendo sensível a perda da cobertura. Por este motivo, quando estes ambientes são degradados a sua recuperação é um grande desafio (CARMO; JACOBI, 2013; SKIRYCZ et al., 2014).

A transposição de *topsoil* é uma alternativa bastante favorável a restauração desses ecossistemas (ANDRADE AMARAL et al., 2016; REZENDE et al., 2021). Técnicas de bioengenharia de solos como por exemplo instalação de biomantas e aplicação de mantas projetadas também são utilizadas para a recuperação desses ambientes quando impactados pela mineração. O *topsoil* é a camada superficial do solo, esta camada é caracterizada pela presença de atividade biológica e matéria orgânica, contém banco de sementes e propágulos de espécies. Quando esta camada é removida para atividades minerárias, este material é utilizado com sucesso como substrato fértil e fonte de sementes e propágulos de plantas na recuperação de áreas degradadas (FERREIRA; WALTER; VIEIRA, 2015; GONÇALVES; MARTINS; CORREIA, 2020). O banco de sementes do solo, fornecido com a transposição do *topsoil*, consiste em uma reserva de sementes viáveis, este banco de sementes varia com os fatores ambientais, principalmente clima e solo, e é considerado uma grande reserva de biodiversidade para o recrutamento de espécies (DU et al., 2023; YANG et al., 2021). Estudos mostram que o banco de sementes exerce influência positiva significativa na regeneração de florestas e ambientes alterados (DOUH et al., 2018; GROMBONE-GUARATINI; LEITÃO FILHO; KAGEYAMA, 2004; ZHOU et al., 2019).

A biomanta consiste em uma manta geotêxtil biodegradável produzida geralmente utilizando fibra de coco e capim, promove a imediata cobertura do solo e o protege contra processos erosivos até que a vegetação se estabeleça (PUNETHA; SAMANTA; SARKAR, 2019). A instalação da biomanta nos taludes ocorre por meio de grampeamento e geralmente

demandam mão de obra especializada em trabalho em altura para sua instalação. A manta projetada consiste em uma suspensão formada por água, corretivos químicos do solo, agentes adesivos, mix de sementes, compostos e materiais orgânicos. Essa suspensão é projetada no talude por meio de bombeamento hidráulico formando uma espécie de tecido que promove a cobertura do solo (CRUZ et al., 2017). Recentemente a utilização de biomantas vem sendo substituída pela manta projetada devido a sua praticidade de aplicação e reduzida necessidade de mão de obra para sua aplicação quando comparada a biomanta.

As técnicas de bioengenharia anteriormente citadas são utilizadas individualmente, mas a utilização de aplicação de mantas em consórcio com a utilização de *topsoil* pode ser uma alternativa para potencializar os resultados da revegetação e sucessão ecológica dessas áreas, principalmente em áreas inclinadas como taludes de disposição de estéril ou rejeitos, minimizando sua perda por erosão. Entretanto, pouco se sabe sobre a influência da utilização de mantas sobre os benefícios de uso do *topsoil* e na germinação do seu banco de sementes. Diversos fatores podem influenciar a germinação do banco de sementes como temperatura, luz, umidade, aeração, tipo de solo, a interação desses fatores, além de presença de barreiras físicas (BASTO; THOMPSON; REES, 2015; CHEN; WANG; JIA, 2013; FACELLI; PICKETT, 1991). A umidade é um fator crucial para a germinação e crescimento das plantas, impactando na quebra de dormência e no desenvolvimento da vegetação, mostrando ser importante o seu controle. O uso da manta pode influenciar na germinação do banco de sementes, alterando as condições de umidade, aeração, luminosidade e temperatura. Sob condições controladas de umidade, o uso da manta, pode potencializar a germinação do banco de sementes do *topsoil*, influenciar positivamente no estabelecimento da vegetação e conseqüentemente no sucesso do processo de recuperação ambiental. Destarte, este trabalho objetivou avaliar a influência da utilização da manta projetada sob quatro níveis de umidade na germinação do banco de sementes de um *topsoil* de campo rupestre ferruginoso.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O *topsoil* utilizado é proveniente da Mina do Tamanduá, pertencente a VALE S/A, no município de Nova Lima, Minas Gerais (coordenadas SIRGAS 2000 20° 6' 53,03" S, 43°55' 58,16" W, altitude de 1.360 m). O *topsoil* foi retirado da área de origem em novembro de 2021 e mantido em pilhas em ambiente aberto. A coleta das amostras foi realizada em março de 2021, em pontos aleatórios distribuídos ao longo da pilha, totalizando 500 kg.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (DPS/UFV), em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. O município de Viçosa apresenta temperatura média anual de 21,2 °C (máxima de 30 °C e mínima de 11,1 °C). Para a montagem do experimento, o *topsoil* foi previamente passado em peneira com malha de 4 mm, para a remoção de raízes e pedras. Amostras deste material, após homogeneização, foram analisadas para caracterização física e química (Tabela 1). Foram realizadas as análises de densidade de partículas, granulometria, argila dispersa em água, equivalente de umidade e curva de retenção de água, macro e micronutrientes, pH em água e acidez potencial (EMBRAPA, 2017).

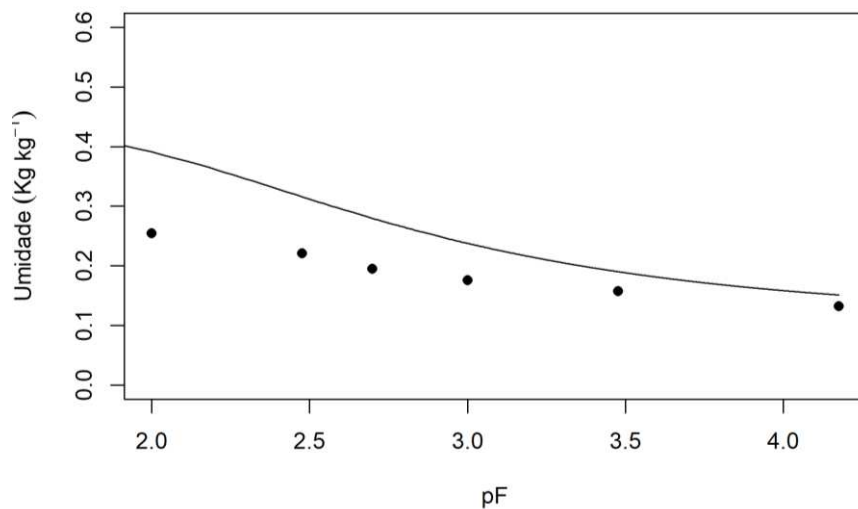
**Tabela 1.** Caracterização física e química das amostras de *topsoil*

Atributos	
Ds (g cm <sup>-3</sup> )	1,41
Areia Grossa (kg kg <sup>-1</sup> )	0,23
Areia Fina (kg kg <sup>-1</sup> )	0,06
Silte (kg kg <sup>-1</sup> )	0,16
Argila (kg kg <sup>-1</sup> )	0,55
ADA (kg kg <sup>-1</sup> )	0,13
EU (kg kg <sup>-1</sup> )	0,22
Classificação Textural	Argila
pH em água	4,85
P (mg dm <sup>-3</sup> )	0,70
K (mg dm <sup>-3</sup> )	21,00
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,19
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,29
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	9,30
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,24
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,53
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	9,54
V (%)	2,50
m (%)	54,70
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	4,12
P-rem (mg L <sup>-1</sup> )	6,00
S (mg dm <sup>-3</sup> )	1,00
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	1,40
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	15,00
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	52,70
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,81

Ds: densidade do solo pelo método da proveta; ADA: Argila dispersa em água; EU: equivalente de umidade; P: Fósforo; K: Potássio; Ca<sup>2+</sup>: Cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup>: Magnésio trocável; Al<sup>3+</sup>: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de base; t: CTC efetiva; T: CTC a pH 7; V: saturação por base, m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; P-rem: Fósforo remanescente; S: Enxofre; Cu: Cobre; Mn: Manganês; Fe: Ferro; Zn: Zinco.

O experimento seguiu delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 2 x 4, com quatro repetições. O primeiro fator consiste na presença e ausência de manta projetada sob o *topsoil* e o segundo fator em quatro diferentes umidades mantidas durante 180 dias. As unidades experimentais foram formadas por bandejas plásticas com dimensões aproximadas de 30 x 22 x 10 cm. As bandejas foram perfuradas em sua base para permitir a drenagem livre da água e facilitar a saída do excedente. No fundo de cada bandeja foi adicionado 0,50 kg de brita zero coberta por manta geotêxtil do tipo Bidim. Em cima da manta foi aplicado 3,00 kg de *topsoil*, formando-se uma camada de aproximadamente 7,00 cm de espessura.

Os quatro níveis de umidade corresponderam a quatro pontos equidistantes entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) do *topsoil*. Como o *topsoil* é de um Latossolo com  $0,55 \text{ kg kg}^{-1}$  de argila, a CC foi considerada como sendo a umidade em equilíbrio com o potencial de  $-10,00 \text{ kPa}$ . Em determinação prévia pela curva de retenção da água no solo (Figura 1), obteve-se os valores de  $0,26 \text{ kg kg}^{-1}$  e  $0,13 \text{ kg kg}^{-1}$  para a CC e PMP, respectivamente. Neste sentido, os níveis de umidade foram  $0,23$ ;  $0,21$ ;  $0,18$  e  $0,16 \text{ kg kg}^{-1}$ , valores aproximadamente equivalentes a 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da CC. A umidade do solo foi monitorada diariamente por gravimetria para a reposição da água perdida.



**Figura 1.** Curva de retenção de água do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso.

A manta projetada consiste em uma suspensão composta por cola, água e *mulch* de fibra de madeira Verdetec®. A proporção utilizada de cada material seguiu recomendações fornecidas pela empresa. Cada bandeja ( $\sim 0,07 \text{ m}^2$ ) recebeu 20,19 g de *mulch* de madeira, 2,48 g de cola e 693,00 ml de água. Essa aplicação foi repetida três vezes, simulando o que acontece no campo. Inicialmente, todas as unidades experimentais tiveram umidade ajustada na capacidade de campo. Na sequência, iniciou-se o monitoramento da umidade, duas vezes ao

dia, às 10:00 e 16:00 h. Quinzenalmente as unidades experimentais receberam irrigação com solução nutritiva meia força de Clark (1975) modificada preparada com reagentes para análise contendo as concentrações apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Concentração dos macros e micronutrientes da solução de Clark ½ força

Nutriente	mmol L <sup>-1</sup>	Nutriente	μmol L <sup>-1</sup>
N-NO <sup>3-</sup>	4,30	Mn <sup>2+</sup>	3,50
N-NH <sup>4+</sup>	0,33	Fe <sup>3+</sup>	20,00
P-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,33	Zn <sup>2+</sup>	1,00
K <sup>+</sup>	1,00	Cu <sup>2+</sup>	0,25
Ca <sup>2+</sup>	1,65	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	9,50
Mg <sup>2+</sup>	0,30	MoO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,09
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,30		

N-NO<sup>3-</sup>: Nitrato; N-NH<sup>4+</sup>: Amônia; P-H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>: Fosfato; K<sup>+</sup>: íon Potássio; Mg<sup>2+</sup>: íon Magnésio; SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>: Ânion sulfato; Mn<sup>2+</sup>: íon Manganês; Fe<sup>3+</sup>: íon Ferro; Zn<sup>2+</sup>: íon Zinco; Cu<sup>2+</sup>: íon Cobre; H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>: Ácido bórico; MoO<sub>4</sub><sup>-2</sup>: Ânion molibdato.

A avaliação da emergência (quantificação e identificação) das plantas foi realizada durante seis meses após a montagem do experimento. A germinação foi avaliada por meio do Índice de Velocidade de Emergência (IVE). Diariamente, às 10:00 h, foi registrado o número de plântulas que apresentaram folhas cotiledonares visíveis. Ao final do período foi calculado o IVE com os dados diários conforme descrito por Manguire, (1962) (Equação 1).

$$IVE = (G1/N1) + (G2/N2) + \dots + (Gn/Nn) \quad \text{Equação 1.}$$

em que IVE é o índice de velocidade de emergência; G é o número de plântulas normais computadas nas contagens e N é o número de dias de avaliação a partir da montagem do experimento.

A diversidade de espécies foi avaliada por meio do índice de Shannon Weaver (H'), do índice de equabilidade de Pielou (J) e do índice de Simpson (1-D)(FELFILI; FELFILI, 2001; MESSIAS et al., 2012). O índice de Shannon-Weaver (H') foi calculado segundo a Equação 2.

$$H' = - \sum pi \cdot \log pi \quad \text{Equação 2.}$$

em que Pi é a proporção da espécie i (pi = ni/N); ni é o número de indivíduos amostrados para a espécie i e N é o número total de indivíduos amostrados.

Com o Índice de Shannon foi calculada a homogeneidade da distribuição da abundância das espécies pelo índice de equabilidade de Pielou (J) (Equação 3).

$$J = H' / H'máx = H' / \ln S \quad \text{Equação 3.}$$

onde H'máx é o logaritmo natural do número de espécies (S) da amostra. Este índice varia entre 0 e 1 sendo que valores próximos de 1 representam maior uniformidade de distribuição (JR, 1999).

O índice de Simpson diz sobre a dominância das espécies, ou seja, refere-se à probabilidade de indivíduos retirados aleatoriamente serem de uma mesma espécie. Quanto maior o valor do índice menor será a diversidade de espécies. Este índice foi calculado conforme a Equação 4.

$$1 - D = \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad \text{Equação 4.}$$

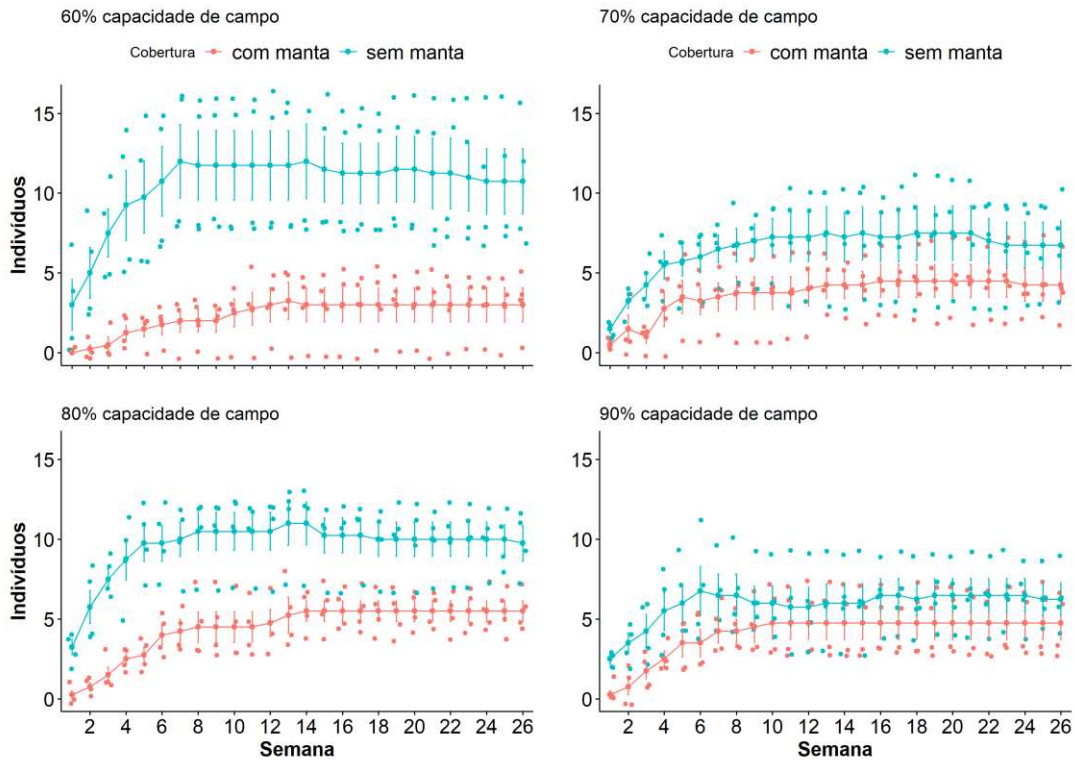
em que 1- D é o índice de Simpson.

Ao final dos seis meses foram realizadas as análises químicas e físicas do *topsoil*. Análises químicas de determinação dos teores disponíveis de P, K, S, Fe, Mn, Cu e Zn, teores trocáveis de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, H+Al e determinação do pH em água (Embrapa, 2017), os teores de carbono total e nitrogênio total por meio de equipamento de análise elementar (CHNS) e carbono lábil (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995) a fim de avaliar o efeito dos tratamentos. Também foi realizada a avaliação da argila dispersa em água, conforme descrito em Embrapa (2017).

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett para a normalidade e homocedasticidade dos dados. Atendidas as pressuposições da estatística paramétrica na sequência foram realizados a análise de variância (ANOVA) considerando  $p < 0,05$ . Posteriormente, independentemente da significância, foram efetuadas análises de regressão em função das umidades aplicadas ( $p < 0,05$ ). Todas as análises foram executadas no software R (Core Team, 2022).

### 3. RESULTADOS

Os fatores analisados, cobertura e umidade, não apresentaram interação significativa quanto ao número de plantas. Ao avaliar os fatores isoladamente, o número de indivíduos foi diferente apenas entre as coberturas com e sem manta, a umidade não foi significativa. A maior emergência de plantas após os 180 dias (26 semanas) foi de 13 indivíduos por parcela observada em solo a 60 % da CC e sem manta (Figura 2). A menor emergência ocorreu no solo com 90 % da CC e com a presença da manta, sendo em média 5 indivíduos por parcela. A emergência expressou crescimento exponencial até a sétima semana, após esse período o número de indivíduos se manteve praticamente constante até o fim da avaliação do experimento. Este comportamento pôde ser observado em todos os tratamentos.



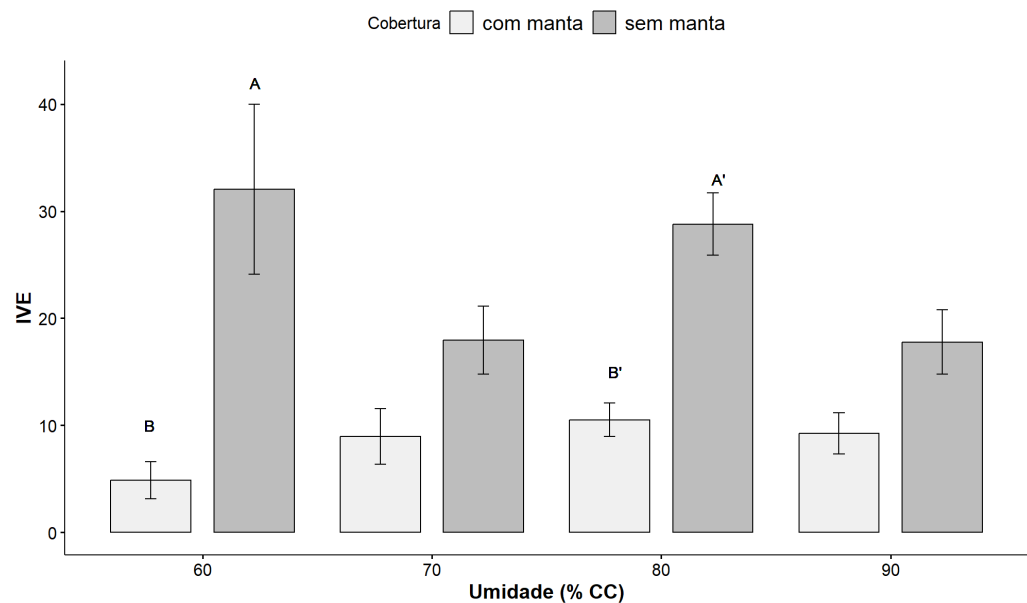
**Figura 2.** Emergência de indivíduos (nº de plantas) ao longo de 26 semanas no *topsoil* de campo rupestre ferruginosos sem e com manta com umidades de 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da capacidade de campo (CC). Barras verticais denotam erro padrão em torno da média.

Após término do período experimental foram contabilizados 214 indivíduos em todas as unidades experimentais, sendo identificadas doze espécies presentes no banco de sementes do *topsoil* utilizado (Tabela 3).

**Tabela 3.** Espécies espontâneas identificadas no banco de sementes do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso

Nome Científico	Nome Popular
<i>Brachiaria plantaginea</i>	capim marmelada
<i>Commelina difusa</i>	trapoeraba
<i>Cyperus esculentus</i>	tiriricão
<i>Eleusine indica</i>	capim pé de galinha
<i>Melinis minutiflora</i>	capim gordura
<i>Praxelis pauciflora</i>	mentrasto
<i>Achyrocline satureioides</i>	macela
<i>Melastomaceae leandra</i>	pixirica
<i>Cyperus sp</i>	tiririca
<i>Commelina sp</i>	trapoeraba
<i>Lolium multiflorum</i>	Azevém
<i>Spermacoce verticillata</i>	Vassourinha

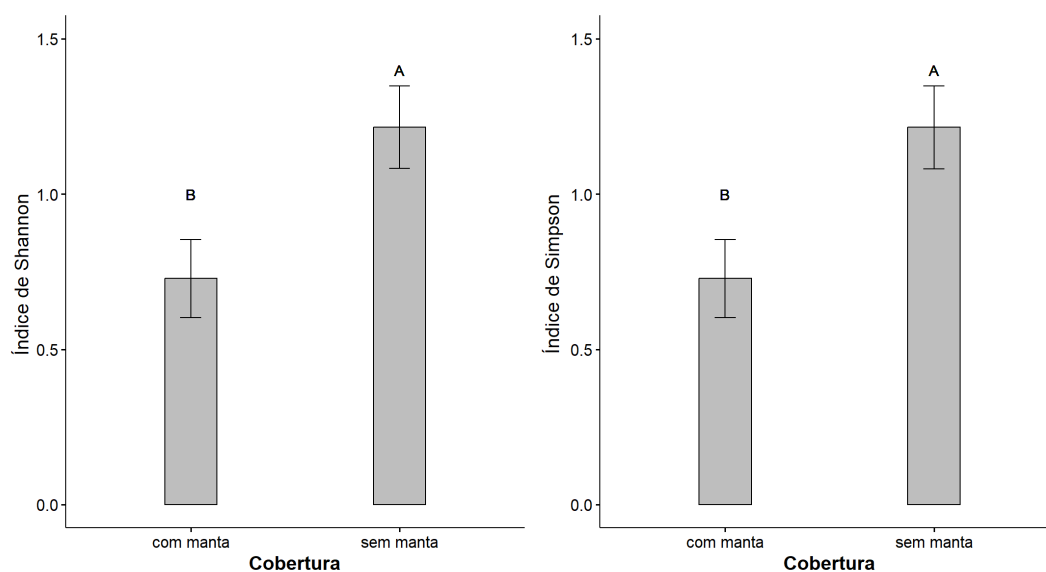
O índice de velocidade de emergência (IVE) apresentou diferenças entre as coberturas em cada umidade de 60 % e 80 % da CC (Figura 3). Em ambas as umidades as maiores médias do IVE foram encontradas na ausência de manta (Figura 3). Nos níveis de umidade dentro de cada cobertura apenas na ausência de manta foi encontrada diferença, entretanto os valores deste índice foram aleatórios não se ajustando a nenhum modelo.



**Figura 3.** Índice de Velocidade de Emergência (IVE) de plantas do banco de sementes de *topsoil* de campo rupestre ferruginosos sob diferentes umidades e presença e ausência de manta projetada nas diferentes umidades de 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da capacidade de campo (CC). Médias seguidas de

mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras verticais denotam erro padrão em torno da média.

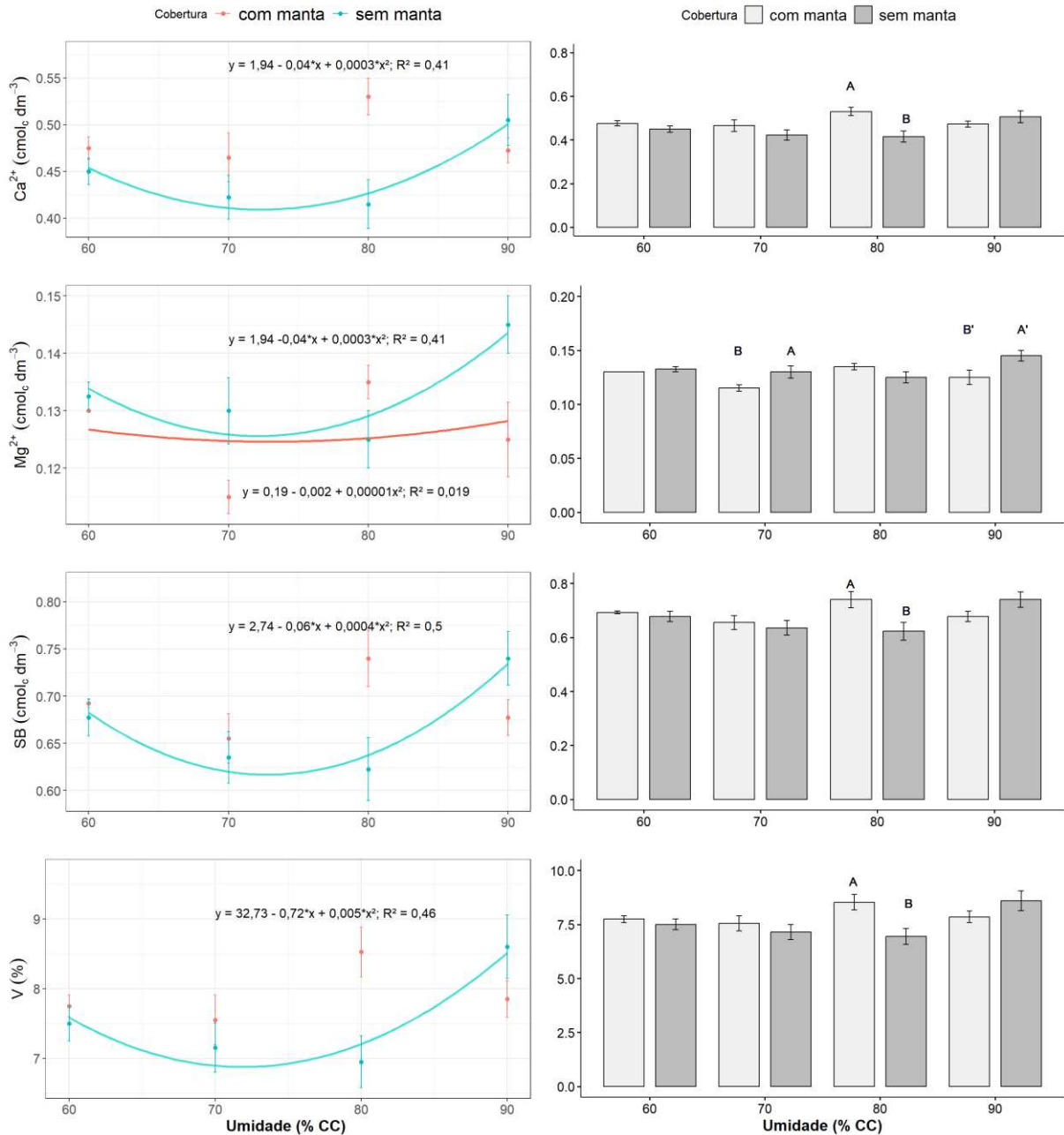
Os índices de diversidade analisados não obtiveram interação significativa para os fatores de estudo propostos. O Índice de Pielou não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos. Os índices de Shannon e Simpson diferiram apenas entre as coberturas, manifestando os maiores valores na ausência da manta projetada (Figura 4).



**Figura 4.** Índice de diversidade de Shannon e Simpson para espécies do banco de sementes de *topsoil* de campo rupestre ferruginoso com e sem manta projetada. Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras verticais denotam erro padrão em torno da média.

Amostras de solo de cada unidade experimental foram submetidas às análises após os 180 dias de avaliação da emergência das plantas. O teor de  $\text{Ca}^{2+}$  apresentou resposta quadrática positiva em função da umidade do solo apenas na ausência da manta, com maiores teores para o maior valor de umidade (90 % CC) (Figura 5). Comparando as coberturas, diferenças significativas foram encontradas apenas para a umidade de 80 % da CC, com maiores valores de  $\text{Ca}^{2+}$  na presença da manta. Para o  $\text{Mg}^{2+}$  ambas as condições de cobertura apresentaram resposta quadrática positiva em função da umidade do solo, sendo mais expressiva na ausência da manta. As diferenças entre coberturas foram observadas para as umidades de 70 % e 90 % da CC, em ambas as condições os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  foram superiores na ausência da manta (Figura 5). A soma de bases e a saturação por bases, como esperado, apresentaram respostas semelhantes, com efeito significativo da umidade apenas na ausência da manta, aumentando seus valores apenas no maior valor de umidade. Na avaliação das coberturas dentro de cada

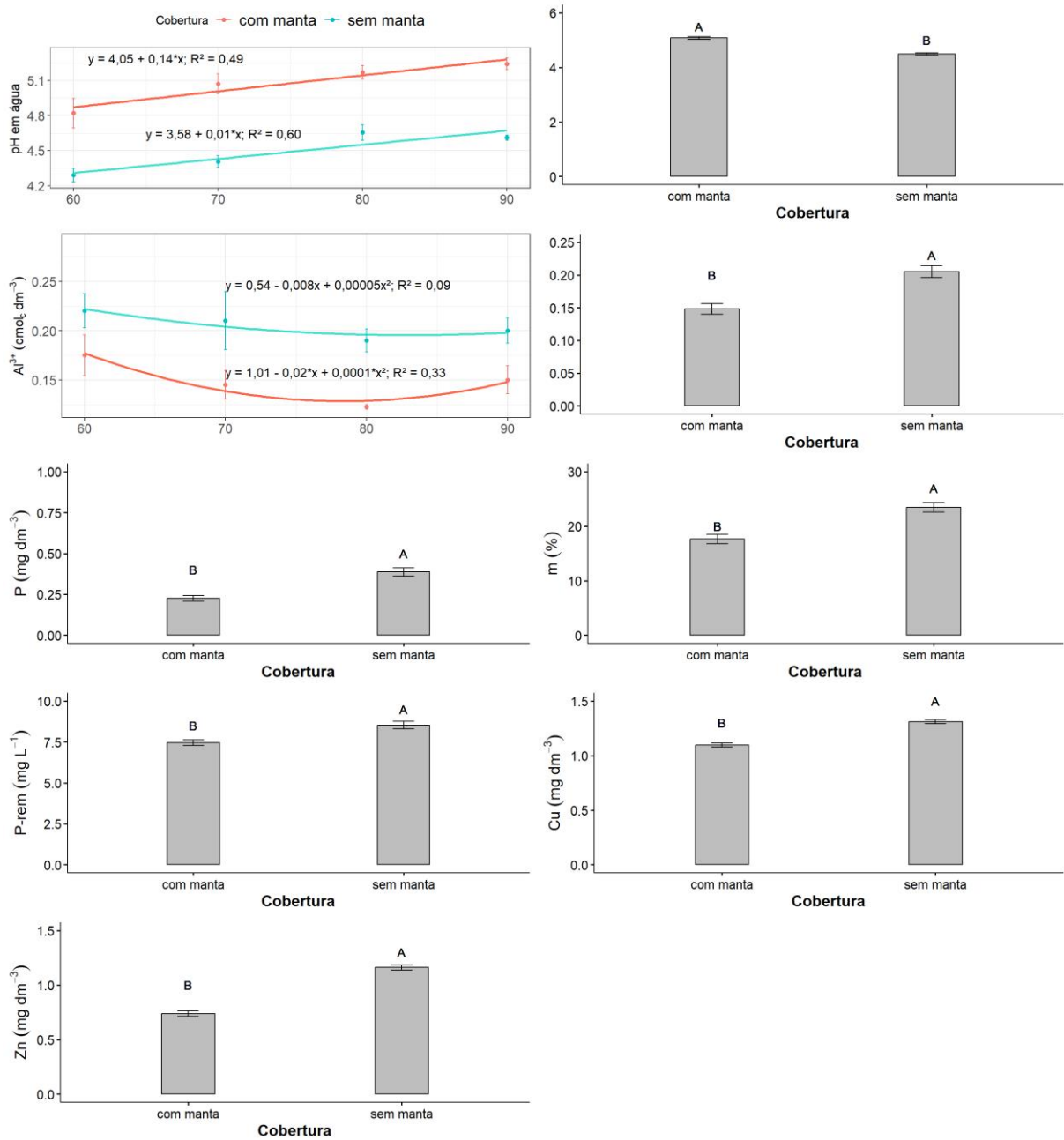
umidade, diferença significativa foi encontrada apenas na umidade de 80 % da CC, e em ambos os valores de SB e V % foram maiores na presença da manta projetada (Figura 5).



**Figura 5.** Teores de Ca<sup>2+</sup> (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Mg<sup>2+</sup> (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), SB (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e V (%) do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso com e sem manta projetada nas diferentes umidades de 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da capacidade de campo (CC). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05). Barras verticais denotam erro padrão em torno da média. Coeficientes seguidos de \* indicam significância a p < 0,05.

O pH em água aumentou linearmente com o aumento da umidade do solo, na presença e na ausência da manta, com maiores valores no solo com presença da manta (Figura 6).

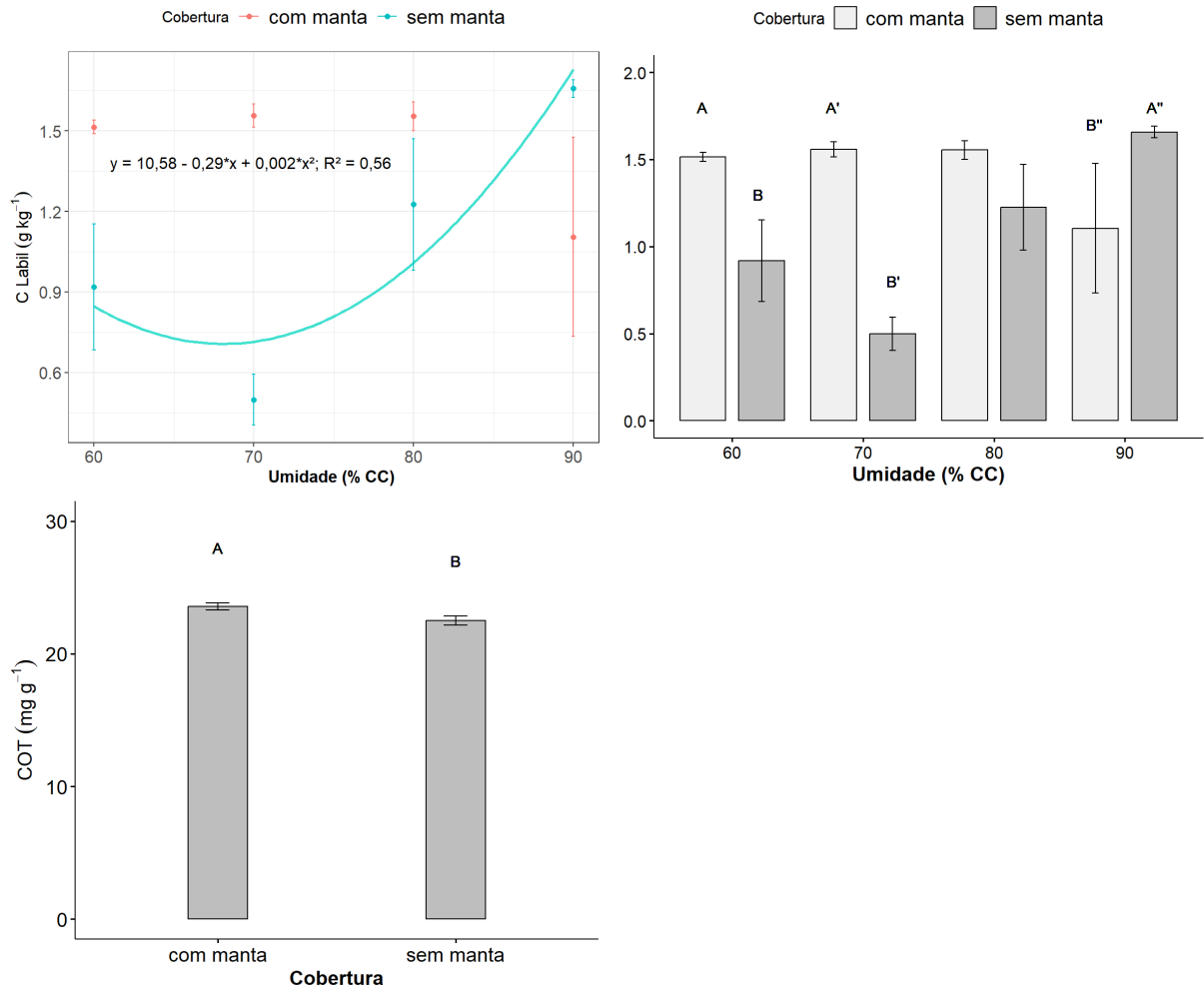
Avaliando o efeito de cobertura, não houve diferenças entre as umidades, e de maneira geral a presença da manta propiciou maiores valores de pH (10,20 %). O alumínio trocável, tóxico às plantas, apresentou respostas quadráticas positivas em função da umidade do solo, com tendência de redução com o aumento da umidade em ambas as coberturas. Avaliando-se o efeito de cobertura, não houve diferenças significativas entre as umidades e de maneira geral, o teor de  $\text{Al}^{3+}$  foi maior no solo sem manta (27,80 %). A saturação por alumínio foi maior no solo sem manta e não houve diferença entre as umidades. Os teores de fósforo, zinco e cobre disponíveis foram diferentes apenas quanto a presença da manta, não havendo efeito da umidade do solo. A ausência de manta propiciou maiores teores disponíveis destes elementos no solo. Da mesma forma, os valores de P-rem, que dá ideia da quantidade e qualidade da argila existente nestes solos, foram superiores no solo com ausência da manta (Figura 6). Embora diferenças significativas entre os tratamentos tenham sido encontradas, os teores disponíveis de fósforo apresentaram médias de  $0,39 \text{ mg dm}^{-3}$  no solo sem manta e  $0,26 \text{ mg dm}^{-3}$  no solo com manta, ambas classificadas como muito baixo segundo critérios estabelecidos pela 5ª Aproximação para interpretação de análises do solo (ALVAREZ, V. V. H. et.al., 1999).



**Figura 6.** pH em água, Al<sup>3+</sup> (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), teor disponível de P (mg dm<sup>-3</sup>), m (%), P-rem (mg l<sup>-1</sup>), teor disponível de Cu (mg dm<sup>-3</sup>) e Zn (mg dm<sup>-3</sup>) do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso com e sem manta projetada nas diferentes umidades de 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da capacidade de campo (CC). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras verticais denotam erro padrão em torno da média. Coeficientes seguidos de \* indicam significância a  $p < 0,05$ .

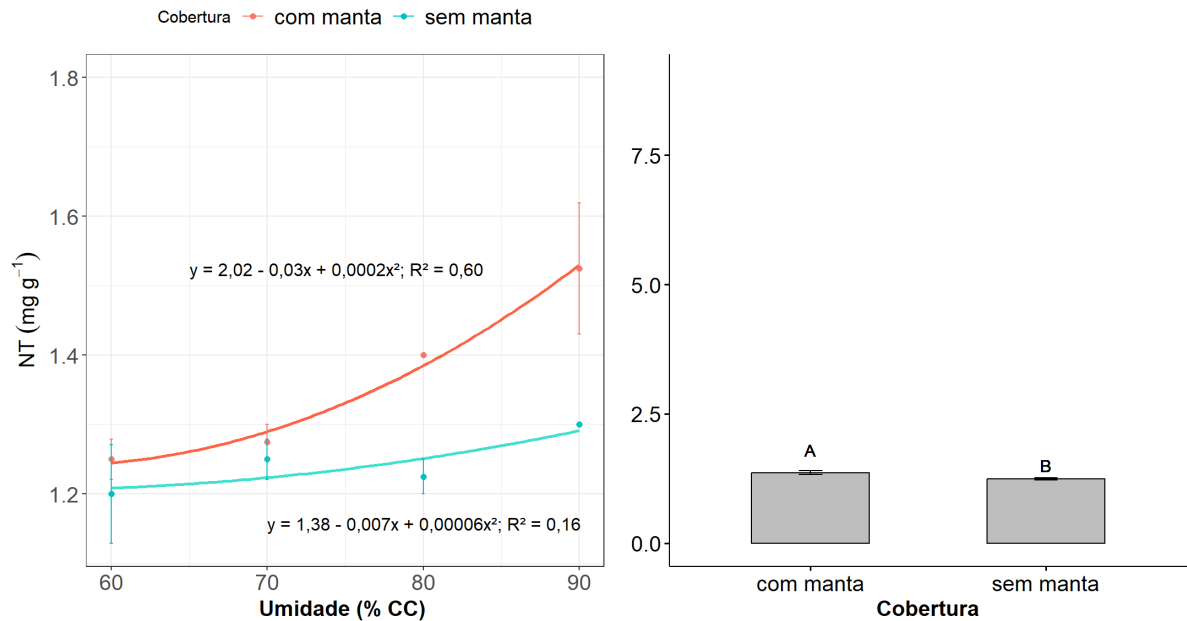
O carbono lábil do solo apresentou diferença significativa para as coberturas e em função dos níveis de umidade. O carbono orgânico total do solo foi diferente apenas entre as coberturas, não havendo efeito das umidades (Figura 7). Avaliando o efeito da cobertura para cada nível de umidade, o carbono lábil apresentou diferenças para as umidades de 60 %, 70 % e 90 % da CC, com as maiores diferenças observadas nas menores umidades. Apenas na

umidade de 90 % da CC o carbono lábil foi maior na ausência de cobertura. Nas demais umidades, o solo com manta apresentou maior teor de carbono lábil. O efeito da umidade apresentou resposta quadrática positiva na ausência da manta, não havendo efeito significativo na presença da manta. O carbono orgânico total do solo foi diferente entre as coberturas e apresentou maiores médias na presença de manta.



**Figura 7.** Teores de carbono lábil ( $\text{g kg}^{-1}$ ), COT ( $\text{mg g}^{-1}$ ) do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso com e sem manta projetada nas diferentes umidades de 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da capacidade de campo (CC). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras verticais denotam erro padrão em torno da média. Coeficientes seguidos de \* indicam significância a  $p < 0,05$ .

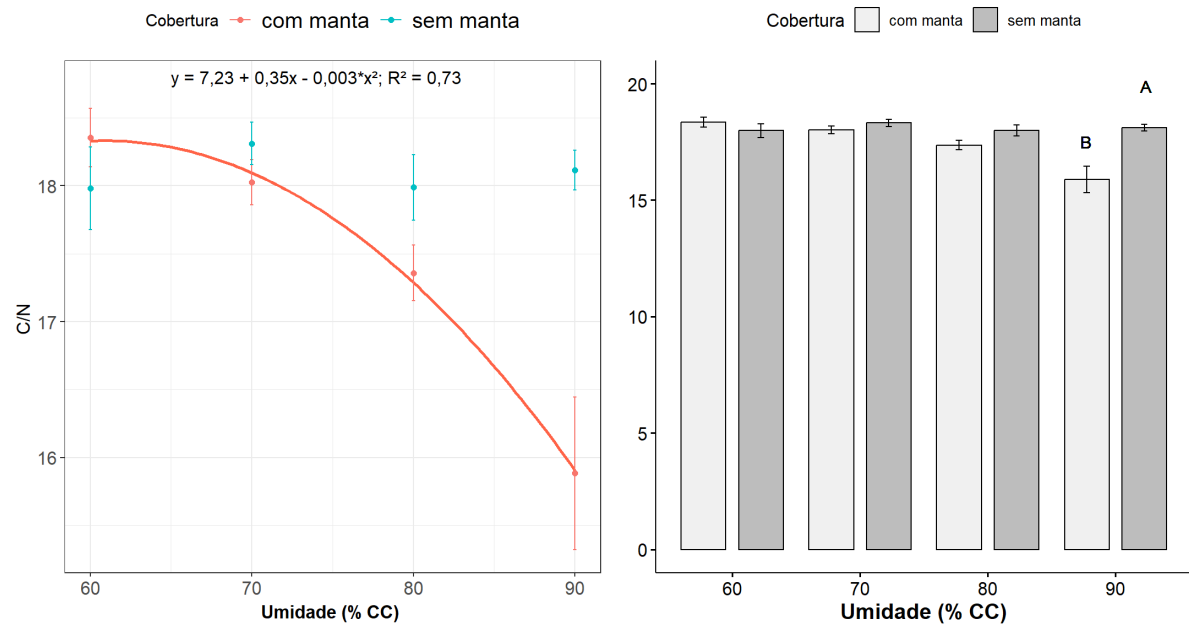
O efeito da interação entre os fatores cobertura e umidade não foi significativa para o teor de nitrogênio total no solo, foram então analisados os efeitos isolados (Figura 8). Os teores de NT responderam de forma quadrática positiva em função da umidade do solo em ambas as condições de cobertura, e os teores de nitrogênio total foram maiores na presença da manta comparativamente ao solo sem manta.



**Figura 8.** Teores de nitrogênio total ( $\text{mg g}^{-1}$ ) do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso com e sem manta projetada nas diferentes umidades de 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da capacidade de campo (CC). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras verticais denotam erro padrão em torno da média.

A relação carbono e nitrogênio do solo foi avaliada e apresentou interação significativa entre os fatores (Figura 9). Avaliando a cobertura dentro de cada nível de umidade, apenas na umidade 90 % da CC as médias foram diferentes, com maiores valores na ausência da manta. Avaliando o efeito de umidade para cada cobertura, apenas na presença da manta houve resposta significativa, com a relação C/N respondendo de forma quadrática negativa, expressando menor valor a 90 % da CC.

A correlação linear de Pearson entre as variáveis do solo e o número de indivíduos aos 180 dias de experimento foi avaliada e os resultados estão apresentados em anexo (Tabela 16). Não foi encontrada nenhuma correlação significativa ( $p < 0,05$ ), indicando que as variáveis de solos analisadas não explicaram claramente as diferenças encontradas quanto ao crescimento de plantas nos tratamentos avaliados.



**Figura 9.** Relação C/N do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso com e sem manta projetada nas diferentes umidades de 60 %, 70 %, 80 % e 90 % da capacidade de campo (CC). Médias seguidas de mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras verticais denotam erro padrão em torno da média. Coeficientes seguidos de \* indicam significância a  $p < 0,05$ .

#### 4. DISCUSSÃO

A manta influenciou negativamente na germinação das sementes do *topsoil*. Sabe-se que geralmente sementes pequenas são fotoblásticas positivas, ou seja, dependem da luz para germinarem e que estas possuem uma baixa reserva energética (ABREU; GARCIA, 2005; GARCIA; DINIZ, 2003). Por serem dependentes da luz, apenas as sementes localizadas na superfície do solo germinam, as que estão localizadas em profundidade encontram dificuldade para germinação pela incidência de luz insuficiente para a quebra da dormência. A manta funcionou como uma barreira física que impediu a passagem da luz, influenciando negativamente na germinação das sementes e dificultou a emergência das plântulas. Das sementes que por ventura conseguiram germinar nessas condições, a reduzida reserva energética foi limitante para as plântulas vencerem a barreira física formada pela manta e emergirem na superfície, ou ainda, apresentaram uma redução na velocidade de emergência quando comparado com as que não tiveram a manta como barreira. Resultados semelhantes foram encontrados em estudos com aplicação de serrapilheira, onde a adição de camadas mais espessas da serrapilheira reduziu a incidência de luz e criou ambiente inadequados a germinação das sementes e emergência de plântulas (ECKSTEIN; DONATH, 2005; XIONG; NILSSON, 1999).

O Índice de Velocidade de Emergência (IVE) apresentou diferença significativa na interação umidade e cobertura. Maiores valores do índice foram encontrados na ausência de manta, a maior velocidade de emergência nessas condições pode ser justificada pela ausência da barreira física imposta pela manta. Estudos mostram que o IVE é influenciado pela qualidade física do substrato e pela umidade, havendo uma redução do IVE com aumento da umidade do solo, pelo fato da umidade influenciar na aeração e troca gasosas reduzindo as reações bioquímicas no processo de germinação da semente (CAVALCANTE et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2020).

A germinação das sementes de espécies de campos rupestres ocorre em uma ampla faixa de temperatura e que temperaturas constantes favorecem a germinação de determinadas espécies deste ambiente (ABREU; GARCIA, 2005; GARCIA; BARROS; LEMOS FILHO, 2006; GARCIA; DINIZ, 2003; SILVEIRA; NEGREIROS; FERNANDES, 2004). Apesar da manutenção da umidade e temperatura no solo proporcionado pela manta, não foram observadas espécies específicas desse ecossistema, a temperatura e o tempo de avaliação podem não terem sido suficientes para quebrar a dormência das sementes de espécies de campos rupestres.

O Índice de Shannon na ausência de manta foi cerca de 1,5 x maior do que o encontrado para condição com manta. Rakotomanga et al., (2021) mostraram que o manejo do solo pode afetar a vegetação de espécies espontâneas e reduzir a sua diversidade. Estudos que avaliaram a diversidade de espécies do banco de sementes do solo em diferentes ambientes encontraram resultados para o Índice de Shannon menores que 2 (CUI et al., 2013; GOMAA, 2012). Corroborando com os resultados encontrados para o *topsoil* sob condições de ausência e presença de manta.

Análises do solo foram realizadas após a desmontagem do experimento afim de avaliar as diferenças no crescimento da vegetação nas unidades experimentais, entretanto não explicaram claramente as diferenças encontradas quanto ao crescimento de plantas. A disponibilidade de nutrientes foi maior na presença da manta, entretanto essa diferença não apresenta alterações expressivas na prática em termos nutricionais para as plantas que ali germinaram. Em ambas as condições, com e sem manta, os teores disponíveis dos macronutrientes, a soma de bases e a saturação por bases se enquadram como baixo ou muito baixo segundo os critérios de avaliação de análises do solo estabelecidos na 5ª Aproximação, não justificando quanto a nutrição o maior número de plantas encontrados na condição sem manta.

Maiores teores de carbono e nitrogênio foram encontrados nos tratamentos com manta. Lugato; Berti; Giardini, (2006) mostrou que o incremento de resíduo para a cobertura do solo aumentou o teor de carbono orgânico do solo e que há uma relação positiva entre a fertilização e a presença de resíduos de cobertura. Estes resultados corroboram com os maiores teores de carbono e nitrogênio encontrados na presença da manta. A presença da cobertura cria condições adequadas, de temperatura e umidade, para a atividade microbológica e aumenta atividade enzimática acelerando a decomposição e a ciclagem de nutrientes (STEFANI et al., 2023; SUN et al., 2022; YANG et al., 2020).

## **5. CONCLUSÕES**

A manta influenciou negativamente na emergência de plântulas e na diversidade das espécies. A presença da manta pode ter criado ambiente inadequado para a germinação das sementes. Apesar do uso da manta não apresentar resultados favoráveis ao crescimento da vegetação, a longo prazo, ao ser degradada a manta pode ser fonte de nutrientes e carbono para o solo.

A umidade não foi significativa quanto a diferença no número de indivíduos, mas esta influenciou no pH, conseqüentemente na disponibilidade de nutrientes e na velocidade de emergência das plântulas, mostrando ser importante o seu controle. Observações em períodos mais longos são necessárias para avaliação da contribuição desses fatores no solo e no estabelecimento da vegetação.

## 6. REFERÊNCIAS

ABREU, M. E. P.; GARCIA, Q. S. Efeito da luz e da temperatura na germinação de sementes de quatro espécies de *Xyris* L. (Xyridaceae) ocorrentes na Serra do Cipó, MG, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 1, p. 149–154, mar. 2005.

ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais**: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 43-60.

ANDRADE AMARAL, L. et al. Viability of using topsoil ferruginous yoke in the restoration of a waste dump. **Bosque (Valdivia)**, v. 37, n. 2, p. 379–387, 2016.

BASTO, S.; THOMPSON, K.; REES, M. The effect of soil pH on persistence of seeds of grassland species in soil. **Plant Ecology**, v. 216, n. 8, p. 1163–1175, 12 ago. 2015.

BLAIR, G.; LEFROY, R.; 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**, v. 46, n. 7, p. 1459, 1995.

CARMO, F. F. DO; JACOBI, C. M. A vegetação de canga no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: caracterização e contexto fitogeográfico. **Rodriguésia**, v. 64, n. 3, p. 527–541, set. 2013.

CAVALCANTE, H. S. et al. Decomposed Babassu Biomass: New Substrate for the Production of Jacaranda mimosifolia D. Don Seedlings. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 2, 2021.

CHEN, F.-Q.; WANG, C.-H.; JIA, G.-M. Ecology of *Salix variegata* seed germination: Implications for species distribution and conservation in the Three Gorges region. **South African Journal of Botany**, v. 88, p. 243–246, set. 2013.

CHEN, F.-Q.; XIE, Z.-Q. Reproductive allocation, seed dispersal and germination of *Myricaria laxiflora*, an endangered species in the Three Gorges Reservoir area. **Plant Ecology**, v. 191, n. 1, p. 67–75, 10 jul. 2007.

CUI, N. et al. A field study on seed bank and its potential applications in vegetation restoration of a polluted urban river in China. **Ecological Engineering**, v. 60, p. 37–44, nov. 2013.

DOUH, C. et al. Soil seed bank characteristics in two central African forest types and implications for forest restoration. **Forest Ecology and Management**, v. 409, p. 766–776, fev. 2018.

DU, Z. et al. Responses of soil seed banks to drought on a global scale. **Science of The Total Environment**, v. 864, p. 161142, mar. 2023.

ECKSTEIN, R. L.; DONATH, T. W. Interactions between litter and water availability affect seedling emergence in four familial pairs of floodplain species. **Journal of Ecology**, v. 93, n. 4, p. 807–816, ago. 2005.

Embrapa, 2017. Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF.

FACELLI, J. M.; PICKETT, S. T. A. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure. **The Botanical Review**, v. 57, n. 1, p. 1–32, jan. 1991.

FELFILI, M. C.; FELFILI, J. M. Diversidade alfa e beta no cerrado sensu strictu da Chapada Pratinha, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 15, n. 2, p. 243–254, ago. 2001.

FERREIRA, M. C.; WALTER, B. M. T.; VIEIRA, D. L. M. Topsoil translocation for Brazilian savanna restoration: propagation of herbs, shrubs, and trees. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 6, p. 723–728, nov. 2015.

GARCIA, L. C.; BARROS, F. D. V.; LEMOS FILHO, J. P. Comportamento germinativo de duas espécies de canga ferrífera: *Baccharis retusa* DC. (Asteraceae) e *Tibouchina multiflora* Cogn. (Melastomataceae). **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 2, p. 443–448, abr. 2006.

GARCIA, Q. S.; DINIZ, I. S. S. Comportamento germinativo de três espécies de *Vellozia* da Serra do Cipó, MG. **Acta Botanica Brasilica**, v. 17, n. 4, p. 487–494, dez. 2003.

GOMAA, N. H. Soil seed bank in different habitats of the Eastern Desert of Egypt. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 19, n. 2, p. 211–220, abr. 2012.

GONÇALVES, J. R. M. R.; MARTINS, F. B. DA S.; CORREIA, R. M. Reutilização de topsoil: uma solução sustentável na restauração de áreas degradadas. **J. of Develop**, v. 6, n. 1, p. 4303–4308, 2020.

GROMBONE-GUARATINI, M. T.; LEITÃO FILHO, H. DE F.; KAGEYAMA, P. Y. The seed bank of a gallery forest in Southeastern Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 5, p. 793–797, set. 2004.

JACOBI, C. M. et al. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, v. 16, n. 7, p. 2185–2200, 7 jun. 2007.

JACOBI, C. M.; CARMO, F. F. DO; VINCENT, R. DE C. Estudo fitossociológico de uma comunidade vegetal sobre canga como subsídio para a reabilitação de áreas mineradas no quadrilátero ferrífero, MG. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 345–353, abr. 2008.

JR, D. L. S. Aplicação de índices de diversidade em estudos envolvendo associações entre foraminíferos e tecamebas recentes: uma breve discussão. n. 1988, 1999.

LUGATO, E.; BERTI, A.; GIARDINI, L. Soil organic carbon (SOC) dynamics with and without residue incorporation in relation to different nitrogen fertilisation rates. **Geoderma**, v. 135, p. 315–321, nov. 2006.

MANGUIRE, J. D. Speed of germination: aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v. 2, p. 176–177, 1962.

MESSIAS, M. C. T. B. et al. Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 1, p. 230–242, mar. 2012.

OLIVEIRA, M. DE F. DE C. et al. Germination and Initial Seedling Growth of *Schizolobium amazonicum* on Different Substrates and Irrigation Depths. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 1, 2020.

RAKOTOMANGA, D. et al. Cover crops combined with soil tillage impact the spontaneous species density, richness and diversity in banana cover cropping systems. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, n. 3, p. 37, 5 jun. 2021.

REZENDE, L. A. L. et al. Topsoil depth influences the recovery of rupestrian grasslands degraded by mining. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 8 dez. 2021.

SCHAEFER, C. E. et al. Soils Associated with Rupestrian Grasslands. Em: **Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 55–69.

SILVEIRA, F. A. O.; NEGREIROS, D.; FERNANDES, G. W. Influência da luz e da temperatura na germinação de sementes de *Marcetia taxifolia* (A. St.-Hil.) DC. (Melastomataceae). **Acta Botanica Brasilica**, v. 18, n. 4, p. 847–851, 1 out. 2004.

SKIRYCZ, A. et al. Canga biodiversity, a matter of mining. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, 24 nov. 2014.

STEFANI, F. et al. Does wood mulch trigger microbially mediated positive plant-soil feedback in degraded boreal forest sites? A post hoc study. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 3 maio 2023.

SUN, X. et al. Organic Mulching Increases Microbial Activity in Urban Forest Soil. **Forests**, v. 13, n. 9, p. 1352, 25 ago. 2022.

XIONG, S.; NILSSON, C. The effects of plant litter on vegetation: a meta-analysis. **Journal of Ecology**, v. 87, n. 6, p. 984–994, dez. 1999.

YANG, H. et al. The combined effects of maize straw mulch and no-tillage on grain yield and water and nitrogen use efficiency of dry-land winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Soil and Tillage Research**, v. 197, p. 104485, mar. 2020.

YANG, X. et al. Global patterns of potential future plant diversity hidden in soil seed banks. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 7023, 2 dez. 2021.

ZHOU, Q. et al. Survivorship of plant species from soil seedbank after translocation from subtropical natural forests to plantation forests. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 741–747, jan. 2019.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estabelecimento de vegetação em pilhas de estéril é um grande desafio devido a heterogeneidade e baixa fertilidade do material. Mesmo após aplicação das técnicas de bioengenharia e aplicação de elevada carga de nutrientes, as características do substrato não apresentaram melhoria expressiva havendo redução da área coberta pela vegetação no período avaliado. Apesar do *topsoil* proporcionar melhorias químicas e físicas ao substrato, não foram observadas melhores respostas quanto a vegetação e recobrimento da área, avaliações a longo prazo são necessárias.

Das técnicas de bioengenharia utilizadas a biomanta apresentou os melhores resultados quanto a cobertura vegetal, porém essa técnica demanda mão de obra e custos mais elevados para a sua aplicação quando comparados a manta projetada. Atualmente a manta projetada é a técnica mais utilizada para a recuperação de pilhas de estéril, entretanto esta cobertura não apresentou resultados significativamente melhores e não se destacou entre os demais tratamentos.

O uso de mantas em consórcio com *topsoil* não se mostrou eficiente quanto ao recrutamento de espécies e estabelecimento da vegetação. A manta influenciou negativamente na germinação do banco de sementes do *topsoil*, apresentando um menor número de plantas quando comparado a ausência da manta.

## ANEXO

**Tabela 1.** Resultados das análises químicas e físicas do substrato avaliados na camada de 0-2,5 cm de profundidade

Atributo	Coberturas				
	H	B	MP	T	T+H
EU (kg kg <sup>-1</sup> )	0,20	0,23	0,20	0,20	0,20
Areia Grossa (kg kg <sup>-1</sup> )	0,19	0,15	0,16	0,20	0,20
Areia Fina (kg kg <sup>-1</sup> )	0,11	0,11	0,13	0,06	0,08
Silte (kg kg <sup>-1</sup> )	0,42	0,48	0,50	0,28	0,36
Argila (kg kg <sup>-1</sup> )	0,28	0,26	0,21	0,47	0,37
Dp (g cm <sup>-3</sup> )	3,47	3,17	3,22	3,06	3,11
ADA (kg kg <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Índice de Dispersão	0,04	0,01	0,02	0,00	0,01
Índice de Floculação	0,96	0,99	0,98	1,00	0,99
pH H <sub>2</sub> O	6,16	6,12	6,27	5,75	5,88
pH KCl	6,11	5,92	6,11	5,42	5,56
P (mg dm <sup>-3</sup> )	4,50	51,87	9,50	1,37	9,83
K (mg dm <sup>-3</sup> )	24,33	47,67	21,67	61,00	39,67
Na (mg dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,44	1,22	0,81	0,25	0,73
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,05	0,00	0,02	0,16
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,67	0,83	0,37	3,13	2,40
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,50	1,39	0,87	0,42	0,99
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,50	1,39	0,87	0,42	0,99
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,00	2,22	1,23	3,56	2,26
V (%)	43,07	62,43	67,93	11,97	31,37
m (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	0,27	0,72	0,22	1,77	1,51
P-rem (mg l <sup>-1</sup> )	6,90	24,70	15,30	9,27	14,03
S (mg dm <sup>-3</sup> )	40,57	18,40	36,80	7,30	18,73
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,29	0,32	0,21	0,54	0,53
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	24,53	47,50	26,23	26,30	26,43
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	33,67	20,83	22,63	66,33	44,53
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,86	3,01	1,09	1,55	0,93

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura. Eu: equivalente de umidade; Dp: densidade de partícula; ADA: argila dispersa em água; P: fósforo disponível; K: potássio disponível, Na: sódio; Ca<sup>2+</sup>: cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup>: magnésio trocável; Al<sup>3+</sup>: alumínio trocável; H+Al: acidez potencial; SB: soma de base; t: CTC efetiva, T: CTC a pH 7; V: saturação por base; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; P-Rem: fósforo remanescente; S: enxofre disponível; Cu: cobre disponível; Mn: Manganês disponível; Fe: ferro disponível; Zn: Zinco disponível.

**Tabela 2.** Resultados das análises químicas e físicas do substrato avaliados na camada de 2,5-10 cm de profundidade

Atributos	Coberturas				
	H	B	MP	T	T+H
EU (kg kg <sup>-1</sup> )	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21
Areia Grossa (kg kg <sup>-1</sup> )	0,17	0,15	0,16	0,17	0,17
Areia Fina (kg kg <sup>-1</sup> )	0,11	0,10	0,11	0,08	0,09
Silte (kg kg <sup>-1</sup> )	0,43	0,50	0,52	0,43	0,45
Argila (kg kg <sup>-1</sup> )	0,29	0,26	0,21	0,32	0,30
Dp (g cm <sup>-3</sup> )	3,23	3,16	2,97	3,07	2,97
ADA (kg kg <sup>-1</sup> )	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00
Índice de Dispersão	0,06	0,01	0,05	0,01	0,01
Índice de Floculação	0,94	0,99	0,95	0,99	0,99
pH H <sub>2</sub> O	6,06	5,89	5,86	5,59	5,66
pH KCl	6,06	5,74	5,78	5,48	5,54
P (mg dm <sup>-3</sup> )	3,43	26,37	7,40	3,00	5,87
K (mg dm <sup>-3</sup> )	18,33	28,33	13,00	46,67	25,67
Na (mg dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,63	0,00
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,40	0,78	0,59	0,49	0,48
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,02	0,00	0,01	0,12
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,73	0,80	0,93	1,80	1,67
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,44	0,87	0,62	0,63	0,67
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,44	0,87	0,62	0,63	0,67
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,18	1,67	1,26	2,43	2,33
V (%)	39,60	47,97	46,47	25,77	30,00
m (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	0,13	0,47	0,16	0,95	0,82
P-rem (mg l <sup>-1</sup> )	6,13	21,20	16,00	13,37	16,27
S (mg dm <sup>-3</sup> )	39,67	28,03	31,93	25,67	27,80
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,24	0,27	0,13	0,31	0,38
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	20,13	34,20	19,40	25,53	29,67
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	29,03	25,60	23,50	34,17	35,30
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,70	1,59	0,72	1,43	0,86

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura. Eu: equivalente de umidade; Dp: densidade de partícula; ADA: argila dispersa em água; P: fósforo disponível; K: potássio disponível, Na: sódio; Ca<sup>2+</sup>: cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup>: magnésio trocável; Al<sup>3+</sup>: alumínio trocável; H+Al: acidez potencial; SB: soma de base; t: CTC efetiva, T: CTC a pH 7; V: saturação por base; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; P-Rem: fósforo remanescente; S: enxofre disponível; Cu: cobre disponível; Mn: Manganês disponível; Fe: ferro disponível; Zn: Zinco disponível.

**Tabela 3.** Resultados da análise dos teores de nutrientes na planta

Nutrientes na planta (mg kg <sup>-1</sup> )	Cobertura				
	H	B	MP	T	T+H
----- Coleta maio/2022 -----					
S	1165,22	1386,77	1537,54	1887,68	1916,00
K	20315,38	8306,66	15677,72	17173,77	13429,27
Mg	1638,38	1974,15	2350,71	2718,72	2949,96
P	1761,02	2132,44	1788,89	2218,61	2036,00
B	22,10	16,74	20,61	24,50	23,99
Ca	16759,31	9697,67	13670,80	15483,12	12011,37
Zn	12,40	32,55	22,73	30,81	36,31
Cu	2,44	4,15	3,69	5,47	4,01
Mn	169,27	281,88	779,67	321,58	602,19
Fe	9416,68	5119,16	8443,67	10837,53	18754,87
----- Coleta julho/2022 -----					
S	1272,45	1230,27	1492,68	1767,66	1580,21
K	18795,29	10070,14	12192,49	16160,31	14598,17
Mg	1557,49	1629,11	1864,32	2419,55	2363,20
P	1397,07	1374,05	1332,48	1326,24	1268,13
B	17,36	15,96	17,18	17,28	16,07
Ca	15009,86	10244,60	7670,12	13161,53	10914,57
Zn	15,07	23,57	22,70	21,95	22,46
Cu	5,49	4,89	5,82	5,86	6,42
Mn	166,59	216,96	336,37	304,43	398,57
Fe	10668,16	12395,88	26216,05	12296,61	16532,12

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura.

**Tabela 4.** Porcentagem de área coberta pela vegetação nos meses de maio e julho de 2022 e março de 2023.

Área coberta (%)	Cobertura				
	H	B	MP	T	T+H
Maio/22	50,17	61,41	54,62	60,88	31,80
Julho/22	61,42	75,36	60,42	61,32	56,72
Março/23	49,90	64,63	43,24	39,00	31,84

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura.

**Tabela 5.** Quantificação da biomassa seca nos meses de maio e julho de 2022

Cobertura	Biomassa seca	
	maio/2022	julho/2022
	----- kg -----	
H	12,99	31,15
B	9,23	41,89
MP	11,02	46,99
T	6,78	25,21
T+H	6,18	16,28

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura.

**Tabela 6.** Teores semi-totais dos elementos no substrato avaliados na profundidade de 0-2,5 cm

Elementos (mg kg <sup>-1</sup> )	Cobertura				
	H	B	MP	T	T+H
As	17,45	7,02	4,56	11,71	8,41
Mn	845,90	421,43	691,76	285,40	414,68
Ni	12,66	11,97	8,06	4,51	6,99
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	200936,98	184978,21	191317,86	190004,52	186205,49
Al	16178,03	16494,85	9224,89	89538,64	66127,39
Zn	12,28	15,84	34,64	9,81	19,29
Cu	60,28	41,66	42,97	28,73	34,80
Co	0,49	0,39	0,48	0,00	0,20
Cr	49,73	44,23	23,54	129,38	93,50

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura. LQP: As: 0,006401; Mn: 0,00001; Ni: 0,00003; Pb: 0,00362; Fe: 0,00424; Al: 0,00129; Zn: 0,00071; Cu: 0,00030; Co: 0,00002; Cr: 0,00013.

**Tabela 7.** Teores semi-totais dos elementos no substrato avaliados na profundidade de 2,5-10 cm

Elementos (mg kg <sup>-1</sup> )	Cobertura				
	H	B	MP	T	T+H
As	16,59	8,39	4,10	10,52	8,38
Mn	708,65	446,98	707,69	472,53	479,97
Ni	13,33	11,62	8,40	10,04	12,62
Pb	0,00	2,87	0,95	2,21	4,38
Fe	194364,56	171552,31	175981,05	180969,08	174871,22
Al	16442,32	13863,89	8567,70	43134,15	40549,76
Zn	24,91	40,32	51,53	23,25	697,25
Cu	61,06	51,16	66,47	45,52	60,05
Co	0,44	0,29	1,38	0,00	1,00
Cr	51,46	40,35	22,84	77,87	67,12

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura. LQP: As: 0,006401; Mn: 0,00001; Ni: 0,00003; Pb: 0,00362; Fe: 0,00424; Al: 0,00129; Zn: 0,00071; Cu: 0,00030; Co: 0,00002; Cr: 0,00013.

**Tabela 8.** Resultados das análises do Carbono no substrato na profundidade de 0-2,5 cm

Atributos	Cobertura				
	H	B	MP	T	T+H
RB (mg C-CO <sub>2</sub> g solo <sup>-1</sup> hora <sup>-1</sup> )	14,65	25,87	20,37	20,49	23,50
CBM (mg C g solo <sup>-1</sup> )	41,90	75,16	36,45	89,41	91,17
C Lábil (g kg <sup>-1</sup> )	0,16	0,59	0,07	0,90	0,60
COT (mg C g solo <sup>-1</sup> )	2,37	4,78	2,20	12,31	9,54
C MAM (mg C g solo <sup>-1</sup> )	1,84	3,20	1,69	10,65	8,06
C MOP (mg C g solo <sup>-1</sup> )	0,53	1,58	0,52	1,66	1,49
qmic (%)	1,78	1,65	1,74	0,76	0,86
qCO <sub>2</sub>	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura. RB: respiração basal; CBM: carbono da biomassa microbiana; C lábil: carbono lábil; C MAM: matéria orgânica associada a fração mineral; C MOP: matéria orgânica particulada; qmic: quociente microbiano; qCO<sub>2</sub>: quociente metabólico.

**Tabela 9.** Resultados das análises do Carbono no substrato na profundidade de 2,5-10 cm

Atributos	Cobertura				
	H	B	MP	T	T+H
RB (mg C-CO <sub>2</sub> g solo <sup>-1</sup> hora <sup>-1</sup> )	22,03	14,05	15,06	17,99	10,50
CBM (mg C g solo <sup>-1</sup> )	69,82	53,64	52,20	67,85	74,29
C Lábil (g kg <sup>-1</sup> )	0,01	0,19	0,02	0,25	0,27
COT (mg C g solo <sup>-1</sup> )	2,28	3,51	2,04	5,82	5,28
C MAM (mg C g solo <sup>-1</sup> )	1,80	2,45	1,63	4,97	4,50
C MOP (mg C g solo <sup>-1</sup> )	0,48	1,06	0,41	0,86	0,78
qmic (%)	3,04	1,75	2,56	1,19	1,48
qCO <sub>2</sub>	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura. RB: respiração basal; CBM: carbono da biomassa microbiana; C lábil: carbono lábil; C MAM: matéria orgânica associada a fração mineral; C MOP: matéria orgânica particulada; qmic: quociente microbiano; qCO<sub>2</sub>: quociente metabólico.

**Tabela 10.** Quantificação e resultados das análises físicas dos sedimentos

Atributos	Cobertura				
	H	B	MP	T	T+H
Massa (kg)	19,91	3,43	14,42	9,84	4,90
AG (kg kg <sup>-1</sup> )	0,17	0,06	0,10	0,13	0,16
AF (kg kg <sup>-1</sup> )	0,08	0,05	0,12	0,06	0,10
Silte (kg kg <sup>-1</sup> )	0,52	0,66	0,60	0,55	0,51
Argila (kg kg <sup>-1</sup> )	0,23	0,23	0,19	0,27	0,23
Dp (g cm <sup>-3</sup> )	3,30	3,13	3,29	3,11	3,11

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura. AG: areia grossa; AF: areia fina; Dp: densidade de partícula.

**Tabela 11.** Resultados das análises químicas dos sedimentos

Atributos	H	B	MP	T	T+H
pH H <sub>2</sub> O	6,23	6,13	6,62	5,82	6,21
P (mg dm <sup>-3</sup> )	8,53	14,03	13,63	6,83	8,17
K (mg dm <sup>-3</sup> )	344,33	23,67	19,00	28,33	43,00
S (mg dm <sup>-3</sup> )	28,27	16,07	24,17	29,43	21,00
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,73	0,70	1,00	0,57	0,81
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,01	0,11	0,03	0,07	0,21
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,63	0,89	0,72	0,75	0,95
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	59,03	80,60	78,87	63,73	84,67
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	40,10	58,40	42,10	48,33	64,83
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	10,96	31,84	22,57	31,49	29,51
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,62	0,87	1,08	0,71	1,13
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,70	0,83	0,47	1,17	1,13
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,62	0,87	1,08	0,71	1,13
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,32	1,70	1,55	1,88	2,26
V (%)	59,87	51,57	69,00	40,20	48,67
m (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	0,35	0,60	0,30	0,60	0,61
P-Rem (mg L <sup>-1</sup> )	7,40	26,40	16,43	15,30	17,60
COT (mg g <sup>-1</sup> )	2,10	3,03	2,10	3,13	3,90

H: hidrossemeadura; B: hidrossemeadura + biomanta; MP: hidrossemeadura + manta projetada; T: hidrossemeadura + *topsoil*; T+H: *topsoil* + hidrossemeadura. P: fósforo disponível; K: potássio disponível; S: enxofre disponível; Ca<sup>2+</sup>: cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup>: magnésio trocável; Al<sup>3+</sup>: alumínio trocável; Cu: cobre disponível; Mn: Manganês disponível; Fe: ferro disponível; Zn: Zinco disponível; SB: soma de base; H+Al: acidez potencial; t: CTC efetiva; T: CTC a pH 7; V: saturação por base; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; P-Rem: fósforo remanescente; COT: carbono orgânico total.

**Tabela 12.** Índices de Velocidade de Emergência (IVE) de plantas do banco de sementes do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso em condições de presença e ausência de manta nas umidades de 60, 70, 80 e 90 % CC

	Cobertura	Umidade (% CC)			
		60	70	80	90
IVE	Com manta	4,84	8,93	10,51	9,22
	Sem manta	32,05	17,93	28,79	17,76

IVE: índice de velocidade de emergência.

**Tabela 13.** Índices de diversidade de Shannon, Simpson e Pielou das espécies do banco de sementes do *topsoil* de campo rupestre ferruginoso em condições de presença e ausência de manta nas umidades de 60, 70, 80 e 90 % CC

Índices	Umidade (% CC)			
	60	70	80	90

	60	70	80	90
-----Com Manta-----				
Shannon	0,333	0,970	0,933	0,678
Pielou	0,480	0,977	0,720	0,726
Simpson	0,332	0,972	0,932	0,676
-----Sem Manta-----				
Shannon	1,113	1,308	1,368	1,073
Pielou	0,697	0,977	0,929	0,691
Simpson	1,112	1,306	1,366	1,074

**Tabela 14.** Resultados das análises químicas e físicas do *topsoil* com manta após os 180 dias de avaliação de emergência de plantas nas umidades de 60, 70, 80 e 90 % CC.

Atributos	Umidade (% CC)			
	60	70	80	90
ADA (kg kg <sup>-1</sup> )	0,111	0,093	0,105	0,118
pH H <sub>2</sub> O	4,820	5,073	5,170	5,243
P (mg dm <sup>-3</sup> )	0,225	0,200	0,200	0,275
K (mg dm <sup>-3</sup> )	35,000	29,750	29,500	31,000
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,475	0,465	0,530	0,473
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,130	0,115	0,135	0,125
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,175	0,145	0,123	0,150
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,250	8,025	7,925	7,925
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,693	0,655	0,740	0,678
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,868	0,800	0,863	0,828
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,943	8,680	8,665	8,603
V (%)	7,750	7,550	8,525	7,850
m (%)	20,050	18,125	14,275	18,150
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	3,920	3,540	3,615	3,670
Prem (mg L <sup>-1</sup> )	7,625	7,325	7,125	7,725
S (mg dm <sup>-3</sup> )	1,900	1,675	1,775	2,075
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	1,073	1,060	1,123	1,135
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	11,000	12,150	14,400	14,825
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	37,775	40,600	45,450	46,275
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,695	0,685	0,788	0,783
C lábil (g kg <sup>-1</sup> )	1,514	1,557	1,554	1,105
COT (mg g <sup>-1</sup> )	22,925	22,975	24,300	24,075
NT (mg g <sup>-1</sup> )	1,250	1,275	1,400	1,525
C/N	18,353	18,024	17,357	15,885

ADA: Argila dispersa em água; pH H<sub>2</sub>O: pH em água; P: fósforo; K: potássio; Ca<sup>2+</sup>: cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup>: magnésio trocável; Al<sup>3+</sup>: alumínio trocável; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: CTC efetiva; T: CTC a pH 7; V(%): saturação por bases; m (%): saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; Prem: fósforo remanescente; S: enxofre; Cu: Cobre; Mn: manganês; Fe: ferro; Zn: zinco; C lábil: carbono lábil; COT: carbono orgânico total; NT: nitrogênio total; C/N: relação carbono e nitrogênio.

**Tabela 15.** Resultados das análises químicas e físicas do *topsoil* sem manta após os 180 dias de avaliação de emergência de plantas nas umidades de 60, 70, 80 e 90 % CC

Atributos	Umidade (% CC)			
	60	70	80	90
ADA (kg kg <sup>-1</sup> )	0,093	0,096	0,120	0,108
pH H <sub>2</sub> O	4,290	4,405	4,655	4,610
P (mg dm <sup>-3</sup> )	0,400	0,425	0,425	0,300
K (mg dm <sup>-3</sup> )	36,750	32,250	32,000	35,250
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,450	0,423	0,415	0,505
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,133	0,130	0,125	0,145
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,220	0,210	0,190	0,200
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,350	8,275	8,325	7,925
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,678	0,635	0,623	0,740
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,898	0,845	0,813	0,940
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	9,028	8,910	8,948	8,665
V (%)	7,500	7,150	6,950	8,600
m (%)	24,425	24,625	23,525	21,250
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	3,798	3,968	3,773	3,770
Prem (mg L <sup>-1</sup> )	8,725	8,375	9,025	8,000
S (mg dm <sup>-3</sup> )	3,525	2,150	1,825	2,025
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	1,258	1,323	1,328	1,333
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	13,000	12,700	13,100	12,150
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	41,250	40,650	42,775	39,775
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	1,135	1,138	1,195	1,175
C lábil (g kg <sup>-1</sup> )	0,918	0,499	1,226	1,657
COT (mg g <sup>-1</sup> )	21,525	22,875	22,025	23,550
NT (mg g <sup>-1</sup> )	1,200	1,250	1,225	1,300
C/N	17,979	18,309	17,987	18,115

ADA: Argila dispersa em água; pH H<sub>2</sub>O: pH em água; P: fósforo; K: potássio; Ca<sup>2+</sup>: cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup>: magnésio trocável; Al<sup>3+</sup>: alumínio trocável; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: CTC efetiva; T: CTC a pH 7; V(%): saturação por bases; m (%): saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; Prem: fósforo remanescente; S: enxofre; Cu: Cobre; Mn: manganês; Fe: ferro; Zn: zinco; C lábil: carbono lábil; COT: carbono orgânico total; NT: nitrogênio total; C/N: relação carbono e nitrogênio.

**Tabela 16.** Resultados das correlações lineares de Pearson entre as variáveis do solo e o número de indivíduos aos 180 dias de experimento. Correlação significativa ( $p < 0,05$ )

	ADA	pH H <sub>2</sub> O	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	t	T	V	m
ADA	0,000	0,470	0,824	0,732	0,555	0,551	0,647	0,874	0,639	0,461	0,929	0,609	0,881
pH H <sub>2</sub> O	0,470	0,000	0,001	0,002	0,018	0,193	0,000	0,187	0,253	0,055	0,244	0,168	0,000
P	0,824	0,001	0,000	0,333	0,000	0,786	0,057	0,469	0,005	0,239	0,742	0,021	0,007
K	0,732	0,002	0,333	0,000	0,469	0,009	0,009	0,251	0,033	0,000	0,397	0,018	0,108
Ca <sup>2+</sup>	0,555	0,018	0,000	0,469	0,000	0,014	0,042	0,398	0,000	0,000	0,956	0,000	0,000
Mg <sup>2+</sup>	0,551	0,193	0,786	0,009	0,014	0,000	0,878	0,271	0,000	0,001	0,559	0,000	0,228
Al <sup>3+</sup>	0,647	0,000	0,057	0,009	0,042	0,878	0,000	0,049	0,205	0,008	0,071	0,073	0,022
H+Al	0,874	0,187	0,469	0,251	0,398	0,271	0,049	0,000	0,253	0,802	0,000	0,000	0,037
SB	0,639	0,253	0,005	0,033	0,000	0,000	0,205	0,253	0,000	0,000	0,753	0,000	0,002
t	0,461	0,055	0,239	0,000	0,000	0,001	0,008	0,802	0,000	0,000	0,369	0,000	0,373
T	0,929	0,244	0,742	0,397	0,956	0,559	0,071	0,000	0,753	0,369	0,000	0,002	0,098
V	0,609	0,168	0,021	0,018	0,000	0,000	0,073	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001
m	0,881	0,000	0,007	0,108	0,000	0,228	0,022	0,037	0,002	0,373	0,098	0,001	0,000
MO	0,169	0,083	0,442	0,039	0,474	0,310	0,098	0,205	0,923	0,315	0,201	0,518	0,128
PRem	0,865	0,001	0,002	0,085	0,032	0,946	0,020	0,159	0,154	0,831	0,225	0,063	0,008
S	0,582	0,089	0,172	0,942	0,536	0,782	0,379	0,161	0,668	0,844	0,173	0,347	0,341
Cu	0,406	0,001	0,000	0,215	0,170	0,058	0,008	0,193	0,552	0,245	0,217	0,350	0,007
Mn	0,489	0,115	0,145	0,522	0,980	0,748	0,097	0,530	0,990	0,266	0,520	0,779	0,178
Fe	0,091	0,034	0,617	0,151	0,967	0,866	0,061	0,707	0,862	0,160	0,682	0,988	0,144
Zn	0,706	0,000	0,000	0,096	0,091	0,060	0,001	0,151	0,457	0,190	0,178	0,268	0,002
C Lábil	0,089	0,035	0,031	0,511	0,091	0,736	0,251	0,553	0,214	0,722	0,678	0,201	0,165
COT	0,565	0,006	0,111	0,770	0,038	0,568	0,037	0,024	0,073	0,811	0,045	0,017	0,015
NT	0,226	0,001	0,206	0,452	0,107	0,635	0,037	0,046	0,233	0,782	0,066	0,084	0,025
CN	0,154	0,009	0,374	0,372	0,331	0,259	0,127	0,155	0,575	0,621	0,174	0,342	0,121
Emergência	0,089	0,667	0,957	0,474	0,557	0,051	0,527	0,884	0,440	0,782	0,789	0,648	0,465

Continuação

	MO	P Rem	S	Cu	Mn	Fe	Zn	C Lábil	COT	NT	CN	Emergência
ADA	0,169	0,865	0,582	0,406	0,489	0,091	0,706	0,089	0,565	0,226	0,154	0,089
pH H <sub>2</sub> O	0,083	0,001	0,089	0,001	0,115	0,034	0,000	0,035	0,006	0,001	0,009	0,667
P	0,442	0,002	0,172	0,000	0,145	0,617	0,000	0,031	0,111	0,206	0,374	0,957
K	0,039	0,085	0,942	0,215	0,522	0,151	0,096	0,511	0,770	0,452	0,372	0,474
Ca <sup>2+</sup>	0,474	0,032	0,536	0,170	0,980	0,967	0,091	0,091	0,038	0,107	0,331	0,557
Mg <sup>2+</sup>	0,310	0,946	0,782	0,058	0,748	0,866	0,060	0,736	0,568	0,635	0,259	0,051
Al <sup>3+</sup>	0,098	0,020	0,379	0,008	0,097	0,061	0,001	0,251	0,037	0,037	0,127	0,527
H+Al	0,205	0,159	0,161	0,193	0,530	0,707	0,151	0,553	0,024	0,046	0,155	0,884
SB	0,923	0,154	0,668	0,552	0,990	0,862	0,457	0,214	0,073	0,233	0,575	0,440
t	0,315	0,831	0,844	0,245	0,266	0,160	0,190	0,722	0,811	0,782	0,621	0,782
T	0,201	0,225	0,173	0,217	0,520	0,682	0,178	0,678	0,045	0,066	0,174	0,789
V	0,518	0,063	0,347	0,350	0,779	0,988	0,268	0,201	0,017	0,084	0,342	0,648
m	0,128	0,008	0,341	0,007	0,178	0,144	0,002	0,165	0,015	0,025	0,121	0,465
MO	0,000	0,314	0,287	0,353	0,455	0,451	0,325	0,204	0,780	0,632	0,322	0,723
P Rem	0,314	0,000	0,583	0,031	0,699	0,276	0,005	0,009	0,550	0,755	0,927	0,318
S	0,287	0,583	0,000	0,161	0,406	0,363	0,139	0,845	0,000	0,047	0,531	0,562
Cu	0,353	0,031	0,161	0,000	0,135	0,171	0,000	0,369	0,179	0,162	0,219	0,398
Mn	0,455	0,699	0,406	0,135	0,000	0,000	0,227	0,938	0,131	0,012	0,013	0,874
Fe	0,451	0,276	0,363	0,171	0,000	0,000	0,449	0,751	0,214	0,020	0,012	0,837
Zn	0,325	0,005	0,139	0,000	0,227	0,449	0,000	0,204	0,069	0,079	0,185	0,310
C Lábil	0,204	0,009	0,845	0,369	0,938	0,751	0,204	0,000	0,540	0,604	0,799	0,287
COT	0,780	0,550	0,000	0,179	0,131	0,214	0,069	0,540	0,000	0,000	0,006	0,952
NT	0,632	0,755	0,047	0,162	0,012	0,020	0,079	0,604	0,000	0,000	0,000	0,991
CN	0,322	0,927	0,531	0,219	0,013	0,012	0,185	0,799	0,006	0,000	0,000	0,733
Emergência	0,723	0,318	0,562	0,398	0,874	0,837	0,310	0,287	0,952	0,991	0,733	0,000

ADA: Argila dispersa em água; pH H<sub>2</sub>O: pH em água; P: fósforo; K: potássio; Ca<sup>2+</sup>: cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup>: magnésio trocável; Al<sup>3+</sup>: alumínio trocável; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: CTC efetiva; T: CTC a pH 7; V(%): saturação por bases; m (%): saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; Prem: fósforo remanescente; S: enxofre; Cu: Cobre; Mn: manganês; Fe: ferro; Zn: zinco; C lábil: carbono lábil; COT: carbono orgânico total; NT: nitrogênio total; C/N: relação carbono e nitrogênio; Emergência: número de plantas no dia 180 de avaliação