UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA
DOUTORADO EM QUÍMICA

Paola Ramos Coutinho Reis

Efeitos da lama de rejeito de mineração da Samarco sobre o crescimento e composição mineral de braquiárias

Juiz de Fora
2023

Paola Ramos Coutinho Reis

Efeitos da lama de rejeito de mineração da Samarco sobre o crescimento e composição mineral de braquiárias

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Química, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Química.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César José da Silva (DQ – UFJF)

Coorientador: Dr. Leônidas Paixão Passos (Embrapa Gado de Leite – JF)

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Reis, Paola Ramos Coutinho Reis.
Efeitos da lama de rejeito de mineração da Samarco sobre o crescimento e composição mineral de braquiárias / Paola Ramos Coutinho Reis Reis. -- 2023.
126 f. : il.

Orientador: Júlio César José da Silva Silva
Coorientador: Leônidas Paixão Passos Passos
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Química, 2023.

1. acidente ambiental. 2. rejeitos de mineração. 3. barragem de Fundão. 4. Samarco. 5. Urochloa sp. I. Silva, Júlio César José da Silva , orient. II. Passos, Leônidas Paixão Passos , coorient. III. Título.

Paola Ramos Coutinho Reis

Efeitos da lama de rejeito de mineração da Samarco sobre o crescimento e composição mineral de braquiárias

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Química. Área de concentração: Química

Aprovada em 14 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Júlio César José da Silva - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Leônidas Paixão Passos - Coorientador
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Dr. Wadson Sebastião Duarte da Rocha
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Prof. Dr. Marcos Yassuo Kamogawa
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Mário Henrique Gonzalez
Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Leandro Vinícius Alves Gurgel

Universidade Federal de Ouro Preto

Juiz de Fora, 30/11/2023.

Documento assinado eletronicamente por **Marcos Yassuo Kamogawa**, **Usuário Externo**, em 14/12/2023, às 18:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Wadson Sebastião Duarte da Rocha**, **Usuário Externo**, em 14/12/2023, às 18:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Mario Henrique Gonzalez**, **Usuário Externo**, em 14/12/2023, às 18:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Leandro Vinícius Alves Gurgel**, **Usuário Externo**, em 14/12/2023, às 18:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Leônidas Paixão Passos**, **Usuário Externo**, em 14/12/2023, às 18:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Julio Cesar Jose da Silva**, **Professor(a)**, em 20/12/2023, às 14:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1602053** e o código CRC **F0748C4F**.

Dedico este trabalho a Deus, minha família e aos meus avós Maria (*in memoriam*) e Antônio (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua presença na minha vida e ouvir minhas orações.

Ao meu orientador Prof. Dr. Júlio César José da Silva, pela orientação, apoio e paciência em todos esses anos de convivência.

Ao meu coorientador Dr. Leônidas Paixão Passos pela orientação, amizade, incentivo e pelas conversas de grandes aprendizados.

Ao Sebastião Evaristo, Mário e aos colegas do laboratório de Biotecnologia e Fisiologia Vegetal da Embrapa Gado de Leite, pela colaboração e amizade.

Aos professores do Departamento de Química da Universidade Federal de Juiz de Fora pelas instruções e esclarecimentos.

Ao professor Paulo Henrique Peixoto (UFJF) por fornecer as amostras de rejeito, e sempre tão solicito em nos ajudar.

Ao professor Luiz Fernando Cappa de Oliveira (UFJF) pelas análises de MEV e EDS; ao professor Ricardo Santelli (IQ-UFRJ) e ao Bernardo Braz (IQ-UFRJ) pelas análises de ICPOES e ao professor Maurício Fontes (UFV) pelas análises de DRX.

A minha amiga Ângela, pelos conselhos e amizade.

Aos colegas de laboratório Baccan, da Universidade Federal de Juiz de Fora.

A todos os meus amigos que sempre estiveram presentes me aconselhando e incentivando com carinho e dedicação.

A minha mãe, Helena, pelo apoio, orações e por me ajudar a cuidar dos meus filhos nesse período da Tese.

Ao meu pai, Luiz, pelo incentivo e por acreditar em mim.

Ao meu marido Marcos, meus filhos Cecília e Pedro, pelo amor, paciência e compreensão nos momentos que estive ausente.

Aos meus familiares que sempre me deram força, valorizando meus potenciais.

A coordenação da pós-graduação em química, Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Química, Embrapa Gado de Leite de Juiz de Fora.

Aos órgãos financiadores do projeto CAPES, CNPq e FAPEMIG (que possibilitou a coleta do rejeito e a realização das diferentes etapas do nosso projeto - Projeto CRA - APQ-01187-16, Edital - 04/2016 - Tecnologias para a Recuperação da Bacia do Rio Doce, CAPES-FAPEMIG).

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução dessa Tese de doutorado.

“Ora, àquele que é poderoso para fazer tudo muito mais abundantemente além daquilo que pedimos ou pensamos, segundo o poder que em nós opera.” (Efésios 3:20)

RESUMO

O rompimento da barragem da Samarco em 2015 causou um derramamento de cerca de 50 milhões de metros cúbicos de rejeito, resultando em severos danos socioambientais. O clamor subsequente por destinações sustentáveis do referido rejeito foi intenso em toda a sociedade, destacando-se a possibilidade de uso agrícola. Esta pesquisa objetivou caracterizar quimicamente o rejeito e avaliar seus impactos no crescimento e composição mineral de braquiárias, utilizando amostras coletadas um ano após o incidente na Lagoa da Hidrelétrica Risoleta Neves. As análises morfológicas por MEV revelaram que o rejeito apresentou menor agregação, textura mais irregular e formato menos uniforme que o solo. O EDS indicou composição distinta, sendo o rejeito rico em Al, Fe, O e Si; enquanto o solo, Al, Ca, Fe, Mg, O, P, Si e S. A DRX revelou a presença de quartzo, goethita e hematita no rejeito, e o solo; quartzo, goethita, gibbsita, caulinita, feldspato e mica. A digestão ácida em micro-ondas foi utilizada para amostras de solo e rejeito, e os teores dos elementos analisados por ICPOES, apresentaram concentrações mais elevadas de Al, Ca, Cr, Cu, Mg, Ni e Zn no solo. Em contraste, o rejeito exibiu níveis elevados de Fe e Mn, e concentração de Cd acima do limite regulatório. Para verificar a viabilidade de uso agrícola do rejeito, plântulas de braquiária foram cultivadas em diferentes proporções de rejeito e solo (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Dentre as variáveis fisiológicas foram observados aumento no peso seco das raízes, com o aumento do rejeito. Houve uma diminuição na concentração de K nas raízes e de Ca na parte aérea; aumento de Mn em toda a planta e de Fe nas raízes com o aumento do rejeito. Os analitos Al, Cr, Cu, Na, Mg e Zn não mostraram variações significativas. Visto que os teores de N no rejeito foram muito inferiores àqueles do solo, o efeito de diferentes fontes de N na absorção de outros elementos foi examinado em plântulas de braquiária, constatando-se que todas elas causaram discreto aumento na absorção de Cu e K na planta inteira e expressivas absorções de Al, Fe e Mg nas raízes. O estudo indicou viabilidade no uso do rejeito da Samarco para cultivo de braquiárias, com recomendações de abordagem gradual na proporção rejeito-solo, monitoramento constante e adição controlada de N.

Palavras-chave: acidente ambiental; rejeitos de mineração; barragem de Fundão; Samarco; caracterização mineral; *Urochloa* sp.

ABSTRACT

The breach of a Samarco dam in 2015 resulted in the release of nearly 50 million cubic meters of tailings mud, causing severe socio-environmental damage. The subsequent outcry in the society for a sustainable destination of that mud was intense, with special reference to the possible application in agriculture. This research aimed to chemically characterize the mud and assess its impacts on the growth and mineral composition of brachiaria grasses, using samples collected one year after the incident at the Risoleta Neves Hydroelectric Reservoir. Scanning Electron Microscopy (SEM) morphological analyses revealed the tailings showed lesser agglomeration, more irregular texture, and less uniform shape than the soil. Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) indicated distinct compositions, with high levels of Al, Fe, O, and Si in the tailings, and Al, Ca, Fe, Mg, O, P, Si, and S in the soil. X-ray Diffraction (XRD) showed the presence of quartz, goethite, and hematite in the tailings, and quartz, goethite, gibbsite, kaolinite, feldspar, and mica in the soil. Microwave acid digestion was applied to soil and tailings samples, and the element concentrations analyzed by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICPOES), revealing higher levels of Al, Ca, Cr, Cu, Mg, Ni, and Zn in the soil. In contrast, the tailings exhibited elevated levels of Fe and Mn, with Cd concentration exceeding regulatory limits. In order to verify the feasibility of using the mud in agriculture, brachiaria seedlings were grown in different proportions of tailings and soil (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%), among the physiological variables, an increase in the dry weight of the roots was observed. There was a decrease in K concentration in the roots and Ca in the aboveground part, an increase in Mn throughout the plant, and an increase in Fe in the roots with increasing tailings. Al, Cr, Cu, Na, Mg, and Zn were not significantly affected. Since N levels in the mud were very inferior to those in the soil, the effects of different nitrogen sources on the absorption of other elements were examined in Brachiaria seedlings, and it was verified that all nitrogen sources caused a slight increase in Cu and K in the whole plant and significant absorptions of Al, Fe, and Mg in the roots. The study suggested the feasibility of using Samarco's tailings mud for the cultivation of brachiaria grass, with recommendations for a gradual approach in the mud-soil ratio, constant monitoring, and controlled N addition.

Keywords: environmental accident; mining tailings; Fundão dam; Samarco; mineral characterization; *Urochloa* sp.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distrito Bento Rodrigues após o rompimento da barragem.....17
Figura 2 – Região do acidente, locais onde passou o rejeito 39
Figura 3 – Local de coleta das amostras de rejeito, barragem de Fundão.....40
Figura 4 – Montagem do experimento: tratamentos de rejeito e solo em diferentes proporções 43
Figura 5 – Experimento tratamentos de rejeito e solo em diferentes proporções em braquiárias em câmara de crescimento 43
Figura 6 – Amostras vegetais digeridas no bloco digestor 45
Figura 7 – Montagem do experimento com as diferentes fontes de Nitrogênio.....47
Figura 8 – Micrografia da amostra de rejeito obtida por MEV: a) x50; b) x250; c) x500 e c) x1000.....50
Figura 9 – Micrografia da amostra de solo obtida por MEV: a) x50; b) x250; c) x500 e c) x1000.....51
Figura 10 – Espectro obtido por MEV com os elementos presentes para a amostra de a) rejeito e b) solo.....54
Figura 11 – Espectro obtido por EDS com os elementos presentes para a amostra de a) rejeito e b) solo.....55
Figura 12 – Difratograma de raios X, amostras (fração < 106µm), a) rejeito: quartzo (Qz), goethita (Gt) e hematita (Hm) e b) solo: quartzo (Qz), goethita (Gt), gibbsita (Gb), caulinita (Ct), feldspato (Fs) e mica (Mi) 57
Figura 13 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre os indicadores fisiológicos comprimento da parte aérea (a), número de folhas verdes (b), número de folhas secas (c) em capim-braquiária 66
Figura 14 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre os indicadores fisiológicos teor de clorofila (a) e transpiração (b) em capim-braquiária 67
Figura 15 – Efeito da proporção do rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre os indicadores fisiológicos peso verde total (a), folhas (b), das raízes (c) em capim-braquiária 68

Figura 16 – Efeito da proporção do rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre os indicadores fisiológicos peso seco total (a), raízes (b) e folhas (c) em capim-braquiária 69
Figura 17 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de K na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária 72
Figura 18 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Mg na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária 74
Figura 19 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Ca na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária 76
Figura 20 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Al (a) e Fe (b) nas raízes de capim-braquiária 77
Figura 21 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Na na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária 78
Figura 22 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Cu na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária 79
Figura 23 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Zn na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária 80
Figura 24 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Mn na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária 81
Figura 25 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Cr na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária 82
Figura 26 – Indicadores de crescimento em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N, no comprimento na parte aérea (a), taxa de transpiração (b) e teor de clorofila (c) 86

Figura 27 – Indicadores de crescimento em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N, no peso verde na planta inteira (a), parte aérea (b) e nas raízes (c) 87
Figura 28 – Indicadores de crescimento em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N, no peso seco na planta inteira (a), na parte aérea (b) e nas raízes (c) 88
Figura 29 – Conteúdos de N em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....91
Figura 30 – Conteúdos de K em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....92
Figura 31 – Conteúdos de Ca em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....93
Figura 32 – Conteúdos de Mg em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....94
Figura 33 – Conteúdos de Na em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....95
Figura 34 – Conteúdos de Mn em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....96
Figura 35 – Conteúdos de Zn em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....97
Figura 36 – Conteúdos de Cu em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....98
Figura 37 – Conteúdos de Ni em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....99

Figura 38 – Conteúdos de Cr em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....100
Figura 39 – Conteúdos de Cd em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).....101
Figura 40 – Conteúdos de Al (a) e Fe (b) nas raízes em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Programa de aquecimento empregado para a digestão da amostra de rejeito e solo assistida por radiação micro-ondas.....44
Tabela 2 – Parâmetros instrumentais para a determinação de Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni e Zn por ICPOES 46
Tabela 3 – Composição da amostra de rejeito e solo obtida por microanálise EDS 56
Tabela 4 – Comparativo da quantidade de minerais presentes nas amostras de rejeito (a) e solo (b) 56
Tabela 5 – Teores totais dos analitos determinados após digestão assistida por radiação micro-ondas nas amostras de rejeito e solo por ICPOES, após digestão ácida. Concentração em mg kg^{-1} ± desvio padrão, n=7.....62
Tabela 6 – Avaliação dos dados fisiológicos da *Urochloa decumbens* em relação aos tratamentos com rejeito e solo em diferentes proporções. Médias ± desvio padrão, n=15.....65
Tabela 7 – Teores totais de Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na e Zn determinados por ICPOES após digestão ácida em bloco digestor na parte aérea e raízes das plantas. Experimento Total n = 15, concentração média ± sd, n = 3 leituras.....73
Tabela 8 – Indicadores de crescimento do capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N. Médias ± desvio padrão, n=15 85
Tabela 9 – Níveis de elementos do capim- braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N 90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS	Espectrometria de absorção atômica, do inglês *Atomic Absorption Spectrometry*
DRX	Difração de Raios – X
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva, do inglês *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*
FAAS	Espectrometria de absorção atômica com chama, do inglês *Flame Atomic Absorption Spectrometry*
ICPOES	Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado, do inglês *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*
ICP-MS	Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado, do inglês *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*
LQ	Limite de quantificação
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 PROCESSAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO 18

1.2 REJEITO DE MINERAÇÃO 19

1.3 REUTILIZAÇÃO DO REJEITO 20

1.4 ESPÉCIES FORRAGEIRAS (BRAQUIÁRIAS) 21

1.4.1 Macronutrientes 22

1.4.1.1 Nitrogênio 22

1.4.1.2 Potássio 23

1.4.1.3 Cálcio 23

1.4.1.4 Magnésio 24

1.4.2 Micronutrientes 25

1.4.2.1 Cobre 25

1.4.2.2 Ferro 26

1.4.2.3 Manganês 27

1.4.2.4 Níquel 28

1.4.2.5 Zinco 28

1.4.3 Elementos benéficos e elementos tóxicos 29

1.4.3.1 Elementos benéficos 29

1.4.3.2 Elementos tóxicos 30

1.4.4 Braquiárias e a produção de leite 31

1.4.5 Braquiárias e a remediação de solos contaminados 31

1.5 TÉCNICAS UTILIZADAS NA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO REJEITO E SOLO 33

1.6 TÉCNICA ANALÍTICAS PARA A DETERMINAÇÃO DE ELEMENTOS EM BAIXA CONCENTRAÇÃO 34

1.7 PREPARO DE AMOSTRAS 36

1.8 JUSTIFICATIVA 36

2 OBJETIVOS 38

3 PARTE EXPERIMENTAL 39

3.1 INSTRUMENTAÇÃO 40

3.2 REAGENTES E SOLUÇÕES 41
3.3 TRATAMENTOS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS 42
3.4 PREPARO DE AMOSTRAS 44
3.5 ANÁLISE MINERALÓGICA 45
3.6 QUANTIFICAÇÃO 45
3.7 ÍONS AMÔNIO E NITRATO NO CRESCIMENTO E ABSORÇÃO DE ELEMENTOS EM BRAQUIÁRIA 46
3.8 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS.....48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 49
4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE RAIO-X POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS) E DIFRATOMETRIA DE RAIO-X (DRX).....49
4.2 DETERMINAÇÃO DOS ANALITOS NAS AMOSTRAS DE REJEITO E SOLO 60
4.3 AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS DA *UROCHLOA DECUMBENS* NOS EXPERIMENTOS COM REJEITO E SOLO EM DIFERENTES PROPORÇÕES DESENVOLVIDAS EM CÂMARA DE CRESCIMENTO.....63
4.4 DETERMINAÇÃO DOS ANALITOS NAS BRAQUIÁRIAS.....71
4.5 EFEITO DOS ÍONS AMÔNIO E NITRATO NO CRESCIMENTO E ABSORÇÃO DE ELEMENTOS EM BRAQUIÁRIA.....85
5 CONCLUSÕES 108
5.1 ETAPAS FUTURAS.....109
REFERÊNCIAS 111
APÊNDICE 126

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Doce abrange uma extensão de 879 km e atravessa os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Dentro dessa bacia, existem vários complexos de mineração, incluindo o complexo de Germano, operado pela Samarco Mineração (IGAM, 2016). No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, resultando no vazamento de cerca de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no vale do Rio Doce, representando um dos maiores desastres de mineração do mundo. A barragem de Fundão está localizada no Rio Gualaxo do Norte, como parte do complexo minerário de Germano, no distrito de Bento Rodrigues, município de Mariana, MG; distrito este que sofreu também grandes impactos pelo desastre como mostrado na Figura 1 (Araújo *et al.,* 2022; Omachi *et al.,* 2018).

A área mais afetada corresponde aos primeiros 80 km da bacia, ao longo das margens do Rio Gualaxo do Norte, onde houve alterações parciais ou totais nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A extensão, o grau e as consequências desse impacto ainda não são totalmente conhecidos, o que tem levado à estudos focados nos efeitos deletérios causados sobre o meio ambiente, bem como na proposição de estratégias para remediação/amenização dos mesmos (Ribeiro Junior *et al.*, 2021, Zago *et al.,* 2019).

Figura 1 – Distrito Bento Rodrigues após o rompimento da barragem

Fonte: MPF (2015).

1.1 PROCESSAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO

Minas Gerais é um dos estados brasileiros com maior destaque na mineração, pois possui a maior produção de minério de ferro do Brasil, e abriga grandes reservas, sobretudo na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero. Essa abundância de recursos minerais estimula as empresas exploradoras a investirem em pesquisas com o objetivo de otimizar a produção, buscando maior eficiência e sustentabilidade em suas operações (Nascimento, 2010).

Em 1977, a SAMARCO deu início ao tratamento do minério de ferro com a lavra da Mina de Germano, sendo pioneira no Brasil no beneficiamento do Itabirito, que é uma rocha metamórfica, cujos principais componentes minerais são o quartzo e os óxidos de ferro, com teores médios de ferro na faixa de 49% (Reatto *et al*., 1998). A produção de minério de ferro tem se destacado na economia mundial, e o Brasil ocupa atualmente a segunda posição como maior produtor desse minério no mundo. Esse setor desempenha um papel crucial na economia nacional, especialmente na siderurgia, que utiliza o minério de ferro para a fabricação de aço (Vieira, 2008).

A composição mineralógica dos principais minerais de Itabirito indica que são compostos principalmente por goethita (FeOOH), hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2). A hematita é um óxido de ferro III, com alta abundância na natureza e apresenta variações de cor, densidade e traço. A magnetita, um óxido de ferro III, também está presente, exibindo cor preta com reflexos azulados e forte magnetismo. A goethita é um hidróxido de ferro, com menor capacidade de pigmentação em comparação com a hematita, e possui coloração amarela. O quartzo, mineral abundante e resistente, é gerado por diversos processos geológicos e apresenta brilho, transparência e cores variadas (Martins *et al.,* 2022).

O minério de ferro itabirítico proveniente da Mina de Germano, operada pela Samarco Mineração, é conduzido por correntes transportadoras até uma usina de britagem e peneiramento; posteriormente, passa por um processo de flotação, no qual ocorre a separação dos principais minerais presentes, hematita e quartzo (Pires et al., 2003). A flotação utiliza uma tecnologia consolidada no Brasil ao longo de 35 anos, que faz uso de amido para reforçar o caráter hidrofílico das partículas do mineral hematita e surfatantes catiônicos de cadeia longa (C12-C18) para induzir o caráter hidrofóbico das partículas de quartzo (Martins, Lima e Leal Filho, 2012). Dessa forma, a hematita é coletada para uso industrial, enquanto o quartzo e outros minerais não

aproveitados, sem valor econômico (minerais de ganga) são descartados (Duarte, 2020).

A exploração de minério de ferro envolve a necessidade de separar o minério valioso, que é vendido, do material sem valor econômico. Conforme estabelecido pelas leis ambientais, o material não utilizado, chamado de rejeito, deve ser armazenado em reservatórios para evitar impactos ao meio ambiente. Uma das alternativas para a deposição desses rejeitos gerados durante a exploração de minério é a utilização de barragens, estruturas de armazenamento construídas a partir de solo compactado, blocos de rocha ou do próprio rejeito (Zinato, 2016).

1.2 REJEITO DE MINERAÇÃO

Os rejeitos de mineração são subprodutos resultantes do processamento mineral, compostos por uma mistura de areia, grãos finos, água, dentre outros elementos químicos, alguns podendo ser poluentes (Wang *et al.,* 2017). Problemas ambientais associados à mineração como, contaminação do solo, da água, destruição de habitats, poluição do ar e perturbação dos ecossistemas têm sido estudados e documentados na literatura (Silva *et al*., 2022, Ferreira *et al*., 2022, Zago *et al*., 2019, De Sá *et al*., 2023, Coelho *et al*., 2020, Anda, *et al.,* 2022).

No caso dos rejeitos de mineração de ferro da Samarco, o sedimento é composto, além de óxido de ferro e quartzo, por baixas concentrações de outros elementos metálicos (BRASIL, 2016; EMBRAPA, 2014). A contaminação de poluentes provenientes desses rejeitos pode afetar a cadeia alimentar, incluindo os seres humanos (IBAMA, 2015; GRUPO DA FORÇA-TAREFA, 2016; Penna *et al.,* 2022; Miranda *et al.,* 2021). Esses rejeitos no ambiente podem causar alterações físicas e químicas nos solos afetados, formando uma crosta ferruginosa impermeável, essa crosta pode liberar elementos químicos no ambiente afetando diferentes tipos de vegetação, como terraços fluviais, várzeas, matas ciliares e pastagens (Batista *et al*., 2015).

Ao longo do tempo, esses rejeitos podem causar impactos no solo, como desestruturação química e alterações no seu pH por alcalinização. Além disso, a fertilidade do solo é comprometida pela cobertura dos rejeitos, que formam uma camada espessa sem nutrientes adequados para as plantas (Zago et al., 2019). A contaminação do solo, cursos d´água e lençol freático pelos rejeitos, pode afetar a

disponibilidade de nutrientes para as plantas e aumentar as concentrações de elementos tóxicos em partes comestíveis; pois a composição desses rejeitos pode variar dependendo da atividade industrial ou fonte de poluição. Muitas vezes, os rejeitos contêm metais tóxicos, óxidos, produtos químicos industriais e outros materiais nocivos. Esse acúmulo ao longo da cadeia alimentar representa um risco para a saúde humana. No entanto, avaliações de longo prazo são necessárias para mensurar os riscos ecológicos nas áreas afetadas (Burges et al., 2016).

1.3 REUTILIZAÇÃO DO REJEITO

A Indústria da Mineração desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico do país. No entanto, é essencial discutir questões ambientais relacionadas à disposição dos resíduos gerados nessa atividade, especialmente o estéril e o rejeito resultantes da extração e beneficiamento de minerais, pois o impacto ambiental está diretamente ligado ao volume de resíduos produzidos pelas indústrias mineradoras, em um cenário em que as reservas brasileiras de alto teor de minério se esgotam, a quantidade de rejeitos tenderá a aumentar (Araújo *et al*., 2022).

A quantidade de rejeitos gerados nos processos de produção de substâncias minerais pode ser determinada pela diferença entre a produção bruta e a produção beneficiada, por exemplo; a cada tonelada de minério de ferro alcançado, estima-se a geração de cerca de 0,4 toneladas de rejeitos. Nesse contexto, a recuperação e a comercialização dos rejeitos de mineração têm importância tanto ambiental quanto econômica, pois é possível dar uma nova destinação comercial a esses materiais que seriam descartados, reduzindo também a quantidade de resíduos no meio ambiente (Silva *et al*., 2017).

O aproveitamento sustentável dos rejeitos de mineração é fundamental para impulsionar o desenvolvimento econômico e preservar o meio ambiente. Ao incentivar a pesquisa e promover práticas conscientes na indústria da mineração, o país pode obter benefícios significativos em diversas áreas (Araújo, Santos e Ferreira, 2012). De acordo com um estudo realizado por Silva *et al*. (2017), os rejeitos de mineração têm sido direcionados para várias alternativas sustentáveis; a cerâmica vermelha tem sido a principal aplicação para o aproveitamento dos rejeitos, representando 42% dos estudos; 25% dos estudos têm explorado o emprego desses rejeitos na fabricação de concreto; 17% em argamassas; 8% em filtros de barragens e 8% em aplicações

agrícolas. A análise das áreas de estudo dos rejeitos de mineração revela que a construção civil é a mais destacada, abrangendo 89% dos estudos. Em segundo lugar, a agricultura representa 11% das pesquisas realizadas, buscando maneiras de utilizar os rejeitos de forma benéfica para o setor.

Essas iniciativas visam não apenas reduzir o impacto ambiental da mineração, mas também contribuir para o avanço tecnológico e econômico do país. A adoção de práticas mais sustentáveis na indústria mineral pode impulsionar a economia, ao mesmo tempo em que respeita e protege os recursos naturais, fortalecendo o equilíbrio entre o progresso e a preservação ambiental (Barreto, 2001).

1.4 ESPÉCIES FORRAGEIRAS (BRAQUIÁRIAS)

Urochloa, conhecida como capim-braquiária, é uma gramínea amplamente cultivada no Brasil devido às suas características favoráveis, como facilidade de semeadura, crescimento rápido e baixa exigência de nutrientes (Junior *et al*., 2019). As espécies desse gênero desempenham um papel importante na pecuária brasileira, sendo utilizadas em cerca de 85% das áreas de pastagem do país (Macedo *et al*., 2013). Esse gênero engloba aproximadamente 100 espécies que ocorrem principalmente na África, mas se adaptaram bem às condições brasileiras, tolerando solos ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes, além de serem razoavelmente tolerantes à seca (Silva *et al*., 2022).

Em áreas impactadas por rejeitos de mineração, os agricultores retomaram suas atividades, incluindo o cultivo de gramíneas para alimentação do gado e produção de culturas de subsistência, como feijão, milho, legumes e frutas. O capim-braquiária é uma das gramíneas mais cultivadas nessas áreas afetadas e é amplamente utilizada como alimento para o gado. Essa gramínea é recomendada para a recuperação de áreas degradadas devido ao seu crescimento rápido, alta produção de biomassa e tolerância a elementos químicos tóxicos presentes no solo. A adaptabilidade dessas espécies a solos ácidos e de baixa fertilidade é especialmente relevante no Brasil (Gomes *et al*., 2011; Stumpf *et al*., 2014).

Estas são amplamente utilizadas na pecuária tropical devido à qualidade da forragem, rápido crescimento no início da estação chuvosa e adaptação aos sistemas de integração lavoura-pecuária. Além de servir como alimento para animais, essas

plantas são utilizadas como cobertura do solo para plantio direto (Silva *et al*., 2013; Barbero *et al*., 2021).

Estudos têm sido realizados para investigar a capacidade de acumulação de diferentes elementos em braquiárias, como Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, Ni e Zn. Esses elementos podem ser encontrados em amostras de solo, rejeitos de mineração e forrageiras, e a quantidade acumulada varia de acordo com a espécie e as condições de cultivo (Silva et al., 2022). Essas forrageiras podem acumular Cd, Cr, Cu, Ni e Zn em suas partes aéreas e raízes. Além disso, elas têm a capacidade de acumular nutrientes que desempenham papéis importantes em seu metabolismo e desenvolvimento (Pires et al., 2007; Lakshmi et al., 2013; Vaz et al., 2012).

1.4.1 Macronutrientes

Os macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), também chamados de nutrientes principais, são absorvidos pela planta em maior proporção que os micronutrientes (Ronquim, 2010). Abaixo estão apresentados os macronutrientes estudados neste trabalho.

1.4.1.1 Nitrogênio

O nitrogênio (N) é um dos principais macronutrientes que atua no crescimento e desenvolvimento de gramíneas forrageiras, sendo um dos componentes das proteínas, que são fundamentais para o crescimento, desenvolvimento e reparação das células vegetais. As proteínas são importantes para a estrutura das plantas, bem como para a realização de várias funções biológicas como a fotossíntese, metabolismo de carboidratos e produção de hormônios de crescimento. Deficiências de N nas braquiárias podem levar a sintomas como clorose (amarelamento) geral das folhas, especialmente nas folhas mais antigas, crescimento lento e redução na produção de biomassa. Em casos de deficiência severa, a planta pode apresentar um aspecto raquítico e mostrar sinais de estresse geral. A adubação nitrogenada é um importante componente do manejo nutricional das braquiárias e outras culturas. A aplicação de fertilizantes contendo N é realizada para garantir que as plantas tenham suprimento adequado desse nutriente, especialmente em solos naturalmente

deficientes em N ou em sistemas de alta produtividade, onde o N é frequentemente removido do solo pelas colheitas (Costa, Oliveira e Faquin, 2006).

1.4.1.2 Potássio

O potássio (K) participa do crescimento saudável das plantas, e isso inclui as braquiárias; é encontrado nas plantas na forma iônica de K^+, que desempenha diversas funções vitais no metabolismo e no desenvolvimento das culturas, como o crescimento das raízes, aumentando sua capacidade de absorver água e nutrientes do solo, exercendo influência sobre o crescimento celular e processos essenciais, como a regulação da abertura dos estômatos (Ragel *et al*., 2019). Sua movimentação intracelular é vital para o equilíbrio do pH, o potencial da membrana e a atividade enzimática. As braquiárias, bem como outras gramíneas forrageiras, possuem uma demanda significativa por K, especialmente durante seu período de crescimento vegetativo e quando servem como pastagem para o gado. Raízes bem desenvolvidas melhoram a eficiência no uso da água, o que é especialmente importante em regiões com estação seca. As braquiárias que recebem uma quantidade adequada de K são mais resistentes a condições adversas, como seca, frio, pragas e doenças, pois esse elemento ajuda a fortalecer a estrutura das plantas e a melhorar a tolerância a situações de estresse. A falta de K pode levar a deficiências nutricionais nas braquiárias, resultando em plantas mais suscetíveis a pragas, doenças e condições climáticas adversas, além de reduzir a produtividade do pasto e, consequentemente, a capacidade de suporte do gado (Moraes *et al*., 2019). É relevante destacar que o teor de proteínas e a qualidade geral da forragem produzida pelas braquiárias podem ser sensivelmente afetados pela disponibilidade de K no solo. Além disso, o K atua no desenvolvimento e na produção de sementes, contribuindo para a propagação da planta (Longo *et al*., 2011).

1.4.1.3 Cálcio

O cálcio (Ca), atua na constituição das paredes celulares e membranas das plantas, não apenas como componente estrutural, mas também como um mensageiro que coordena processos de desenvolvimento e respostas adaptativas, permitindo que a planta ajuste seu crescimento e respostas fisiológicas de acordo com as condições

do ambiente, é fundamental para a estabilidade das paredes celulares das plantas, proporcionando uma estrutura forte e protegendo as células contra danos; está envolvido na regulação do crescimento das raízes e dos tecidos vegetais. A concentração de Ca nas plantas de braquiárias pode variar ao longo do ciclo de crescimento e ser influenciada por diversos fatores, como disponibilidade no solo, pH e interferências nutricionais. A quantidade de Ca no solo tem um impacto direto na absorção pelas raízes das braquiárias, sendo que solos com teores adequados de Ca promovem um desenvolvimento saudável das plantas. O pH do solo também é um fator crítico que pode afetar a disponibilidade de Ca para as plantas; solos ácidos podem apresentar problemas de absorção, mesmo quando há quantidades adequadas desse nutriente disponíveis. Além disso, a presença de outros nutrientes no solo pode influenciar a absorção de Ca pelas braquiárias. Por exemplo, altos teores de Mg podem reduzir a absorção de Ca pelas plantas (Souza *et al*., 2009; Silva *et al*., 2015).

Uma oferta adequada de Ca promove o desenvolvimento saudável das raízes das braquiárias e, consequentemente, aumenta a capacidade de absorção de água e nutrientes; atua como um ativador de várias enzimas no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos, como pragas, doenças, temperaturas extremas e seca, ajudando a minimizar os efeitos negativos dessas condições adversas nas braquiárias; também está envolvido no transporte de outros nutrientes dentro da planta, ajudando a garantir que outros elementos, como K e Mg, sejam distribuídos adequadamente para as diferentes partes da planta. Deficiências de Ca nas braquiárias podem levar a problemas de desenvolvimento, como folhas com margens enroladas, menor crescimento das raízes, menor produção de biomassa e maior suscetibilidade a doenças e pragas (Prado, 2008).

1.4.1.4 Magnésio

O magnésio (Mg) participa de funções importantes no metabolismo vegetal, é um componente da molécula de clorofila, o pigmento responsável pela captura da energia solar durante a fotossíntese, muitas análises destacam a importância do Mg no metabolismo das plantas, uma vez que ele participa da síntese de proteínas e pigmentos da clorofila. O Mg age principalmente como um cofator em diversas vias

enzimáticas na fixação de carbono e no metabolismo fotossintético. Os teores de nutrientes em forrageiras podem variar com base na idade e estágio de desenvolvimento da planta, com o envelhecimento levando a diminuições nos teores de N e Mg e aumento do teor de Ca, por exemplo. Diferenças nos teores de nutrientes também podem ser observadas com base no tipo de solo, clima e local de coleta (Guo *et al*., 2016).

Sem o Mg, a capacidade das plantas de realizar a fotossíntese e produzir carboidratos fica comprometida. Assim como o Ca, o Mg atua como um cofator para muitas enzimas envolvidas em várias reações metabólicas, incluindo a síntese de proteínas, a respiração celular e a transferência de energia. O Mg está relacionado com o transporte e a translocação de fósforo (P) nas plantas. O P é outro elemento que participa no crescimento e desenvolvimento das braquiárias, e sua absorção é facilitada pela presença adequada de Mg. A deficiência de Mg pode levar a sintomas como clorose (amarelamento) das folhas, especialmente nas áreas entre as nervuras, além de redução do crescimento e da produtividade das braquiárias (Hauer-Jákli e Tränkner, 2019).

1.4.2 Micronutrientes

Os micronutrientes, boro (B), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), cloro (Cl), manganês (Mn) e níquel (Ni), são absorvidos pela planta em menor proporção que os macronutrientes. Ambos, macro e micronutrientes, são constituintes dos minerais e da matéria orgânica do substrato onde a planta cresce e são encontrados dissolvidos no solo (Ronquim, 2010). Abaixo estão apresentados os micronutrientes estudados neste trabalho.

1.4.2.1 Cobre

O cobre (Cu) atua no crescimento e desenvolvimento das braquiárias, tem função estrutural em proteínas regulatórias e é um componente fundamental no transporte de elétrons, na respiração mitocondrial, nas respostas ao estresse oxidativo, no metabolismo da parede celular e na sinalização hormonal. Esse elemento participa de muitos processos fisiológicos, como a fotossíntese, a respiração, a distribuição de carboidratos, a redução e fixação de N, o metabolismo de proteínas e da parede celular. Além disso, o Cu influencia a permeabilidade dos

vasos do xilema à água e controla a produção de DNA e RNA. Essencialmente, o Cu ocorre associado ao enxofre na forma de sulfetos, e sua forma iônica absorvida pelas plantas é o Cu^{2+} (Borkert *et al*., 1994).

Embora seja requerido em quantidades muito pequenas pelas plantas, ele é componente de algumas enzimas envolvidas na fotossíntese, especialmente na etapa da fixação do carbono. Isso significa que o Cu é necessário para a conversão de dióxido de carbono (CO_2) em carboidratos durante o processo fotossintético, é importante para a atividade de enzimas que estão envolvidas no metabolismo do N, incluindo a conversão de nitrato em nitrito. Isso é crucial para a assimilação do N pelas plantas, participa na síntese de clorofila, o pigmento verde responsável pela absorção de luz durante a fotossíntese, entre outras funções. Deficiências de Cu nas braquiárias podem levar a sintomas como clorose das folhas, principalmente nas pontas das folhas mais jovens. Em alguns casos, pode haver redução do crescimento e desenvolvimento das plantas (Santini *et al.*, 2015).

1.4.2.2 Ferro

O ferro (Fe) é um componente de várias enzimas envolvidas na síntese de clorofila, participa da cadeia de transporte de elétrons na fotossíntese, na respiração celular e na geração de energia para as atividades celulares, cumpre um papel na síntese de proteínas e na formação de sistemas enzimáticos respiratórios, contribuindo para processos fundamentais, como a respiração da planta, fotossíntese e transferência de energia. O Fe é necessário para a atividade de algumas enzimas envolvidas no metabolismo do N, o que influencia a assimilação e a utilização eficiente do N pelas plantas. Deficiências de ferro nas braquiárias podem levar a sintomas como clorose internerval (amarelamento entre as nervuras) nas folhas mais jovens, redução no crescimento e na produção de biomassa. A carência de ferro é comum em solos alcalinos, onde o ferro pode se tornar menos disponível para as plantas devido à formação de compostos insolúveis (Ourives *et al.,* 2010).

Embora a maioria dos solos contenha grandes quantidades de Fe, é comum a baixa disponibilidade desse nutriente para o desenvolvimento das culturas, resultando em deficiências que são comuns em várias regiões do país. Solos ricos em matéria orgânica, principalmente em condições de encharcamento, podem resultar em deficiências de Fe devido à formação de complexos com a matéria orgânica, que

reduz a solubilidade, tornando sua absorção pelas plantas mais difícil. A competição entre íons e a inibição microbiana também prejudicam a disponibilidade do Fe. Além disso, o equilíbrio entre o Fe e outros elementos, como Mn e molibdênio (Mo), pode afetar a absorção de Fe. As raízes da braquiária têm um notável potencial de bioacumulação de Fe, bem como de Mn (Epstein e Bloom, 2006).

1.4.2.3 Manganês

O manganês (Mn) embora seja necessário em quantidades menores em comparação aos macronutrientes como N, P e K, o Mn ainda desempenha funções cruciais no metabolismo das plantas, sendo um componente de várias enzimas envolvidas em reações metabólicas importantes, incluindo a síntese de clorofila, a respiração celular e a proteção contra o estresse oxidativo. Sem o Mn, essas enzimas não podem funcionar corretamente, o que afeta negativamente o crescimento e a saúde das plantas. O Mn participa no processo fotossintético, sendo necessário para a conversão da energia luminosa em energia química. Ele está envolvido no transporte de elétrons durante a fotossíntese, ajudando a produzir adenosina trifosfato (ATP) e nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato (NADPH) - ambos essenciais para a fixação do carbono e a produção de carboidratos. Também é necessário para a ativação de enzimas envolvidas no metabolismo do N, ajudando na assimilação e utilização eficiente do N pelas plantas. Assim como no caso do Fe, deficiências de Mn podem levar a sintomas como clorose internerval, retardo no crescimento das plantas, e em casos mais severos, a formação de manchas necróticas nas folhas (Silva *et al.,* 2013).

A importância da captação e compartimentalização de Mn nas plantas tem sido subestimada, apesar de seu papel como cofator no complexo que libera oxigênio no aparato fotossintético. A homeostase do Mn é regulada por uma variedade de proteínas de transporte e pode ser afetada em condições de disponibilidade excessiva ou insuficiente de Mn. A disponibilidade de Mn no solo, semelhante ao Fe, está negativamente relacionada ao pH e ao potencial redox, com condições alcalinas e oxidativas favorecendo a formação de óxidos de Mn (Andresen, Peiter e Küpper, 2018). Por outro lado, a prevalência de íons Mn^{2+} aumenta com a diminuição do pH. A disponibilidade desse nutriente pode variar consideravelmente, o que resulta em eficiência ou toxicidade para as plantas, dependendo da solubilidade dos compostos de Mn no solo. Embora grandes quantidades de Mn possam estar presentes nos

solos, apenas uma pequena fração normalmente está disponível (Epstein e Bloom, 2006).

1.4.2.4 Níquel

O conhecimento sobre o papel do níquel (Ni) na nutrição, fisiologia e metabolismo de plantas ainda é limitado, considerado um elemento que participa do crescimento das plantas. A disponibilidade de Ni no solo está relacionada a várias propriedades, como pH, potencial redox, textura, composição mineral, presença de outros elementos tóxicos e fatores que afetam a atividade microbiana. Esses fatores influenciam a fitodisponibilidade do Ni, destacando a importância de compreender e gerenciar esses elementos no ambiente agrícola. O nível crítico de Ni nas folhas varia entre espécies, mas geralmente é considerado adequado na faixa de 1 a 10 mg kg^{-1} de massa seca (Chhabra, 2022).

1.4.2.5 Zinco

O zinco (Zn) possui várias funções metabólicas nas plantas, como ativação de enzimas, fotossíntese, síntese de clorofila, regulação do crescimento, está associado à síntese de proteínas que ajudam as plantas a lidarem com estresses bióticos e abióticos, como pragas, doenças, altas temperaturas e deficiência hídrica. (Braz *et al*., 2004). Muitos solos usados na agricultura não conseguem fornecer a quantidade necessária de Zn para as culturas, resultando em deficiência de Zn comum, especialmente em solos com pH neutro. O Zn é um elemento que participa de enzimas envolvidas na fixação de carbono e na síntese de proteínas. Além disso, ele controla a produção de importantes reguladores de crescimento que afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas (Abranches *et al.*, 2009).

O Zn está presente em várias rochas básicas e ácidas, em compostos como sulfetos, carbonatos, silicatos e fosfatos, e participa da síntese do aminoácido triptofano. Plantas deficientes em Zn podem apresentar crescimento reduzido, clorose internervial, internódios curtos e aspecto raquítico. Deficiências de Zn nas braquiárias podem levar a sintomas como clorose (amarelamento) nas folhas mais novas, além de redução no crescimento, diminuição da produção de biomassa e maior suscetibilidade a doenças (Borkert *et al*., 1994; Costa, 2015).

1.4.3 Elementos benéficos e elementos tóxicos

Outros nutrientes – selênio (Se), silício (Si), sódio (Na), alumínio (Al), vanádio (V) – são considerados elementos benéficos, pois estimulam o crescimento, mas não são essenciais ou são essenciais para determinadas espécies de plantas ou sob determinadas condições específicas (Ronquim, 2010). Elementos como arsênio (As), chumbo (Pb) e cádmio (Cd), que não possuem funções biológicas conhecidas, podem causar efeitos nocivos, mesmo quando presentes em baixas concentrações (Klaassen, 2001). Abaixo estão apresentados os elementos estudados neste trabalho.

1.4.3.1 Elementos benéficos

O sódio (Na) é um elemento essencial para a maioria dos seres vivos, incluindo os animais, mas não é considerado um nutriente para o crescimento e desenvolvimento das plantas, incluindo as braquiárias. De fato, a maioria das plantas não possui sistemas biológicos específicos para absorver e utilizar o Na, uma vez que os solos naturais geralmente contêm quantidades suficientes para atender às necessidades das plantas. Além disso, altas concentrações de Na podem ser tóxicas para muitas plantas, prejudicando o seu crescimento e desenvolvimento. A maioria das plantas é sensível ao excesso de Na no solo, principalmente porque o Na pode competir com outros cátions, como o K que pode ter absorção prejudicada.Em solos naturais ou de cultivo comuns, geralmente não é necessário fornecer Na adicional para essas plantas (Qadir *et al*., 2006; Kidd *et al*., 2009).

Embora o Na seja considerado benéfico, concentrações elevadas podem se tornar tóxicas para as plantas. O nível ideal de Na para as espécies vegetais geralmente varia de 0,05% a 0,3% na matéria seca da planta (Malavolta, 2006). Apesar de não ser um nutriente para as plantas, sua determinação é importante em solos halomórficos ou salinos, próximos ao litoral ou que tenham recebido resíduos de indústrias, como efluentes de laticínios, que são ricos em sais. Em solos com alta concentração de Na (Falar sobre o uso do NaOH no beneficiamento do minério de Fe), esse elemento pode ter um efeito negativo sobre a produtividade das culturas, pois dificulta a absorção de água e nutrientes pela planta, bem como tem um efeito dispersante sobre as argilas, causando a desestruturação do solo e reduzindo a

infiltração de água, as trocas gasosas e a penetração das raízes (Prezotti e Guarçoni, 2013).

A espécie de braquiária *Urochloa decumbens* é conhecida por sua alta resistência à toxicidade do Al, apresentando sinais de intoxicação principalmente nas raízes. Com relação aos efeitos tóxicos, o alumínio (Al) embora seja um elemento abundante no solo, em condições de solos ácidos, pode se tornar tóxico para muitas plantas. As braquiárias são conhecidas por sua excelente produção de biomassa e expressiva tolerância à acidez do solo, toxicidade de Al e baixa fertilidade, e se desenvolvem bem em condições adversas (Torres e Morton, 2005). A acidez do solo é um fator limitante para a produção agrícola em várias regiões do mundo, especialmente em países em desenvolvimento na África, Ásia e América do Sul. A toxicidade de Al é considerada um dos principais fatores de estresse abiótico que limitam o crescimento das culturas em solos ácidos nessas regiões. Além da toxicidade do Al, esses solos ácidos geralmente são deficientes em P, Ca e Mg (Arroyave *et al*., 2013).

1.4.3.2 Elementos tóxicos

A acumulação de cádmio (Cd) e cromo (Cr) em braquiárias, podem provocar efeitos tóxicos para as plantas e têm implicações na cadeia alimentar quando são utilizadas como forragem para o gado. No entanto, para estimar a capacidade de acumulação dessas espécies tóxicas e determinar os limites seguros de exposição à saúde humana e animal é necessário realizar estudos específico. Além disso, práticas de manejo adequadas, como monitoramento da qualidade do solo e técnicas de remediação, podem ser necessárias para minimizar a contaminação em áreas agrícolas (Khatun, Intekhab e Dhak, 2022; Sharma *et al*., 2023; Nascimento *et al*., 2014). O Cr é um metal potencialmente tóxico que não desempenha nenhuma função metabólica em plantas e apresenta toxicidade em concentrações entre 1 mg kg^{-1} e 5 mg kg^{-1} (Malavolta, 2006).

As forrageiras têm a capacidade de acumular os nutrientes em seus tecidos. No entanto, é necessário garantir um equilíbrio nutricional adequado e monitorar os níveis desses elementos no solo para evitar deficiências ou toxicidades. O manejo nutricional, incluindo a aplicação controlada de fertilizantes, pode ser necessário para maximizar o crescimento e a produtividade das braquiárias, evitando desequilíbrios

nutricionais (Haque, Aduayi e Sibanda, 1993; Fageria e Baligar, 2008; Hasanuzzaman *et al*., 2018; El Sebai e Abdallah, 2022; Vieira *et al*., 2019; Fonseca *et al*., 2020; Buchtelt *et al.*, 2020).

1.4.4 Braquiárias e a produção de leite

No Brasil, uma parte significativa da produção de leite vem de sistemas que utilizam pastagens como principal fonte de alimento para o gado. No entanto, muitas dessas pastagens estão localizadas em áreas de solos ácidos e de baixa fertilidade, o que afeta sua produtividade. Para melhorar a produtividade nessas áreas, existem duas opções: utilizar espécies de forrageiras adaptadas a esses solos ou investir em fertilizantes, corretivos e manejo adequado (Macedo *et al*., 1995).

As espécies do gênero *Urochloa* são particularmente adaptadas a solos ácidos e de baixa fertilidade. Elas apresentam boa tolerância a condições com alto teor de Al e baixos teores de P e Ca no solo, o que as torna uma escolha viável para essas áreas. Devido a essas características, as braquiárias têm sido amplamente utilizadas em regiões tropicais em todo o mundo (Rao e Cramer, 1996). No Brasil, estima-se que as áreas ocupadas por pastagens de braquiária cheguem a 70 milhões de hectares, demonstrando a relevância dessas espécies de forrageiras no cenário agrícola brasileiro, especialmente em regiões com solos menos favoráveis para a agricultura. (Xavier *et al*., 2002).

Portanto, ao adotar espécies de braquiária, os produtores podem melhorar a produtividade das pastagens em áreas com solos ácidos e de baixa fertilidade, contribuindo para a sustentabilidade da produção de leite no país. Além disso, é importante promover práticas de manejo adequado e a utilização responsável de fertilizantes para garantir um sistema agrícola eficiente e ambientalmente sustentável.

1.4.5 Braquiárias e a remediação de solos contaminados

A presença do gênero *Urochloa* se destaca devido à sua capacidade de acumular elementos tóxicos, como observado em diversos estudos sobre o gênero (Lakshmi et al., 2013; Rabêlo e Borgo, 2016; Vaz et al., 2012). Essa característica torna essa gramínea uma opção promissora para a fitorremediação, uma técnica que utiliza plantas e sua microbiota para recuperar ambientes degradados ou poluídos. A fitorremediação pode ser alcançada por meio da fitoextração, que envolve a remoção

de metais do solo através das plantas. Essa abordagem é vantajosa, não só por ser uma alternativa de baixo custo, mas também por contribuir para a manutenção da fertilidade do solo, além de ser ecologicamente sustentável, aproveitando a energia solar como fonte primária de energia (Estrela, Chaves e Silva, 2018). Apesar das inúmeras vantagens da fitorremediação, é importante ressaltar que os resultados podem demandar tempo, e é fundamental garantir que as concentrações e a toxicidade dos poluentes estejam dentro dos limites de tolerância das plantas utilizadas (Ali, Khan e Sajad, 2013; Coutinho e Barbosas, 2007; Dinardi et al., 2003; Leduc e Terry, 2005).

Em áreas impactadas pela mineração, como o caso específico de Mariana, são adotadas medidas de recuperação do solo, como o recultivo técnico, que visa conformar o terreno e aplicar uma camada de material adequado para promover condições favoráveis ao desenvolvimento da vegetação. Já o recultivo biológico envolve medidas para acelerar os processos naturais de regeneração do solo. A escolha adequada das espécies vegetais desempenha um papel crucial na recuperação do solo, visto que algumas plantas possuem a capacidade de remover minerais tóxicos do ambiente (Zago *et al*., 2019). A renovação espontânea da vegetação nessas áreas tem sido limitada, sendo importante restaurar a cobertura de gramíneas para reduzir a perda de biodiversidade. Esse processo de renovação e reabilitação de áreas degradadas é especialmente relevante em regiões urbanas ou povoadas próximas (Lakić *et al*., 2020).

A empresa Samarco, responsável pelo desastre de Mariana, enfrenta o desafio de remediar as áreas afetadas e cumprir as demandas do Ministério Público Federal do Brasil. Diversas espécies vegetais têm sido testadas em diferentes tecnologias de remediação do solo, com foco na recuperação da fertilidade e das funções ecológicas por meio da fitorremediação (Stumpf *et al*., 2014). Porém, após mais de cinco anos desde o rompimento da barragem de Fundão, as pastagens afetadas pelos rejeitos da mineração têm sido dominadas pela gramínea braquiária, conforme apontado por Silva *et al*. (2022).

Além disso, várias forragens são conhecidas por seu rápido crescimento e capacidade de cobrir o solo, resultando em alta biomassa. Por essa razão, elas têm o potencial de serem usadas para a recuperação do solo e podem servir como fonte de alimento para o gado, desde que seus níveis de minerais tóxicos sejam monitorados para não afetar negativamente a cadeia alimentar (Anda *et al*., 2022).

1.5 TÉCNICAS UTILIZADAS NA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO REJEITO E SOLO

A avaliação detalhada das características do rejeito e do solo depende da sua caracterização físico-química. Entre as técnicas analíticas empregadas para esse fim, destacam-se a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e a Difração de Raios-X (DRX). Estas metodologias proporcionam uma abordagem abrangente para a compreensão da composição, morfologia e estrutura cristalina do rejeito, contribuindo significativamente para uma caracterização mais precisa desse material (Lima e Oliveira, 2020, Gomes *et al*., 2022, Martins *et al.*, 2022).

O MEV permite a obtenção de imagens em alta ampliação, o que possibilita a visualização de detalhes microscópicos que não seriam visíveis com um microscópio óptico convencional. Com isso, é possível identificar a forma e o tamanho dos grãos e agregados presentes nas amostras, bem como a presença de minerais específicos (Morales *et al*., 2007). Essa análise microscópica determina a textura do solo, que influencia na capacidade de retenção de água e a porosidade. No contexto dos rejeitos de mineração, o MEV é empregado para caracterizar a morfologia das partículas e minerais presentes nesses resíduos. Isso auxilia na identificação da distribuição de minerais de interesse econômico, bem como na detecção de minerais potencialmente tóxicos ou prejudiciais ao meio ambiente. Essa análise é crucial para avaliar os métodos de tratamento e disposição adequados para esses materiais, além de contribuir para a mitigação dos impactos ambientais (Lima e Oliveira, 2020, Gondim *et al.*, 2022).

Outra técnica importante é a EDS, que investiga a amostra por meio da interação entre partículas ou radiação eletromagnética e a matéria (Asfora, 2010). O EDS permite a identificação dos elementos químicos presentes nas amostras por meio dos espectros obtidos, em que a intensidade dos picos está associada à concentração de cada elemento. A análise química do solo é crucial para entender sua fertilidade e capacidade de suporte à vegetação, bem como para identificar a composição química dos minerais presentes nos rejeitos de mineração. Isso é importante para avaliar a viabilidade de recuperação de recursos valiosos desses rejeitos ou para determinar a presença de minerais potencialmente tóxicos. A análise química dos rejeitos também

é útil na seleção de processos de tratamento adequados para minimizar os impactos ambientais (Gomes *et al*., 2022).

DRX é um método que identifica os minerais presentes na amostra por meio da determinação das distâncias interplanares ou da posição angular das células cristalinas, que são compostas por planos diretamente relacionados ao raio atômico e aos tipos de ligação de cada átomo. Os difratogramas mostram os picos que estão relacionados à posição, intensidade e forma das estruturas cristalinas, permitindo assim a caracterização da composição mineralógica dos minerais. O DRX é aplicado em estudos de solos para determinar a mineralogia das frações argilosas. Ela permite identificar os minerais presentes na amostra, como caulinita, hematita, goethita, entre outros. A mineralogia é crucial para entender as caracteríticas físicas do solo, como a sua capacidade de retenção de água e de troca de cátions. É especialmente útil na análise mineralógica dos rejeitos de mineração, permitindo a identificação dos minerais presentes, incluindo minerais de interesse econômico e minerais potencialmente tóxicos. A mineralogia dos rejeitos é relevante para a avaliação da estabilidade desses materiais, bem como para a identificação de oportunidades de recuperação de recursos (Martins *et al.*, 2022).

O uso combinado do MEV, EDS e DRX em estudos de solos e rejeitos de mineração é fundamental para compreensão da morfologia, composição química e mineralogia desses materiais. Essas técnicas fornecem informações essenciais para a gestão sustentável do solo, recuperação de recursos minerais, seleção de métodos de tratamento adequados para rejeitos e mitigação de impactos ambientais associados à mineração, ajudando a entender questões relacionadas a mobilidade e disponibilidade de nutrientes/toxicidade para plantas.

1.6 TÉCNICA ANALÍTICAS PARA A DETERMINAÇÃO DE ELEMENTOS EM BAIXA CONCENTRAÇÃO

A determinação dos elementos em amostras de solo, rejeito e vegetais requer o uso de técnicas analíticas sensíveis, precisas e exatas, como a espectrometria de absorção atômica com atomização em chama (FAAS), espectrometria de absorção em forno de grafite (GFAAS), espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICPOES) e espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Essas técnicas oferecem alta sensibilidade,

precisão e exatidão, permitindo a identificação precisa dos elementos presentes nas amostras (Taylor *et al*., 2000; Ebdon, Foulkes e O`Hanlon,1995; García *et al*., 1992; Takuwa *et al*., 1997).

A técnica ICPOES é uma abordagem analítica que permite a análise simultânea de vários elementos em amostras (Novaes *et al.,* 2016). Nesse método, uma amostra líquida é nebulizada e atomizada em um plasma de argônio ionizado, gerando átomos e íons excitados. Quando esses átomos e íons excitados retornam ao estado fundamental, eles emitem luz em comprimentos de onda específicos, que são detectados e quantificados (Olesik, 1991).

No estudo de solos, o ICPOES é usado para analisar múltiplos elementos, permitindo a determinação de concentrações de metais tóxicos, elementos essenciais e outros elementos traço em uma única medição. Isso proporciona uma visão abrangente da composição química do solo, contribuindo para a avaliação de sua fertilidade e potencial de contaminação. A análise de elementos como Al, P, Si, Ca, K e outros é necessária para entender a capacidade do solo de sustentar a vegetação (Soares *et al*., 2010).

Quanto aos rejeitos de mineração, o ICPOES é aplicado para analisar a concentração de vários elementos, incluindo metais tóxicos e elementos traço. A análise abrangente dos rejeitos é crucial para avaliar o potencial de contaminação, identificar elementos tóxicos e determinar as melhores estratégias para gerenciamento e disposição desses materiais (Spaziani *et al*., 2006).

Em estudos de plantas, o ICPOES é amplamente utilizado para a análise simultânea de nutrientes, como Fe, Mn, Zn e Cu, bem como a detecção de elementos tóxicos, como chumbo, cádmio e mercúrio. Essas informações são importantes para monitorar a nutrição das plantas, identificar desequilíbrios nutricionais e compreender a capacidade das plantas de sequestrar elementos potencialmente tóxicos provenientes do solo (Silva *et al*., 2007).

O uso de técnicas como o ICPOES em amostras de solo, rejeito e plantas é fundamental para a caracterização detalhada da composição química desses materiais. Essas técnicas analíticas fornecem informações para a compreensão da fertilidade do solo, potencial de contaminação, nutrição das plantas e riscos ambientais associados à disposição de rejeitos de mineração (Puga, 2015).

1.7 PREPARO DE AMOSTRAS

A decomposição total de amostras sólidas, tais como, sedimentos, rejeitos e solos é uma etapa crucial para liberar os elementos presentes nas amostras, permitindo sua posterior análise por meio de técnicas como AAS ou ICPOES. Diversos métodos são utilizados para essa finalidade, muitos dos quais envolvem o uso de ácidos concentrados (Takase *et al*., 2002).

Um método recomendado pela USEPA 1995 é o método 3052, que utiliza uma combinação de ácido nítrico (HNO_3) e ácido clorídrico (HCl) ou peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para decompor as amostras. Outra abordagem comum é o uso de um bloco digestor, que aquece as amostras com ácidos concentrados em tubos de ensaio para solubilizar as substâncias presentes. Esse processo é fundamental para extrair os componentes desejados das amostras e permitir sua análise posteriormente (Silva *et al.*, 2014).

A digestão em bloco digestor é amplamente utilizada na preparação de amostras vegetais, esse método é especialmente eficiente para decompor amostras de plantas e liberar os elementos de interesse para análise em AAS e ICPOES. Utilizando ácido nítrico (HNO_3), o bloco digestor mantém os tubos de digestão em um ambiente controlado de temperatura durante o processo, o que torna essa abordagem eficiente e padronizada para a decomposição de amostras vegetais (Aguiar *et al*., 2013).

1.8 JUSTIFICATIVA

A relevância desse assunto reside nos impactos significativos causados pelo desastre de Mariana. Nesse contexto, é fundamental realizar estudos para caracterizar o problema e buscar maneiras de minimizar os impactos gerados, associando estratégias rápidas e de baixo custo. É importante aprofundar o conhecimento e desenvolver estratégias de remediação para enfrentar esses desafios e promover a recuperação ambiental em áreas afetadas.

Os resultados obtidos nesse caso específico podem ser aplicados em outras regiões que tenham sofrido com problemas ambientais relacionados à contaminação do solo por rejeitos industriais. Portanto, a utilização de braquiárias como forrageiras apresenta potencial para a recuperação ambiental e socioeconômica das áreas

impactadas. É importante realizar estudos adicionais para avaliar o desempenho dessas gramíneas em campo, considerando suas características de crescimento, capacidade de acumulação de metais tóxicos e seu impacto na qualidade do solo e na produção animal. Essas informações subsidiarão a implementação de estratégias eficazes de remediação e contribuirão para a recuperação dessas áreas afetadas.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral caracterizar quimicamente o rejeito de mineração da Samarco e investigação de seus efeitos sobre o crescimento e composição mineral de braquiárias.

Os objetivos específicos incluíram:

a) caracterização morfologicamente das amostras de solo contendo proporções crescentes de rejeitos da barragem da Samarco, utilizando Microscopica Eletrônica de Varredura, Espectroscopia de Energia Dispersiva e Difração de Raios-X;
b) determinação dos teores de Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni e Zn nas amostras de solo e rejeito por ICPOES;
c) determinação do teor de N nas amostras de rejeito e solo pelo método de Kjeldahl;
d) determinação do pH nas amostras de rejeito e solo;
e) avaliação fisiológica da *Urochloa decumbens* nos experimentos com rejeito e solo em diferentes proporções desenvolvidas em câmara de crescimento (Biotronette);
f) determinação dos teores de Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na e Zn nas amostras de braquiárias por ICPOES;
g) avaliação do potencial da espécie forrageira em absorver e translocar elementos nas suas diferentes partes (raiz e parte aérea);
h) comparação dos efeitos da adição e omissão de fontes de N ao substrato de cultivo sobre indicadores fisiológicos, absorção e translocação de elementos minerais em braquiárias, visando definir uma estratégia de enriquecimento nitrogenado para o uso sustentável do rejeito da Samarco na produção forrageira.

3 PARTE EXPERIMENTAL

A amostra de rejeito foi coletada um ano após o rompimento da barragem de Fundão (novembro 2016) o rejeito foi dragado em uma amostragem única e em grande quantidade para realização dos experimentos, no fundo da Lagoa da Hidrelétrica Risoleta Neves (20°12'27.2"S 42°51'17.3"W), localizado a aproximadamente a 90 km do local da ruptura (Figura 2). O material foi transportado e armazenado em local protegido da luz e umidade.

Figura 2 – Região do acidente, locais onde passou o rejeito

Fonte: BHP (2017).

A draga permanecia flutuando enquanto realizava a dragagem do fundo/leito do lago (Figura 3). Esse rejeito foi coletado e armazenado, na Estação Experimental do ICB (Instituto de Ciências Biológicas) na UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora), e secou-se naturalmente.

Figura 3 – Local de coleta das amostras de rejeito, barragem de Fundão

Fonte: Fundação Renova (2016).

Utilizou-se amostras de vermiculita como testemunha (composição química média em termos de óxidos: 22,0% Al_2O_3; 2,4% CaO; 0,07% Cr^{3+}; 0,001% Cu^{2+}; 6,8% Fe_2O_3; 0,5% K_2O; 14,4% MgO; 0,8% Na_2O; 0,03% Ni^{2+}; 27,9% SiO_2; e 0,006% Zn^{2+}); solo como um substrato orgânico com pH 6,0 aproximadamente; K 22,0 g kg^{-1}; P 16,8 g kg^{-1} e plântulas uniformes de capim-braquiária (*Urochloa*) cv. BRS Basilisk, ambos fornecidos pelo Laboratório de Biotecnologia e Fisiologia Vegetal da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG.

3.1 INSTRUMENTAÇÃO

A análise morfológica e a caracterização química semiquantitativa das amostras de solo e rejeito foram feitas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), combinada com a técnica Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS); utilizando um espectrômetro de energia dispersiva (EDS), modelo Hitachi TM 3000, em 5 kV, 15 kV (Bruker Optik, Alemanha). Foi utilizado também para a caracterização das amostras um Difratômetro de Raios-X modelo X'Pert PRO com radiação de Co (CoKα) na faixa entre 4 a 60 °2θ, com tensão de 40 kV e corrente de 30 mA; as medidas foram feitas na UFV em parceria com o Prof. Maurício Fontes.

A digestão das amostras de rejeito e do solo foi feita com uso de digestor por energia micro-ondas Berghof (modelo SpeedWave Four, Eningen, BW, Alemanha) com cavidade e frasco fechado. As frascos de digestão utilizados foram de politetrafluoroetileno (PTFE). O pH do rejeito e do solo foi determinado (pH-meter 827, Metrohm AG, Herisau, Suíça) e o teor de N nas amostras foram determinados pelo método de Kjeldahl.

Em relação às forrageiras, a transpiração, expressa em condutância estomática, foi medida com porômetro Delta-T, modelo AP4 (Delta-T Devices, Cambridge, Reino Unido). O teor de clorofila foi determinado com medidor SPAD, modelo 502 (Minolta, Osaka, Japão). O comprimento das plântulas foi medido com régua de precisão (1 mm), Molegata, modelo RM-TR (Trident, São Paulo, Brasil). As pesagens foram efetuadas com balança analítica Marte-Shimadzu, modelo AW220 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japão). A secagem das amostras foi realizada em forno de convecção THELCO, modelo 130DM (Precision Scientific, Chicago, IL, EUA). A moagem das amostras vegetais foi feita com moinho analítico IKA, modelo A11B (IKA, Wilmington, NC, EUA). A digestão das amostras vegetais foi feita com bloco digestor (Solab, São Paulo, Brasil) empregando tubos de vidro borossilicato de 100 mL.

As análises dos elementos foram realizadas em um espectrômetro de emissão Horiba Jobin Yvon com indução sequencial fonte de plasma acoplada (ICPOES) Ultima 2 (Horiba Scientific, Longjumeau, França), equipado com visão radial e display automático AS 421. A aquisição de dados foi realizada utilizando o software Analyst JY 5.4. As condições de operação do equipamento foram: potência de 1200W, vazão de plasma de 14 L min^{-1}, fluxo do nebulizador 0,80 L min^{-1}, fluxo de purga de gás normal, resolução normal, em triplicatas, tempo de medição automática do sinal (1 a 10 s) e taxa de aspiração da amostra de 2 mL min^{-1}; as medidas foram feitas na UFRJ em parceria com o Prof. Santelli.

3.2 REAGENTES E SOLUÇÕES

Todos os reagentes utilizados foram reagentes químicos de grau analítico: H_2SO_4 concentrado, NaOH (10 mol L^{-1}), H_3BO_3 2 % (p/v) e HCl (0,1 mol L^{-1}) para o método de Kjeldahl; mistura ácida HNO_3-HCl concentrados para a digestão das amostras de solo e rejeito em micro-ondas e HNO_3 para digestão em bloco digestor

das forrageiras. Utilizou-se micropipetas de volume variável LabMate Pro® (20-200, 100-1000 e 500-5000 µL). Todos os materiais e vidrarias foram lavados com detergente neutro e água deionizada, descontaminados em banho de HNO_3 10% v/v por no mínimo 24 horas e enxaguados com água deionizada antes do uso. As soluções utilizadas foram preparadas com água deionizada a 18,2 MΩ (Elga Veolia Purelab Option-Q, Reino Unido).

3.3 TRATAMENTOS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS

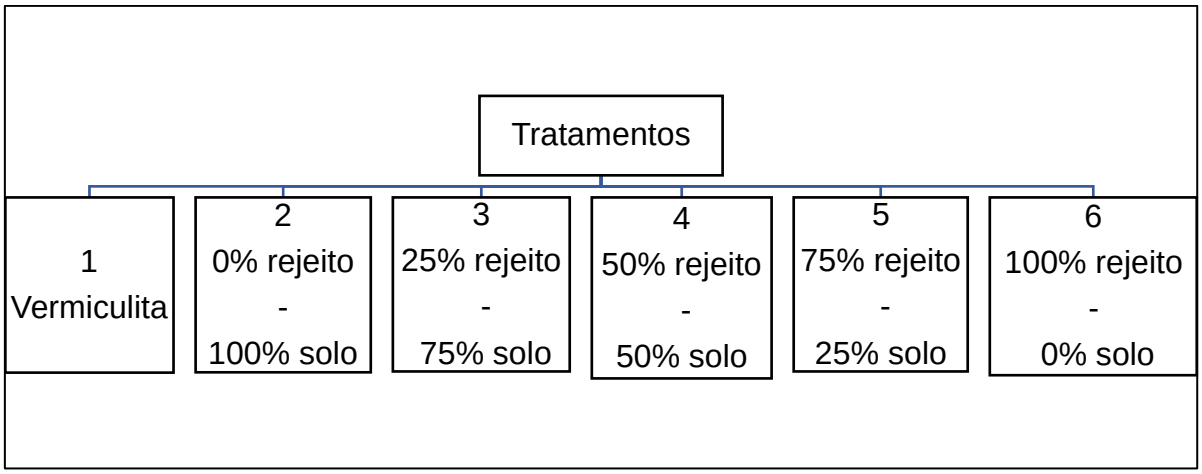
As amostras de rejeito e de solo foram homogeneizadas e peneiradas para remover pedras, detritos e outros materiais; posteriormente o experimento foi montado utilizando potes, preenchidos com 100g de amostras em diferentes proporções de rejeito/solo (vermiculita, 0%, 25%, 50%, 75% e 100%) (Figura 4). Avaliamos essas porcentagens com o objetivo de analisar os impactos dos rejeitos da barragem de Fundão em um cenário progressivo, visando proporcionar uma melhor compreensão dos resultados. Foram conduzidos ensaios experimentais no delineamento inteiramente ao acaso, com seis tratamentos (vermiculita; proporção de adição de rejeito ao solo: 0, 25, 50, 75 e 100% - nesse caso a planta foi cultivada apenas no rejeito), cinco repetições e oito plantas por parcela, totalizando 240 plantas na avaliação. Plântulas uniformes de capim-braquiária (*Urochloa decumbens*) foram transplantadas para os potes contendo os tratamentos experimentais e suprimento hídrico contínuo com água deionizada via capilaridade por sistema de pavio (*pot growing assembly* – PGA) e em câmara ambiental Biotronette, modelo Mark III (LAB-LINE, Melrose Park, IL, EUA), ajustada para 25 ± 4°C, 200 µmol s^{-1} m^{-2} de irradiância, 14 horas de fotoperíodo e 65 ± 5 % U.R (umidade relativa).

Esse experimento foi repetido três vezes, nos seguintes períodos: 1° repetição (início 25/04/2018 e término 21/06/2018); 2° repetição (início 21/06/2018 e término 22/08/2018) e 3° repetição (início 23/08/2018 e término 22/10/2018), (Figura 5). Após 60 dias de crescimento contínuo, as plântulas foram avaliadas quanto ao comprimento da parte aérea, número de folhas verdes e mortas, teor foliar de clorofila e taxa de transpiração.

Em seguida, as plântulas foram colhidas, secas em forno de convecção e moídas em um moinho analítico, em conjuntos separados de partes aéreas e raízes, e posteriormente armazenadas para as determinações de pesos verde e seco de

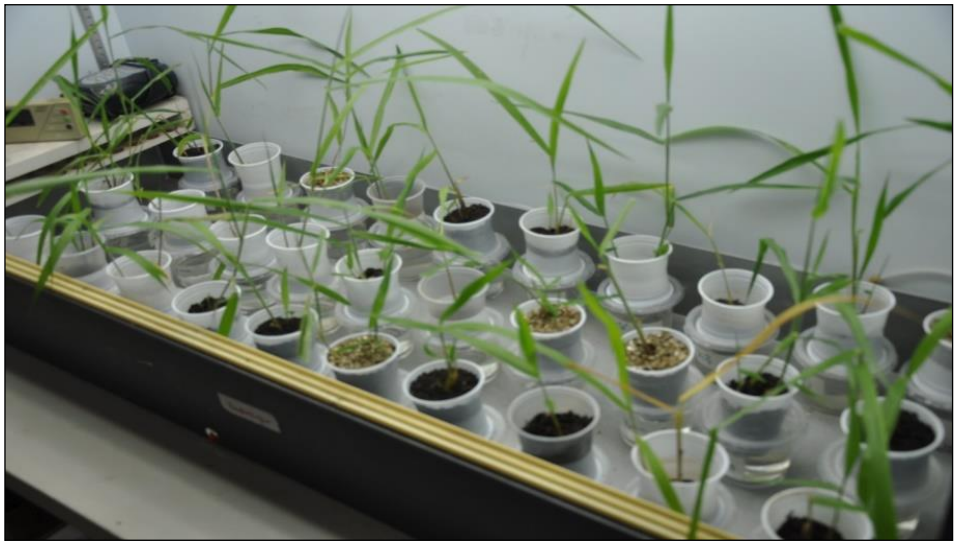
raízes e das partes aéreas; e armazenadas para posterior determinação elementar. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Biotecnologia e Fisiologia Vegetal da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG.

Figura 4 – Montagem do experimento: tratamentos de rejeito e solo em diferentes proporções



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 5 – Experimento tratamentos de rejeito e solo em diferentes proporções em braquiárias em câmara de crescimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.4 PREPARO DE AMOSTRAS

As amostras de rejeito e de solo foram secas em estufa a ± 70ºC por aproximadamente 72hs e peneiradas até granulometria de 106 µm (Junior *et. al*. 2019) em peneiras de aço inox (Bronzinox).

Foram determinados também o pH e o teor de N do rejeito e do solo. Para o pH foram pesados 10 g do rejeito, adicionou-se 25 mL de água destilada, agitou-se com bastão de vidro por 60 segundos e em repouso por 1 hora, agitou-se ligeiramente com bastão de vidro e fez-se a leitura no pHmetro; mesmo procedimento realizado para o solo. O teor de N foi determinados pelo método de Kjeldahl, consistindo na digestão da matéria seca do rejeito e do solo em H_2SO_4 concentrado, destilação com NaOH(10 mol L^{-1}) e H_3BO_3 2 % (p/v) e titulação com HCl (0,1 mol L^{-1}).

Foram pesadas 200 mg das amostras em barquinhas de teflon, transferidas para os frascos de digestão de teflon nos quais foi adicionada uma mistura ácida HNO_3-HCl concentrados (1:3) e solubilizadas no digestor de micro-ondas, seguindo o programa de aquecimento conforme especificações do fabricante, mostrado na Tabela 1. Após resfriamento até temperatura ambiente, cada digerido foi diluído para 25,0 mL com água deionizada e armazenado em frasco de polipropileno tipo Falcon.

Tabela 1 – Programa de aquecimento empregado para a digestão da amostra de rejeito e solo assistida por radiação micro-ondas

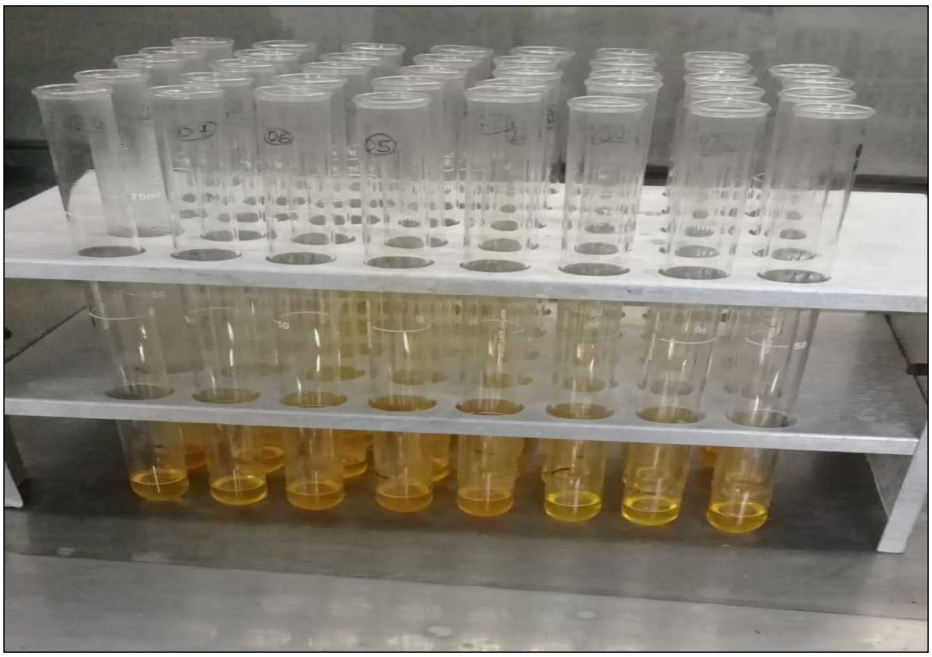
Etapa	Temperatura (°C)	Tempo de rampa (min)	Tempo (min)	Potência (%)
1	140	5	5	70
2	160	5	5	80
3	175	3	20	80
4	50	1	10	0

Fonte: Manual de Métodos Berghof (2013).

As amostras de raízes e parte aérea da forrageira foram coletadas após o período de tratamento, secas em estufa a ± 70ºC por aproximadamente 72hs (Prado, 2008) e moídas em moinho de facas para posterior análise. Foram pesados aproximadamente 0,500 g de amostra dos tecidos vegetais em tubos de digestão de vidro de 100 mL, adicionados 5 mL de HNO_3 no bloco digestor e deixados em pré-digestão por 12 horas (*overnight*). Após essa etapa as amostras foram digeridas a

170°C por aproximadamente 2 horas (Figura 6), a solução resultante foi avolumada com água deionizada até volume final de 25 mL em frascos tipo Falcon de polipropileno.

Figura 6 – Amostras vegetais digeridas no bloco digestor



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.5 ANÁLISE MINERALÓGICA

As informações morfológicas foram obtidas por análise das amostras de rejeito e solo na forma de pó passadas em peneira 106 µm e estudadas em um sistema de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) combinado com a técnica Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para microanálise. As medidas foram realizadas no Núcleo de Espectroscopia e Estrutura Molecular (NEEM) na UFJF e Difratometria de Raios-X (DRX) (UFV).

3.6 QUANTIFICAÇÃO

Os teores dos elementos Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni e Zn foram determinados por ICPOES, de acordo com os seguintes parâmetros: comprimento de onda utilizado para cada um dos elementos em estudo; coeficiente angular do gráfico

de calibração e limite de quantificação (LQ), calculado para garantir a confiabilidade dos resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros instrumentais para a determinação de Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni e Zn por ICPOES

Elementos	[a]λ (nm)	[b]r^2	[c]LQ (mg L^{-1})
Al	308,209	0,998	0,111
Ca	393,366	0,999	0,290
Cd	226,502	0,999	0,002
Cr	205,552	1,000	0,006
Cu	324,750	1,000	0,008
Fe	238,204	1,000	0,016
K	766,490	1,000	1,076
Mg	279,553	0,999	0,079
Mn	257,611	0,999	0,136
Na	588,995	0,985	0,050
Ni	231,604	0,998	0,004
Zn	213,856	0,999	0,011

[a]Comprimento de onda; [b]Coeficiente angular do gráfico de calibração; [c]Limite de Quantificação
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

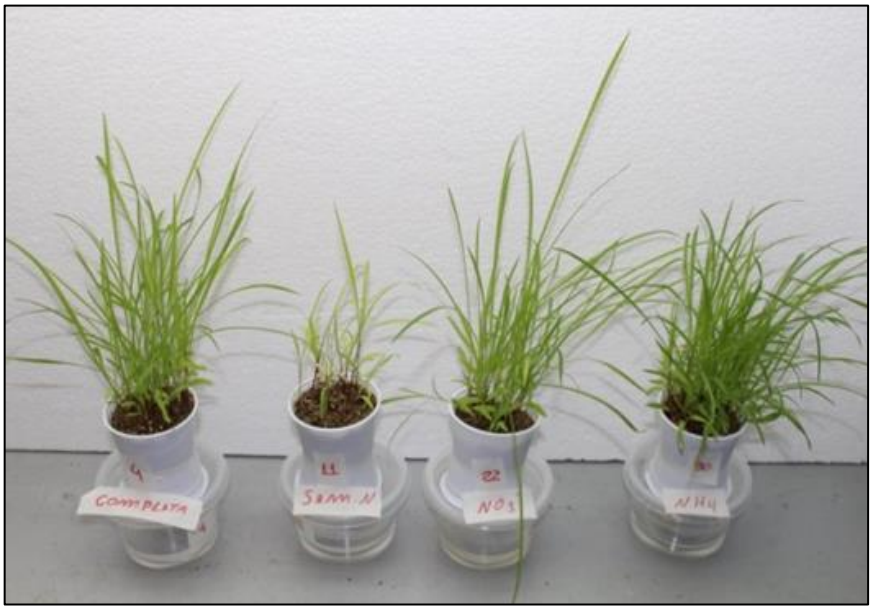
3.7 ÍONS AMÔNIO E NITRATO NO CRESCIMENTO E ABSORÇÃO DE ELEMENTOS EM BRAQUIÁRIA

As plantas foram cultivadas sob condições controladas (28 ± 4° C, 65 ± 5% UR, 14 h de fotoperíodo e 220 µmol m^{-2} s^{-1} PAR); em câmara ambiental Mark III Biotronette (LAB-LINE Instruments, Illinois, EUA). Mudas uniformes com 10 dias de idade de BRS Integra, da cultivar de *Urochloa* (Paciullo *et al.,* 2021), foram cultivadas em vasos contendo vermiculita e mantidas sobre recipientes que continham solução nutritiva de meias força de concentração (Clark, 1975) contendo (em mmol L^{-1}): KNO_3, 5044; $Ca(NO_3)_2.4H_2O$, 1490; $NH_4H_2PO_4$, 10; $MgSO_4.7H_2O$, 98,8; H_3BO_3, 23,12; $MnCl_2.4H_2O$, 4,58; $CuSO_4.5H_2O$, 0,16; $ZnSO_4.7H_2O$, 0,04; $Na_2MoO_4.2H_2O$, 0,22; e Fe-EDTA, 10, fornecidos por meio de um conjunto de capilares conduzidos por pavio. A

composição da solução nutritiva foi ajustada em cada tratamento de forma a não fornecer adição de N ou o nível original de 14,54g N 100 mL^{-1} estoque. O pH dos substratos foi mantido em 5,30, verificado diariamente (pH-meter 827, Metrohm AG, Herisau, Suíça) e ajustado com 1 N HCl ou 1 N NaOH, se necessário.

Os seguintes tratamentos foram avaliados: (1) NH_4^+ como única fonte de N, substituindo e ajustando os teores dos nutrientes formulados com $CaSO_4$, $(NH_4)_2SO_4$ e K_2SO_4; (2) NH^{4+}+NO^{3-}, ajustando a composição original elementar com $Ca(NO_3)_2$, KNO_3 e NH_4NO_3, (3) NO^{3-} como fonte única de N, substituindo e ajustando os teores de nutrientes formulados com $Ca(NO_3)_2$ e KNO_3; e (4) Sem N, ou seja, omitir a adição de N à solução, substituindo e ajustando os teores dos nutrientes formulados por $CaSO_4$ e K_2SO_4. Todas as soluções (fornecimento de 200 mL por pote) foram substituídas semanalmente (Figura 7).

Figura 7 – Montagem do experimento com as diferentes fontes de Nitrogênio



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Após 60 dias de crescimento, as plântulas foram colhidas e as seguintes medições realizadas: taxa de transpiração, teor de clorofila, altura da planta e peso fresco e seco das partes aéreas e raízes. Conjuntos separados de partes aéreas e raízes foram secas em um forno de convecção e moídos em um moinho analítico e posteriormente armazenados para avaliação de sua composição mineral

Os teores de N total foram determinados pelo método de Kjeldahl (Ferreira *et al*., 2015), consistindo na digestão da matéria seca em H_2SO_4 concentrado, destilação com NaOH (10 mol L^{-1}) e H_3BO_3 2% (p/v) e titulação com HCl (0,1 mol L^{-1}). A digestão da matéria seca foi realizada em bloco digestor, aproximadamente 0,5 g de amostras de plantas foram colocadas em um balão de digestão de vidro, adicionando 5 mL de HNO_3. Os materiais foram colocados em pré-digestão por pelo menos 12 horas e posteriormente aquecidos a 170ºC e seu volume foi completado para 25 mL com água deionizada e transferido para outros frascos. As análises dos elementos Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni e Zn foram realizadas em um ICPOES.

O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos, oito repetições e 20 plantas por parcela. Como muitas amostras de raízes secas estavam em quantidades abaixo do mínimo necessário para a realização de análises ICPOES por parcela, os dados foram combinados em pares dentro de cada tratamento para atender ao requisito metodológico.

3.8 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS

Os dados foram analisados por ANOVA one-way e as médias comparadas pelo teste de Tukey, utilizando o *software* MINITAB 2018, foram previamente submetidos à transformação de Box-plot (AZEVEDO *et. al.* 2016), visando verificar sua homocedasticidade e normalidade. As figuras de mérito obtidas foram limites de quantificação (LQ) e coeficiente angular do gráfico de calibração (INMETRO, 2016; ANVISA, 2017, Mimura *et al*., 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos neste trabalho.

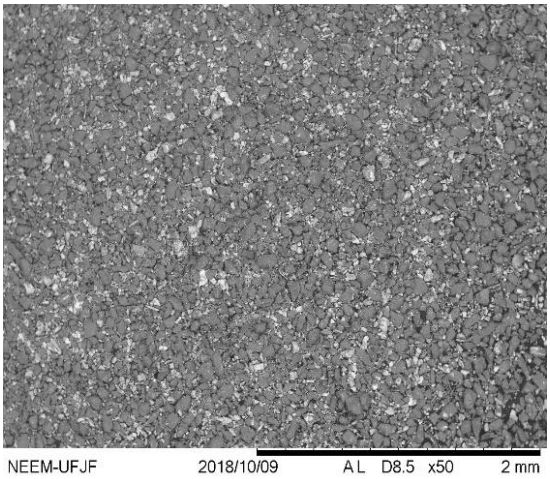
4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE RAIO-X POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS) E DIFRATOMETRIA DE RAIO-X (DRX)

Nas Figura 8 e Figura 9 são apresentadas as imagens obtidas por MEV com ampliação (x50, x250, x500 e x1000) para a amostra de rejeito e de solo, respectivamente. Os resultados revelaram, de forma abrangente, que não houve diferenças significativas em tamanho entre as partículas de rejeito e de solo. No entanto, em termos de morfologia foi possível observar diferenças significativas entre os dois tipos de amostras. As amostras de rejeito exibiram partículas menos agregadas, textura mais irregular e formato menos uniforme (Figura 8), enquanto as partículas de solo apresentaram agregações mais pronunciadas, superfícies mais lisas e formatos mais arredondados (Figura 9).

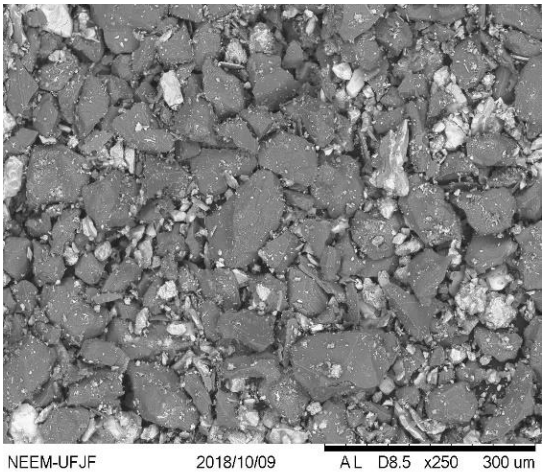
Segundo a literatura, a presença de agregações e a diferença na textura podem afetar a permeabilidade e o adensamento do solo, enquanto o formato das partículas pode influenciar a sua capacidade de retenção de água e nutrientes (Mantovanelli *et al.*, 2022). O rejeito apresenta características morfológicas que podem o tornar menos adequado para o crescimento das plantas em comparação com o solo; como, ter menos agregações, maior adensamento e menor porosidade, prejudicando a aeração e a troca de gases necessária para as raízes das plantas; além disso, a textura irregular dificulta o desenvolvimento das raízes e a penetração no solo. Em contraste, o solo possui agregações que podem melhorar a aeração e retenção de água e nutrientes devido a superfícies mais lisas e formatos mais uniformes, tornando-o mais adequado para o crescimento das plantas. No entanto, é importante lembrar que as condições ideais de solo podem variar dependendo das espécies de plantas e das necessidades específicas, além de outros fatores como a disponibilidade de nutrientes. Portanto, uma análise detalhada do solo e das plantas é necessária para determinar as condições de crescimento ideais (Tótola e Chaer, 2002).

Figura 8 – Micrografia da amostra de rejeito obtida por MEV: a) x50; b) x250; c) x500 e c) x1000

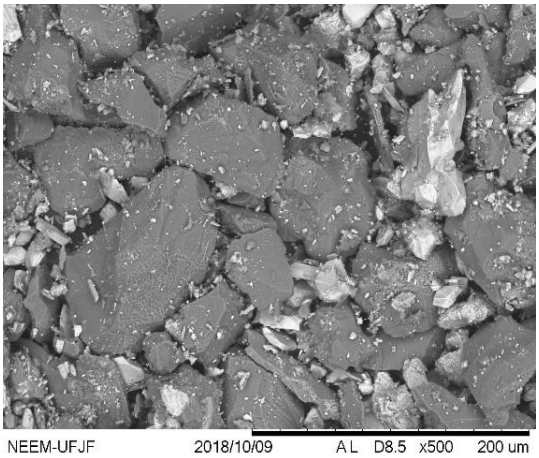
(a)



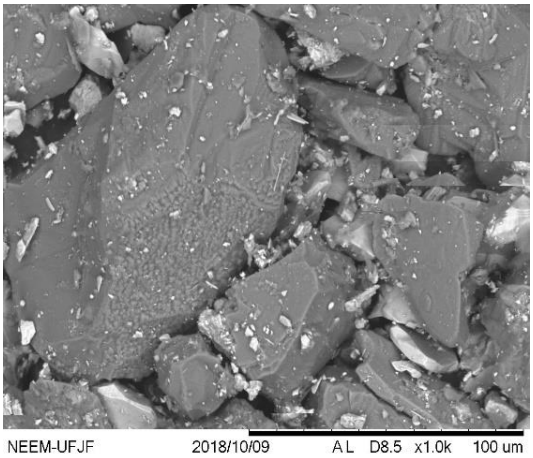
(b)



(c)

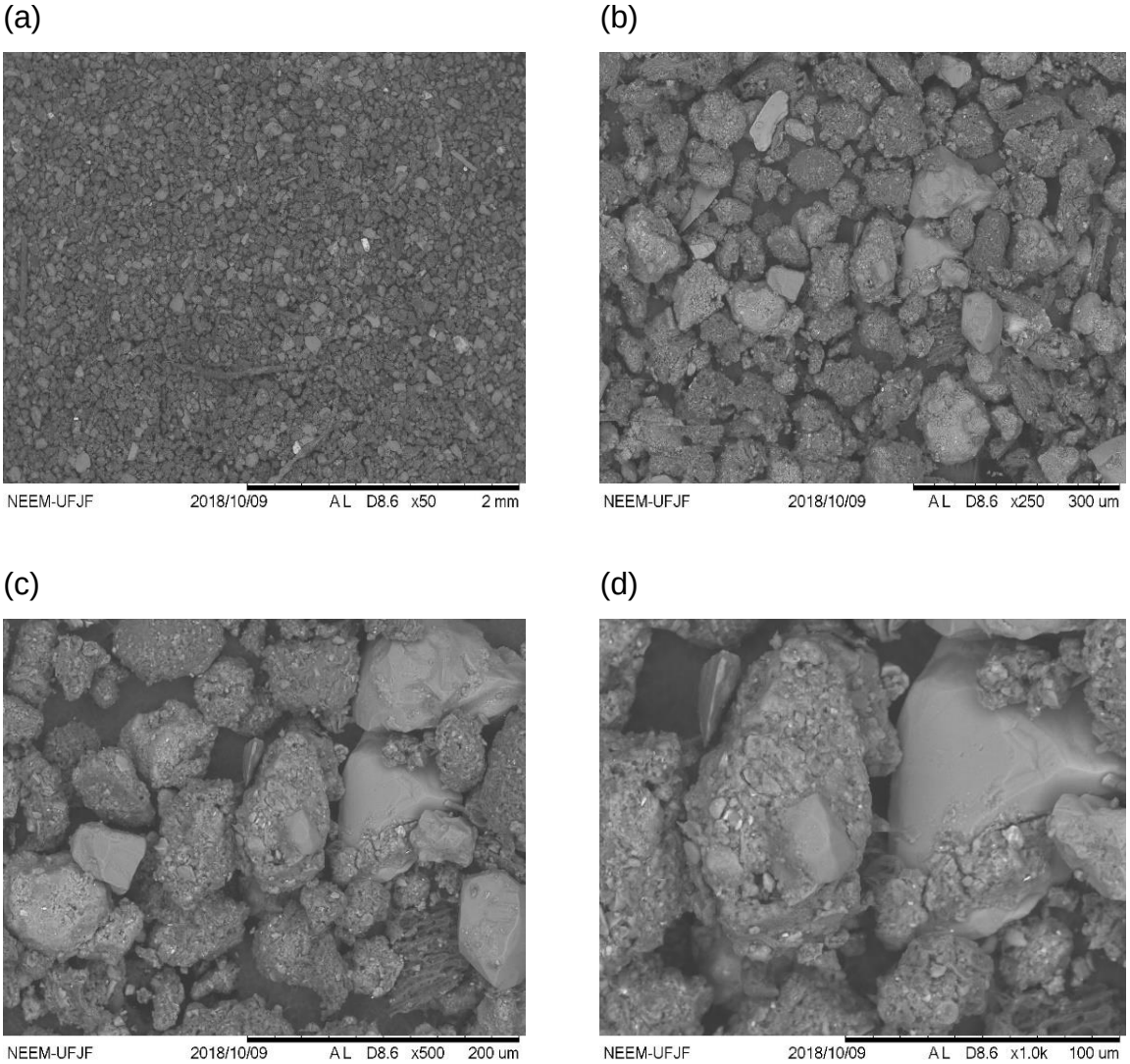


(d)



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 9 – Micrografia da amostra de solo obtida por MEV: a) x50; b) x250; c) x500 e c) x1000



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O solo apresenta uma série de propriedades e características que influenciam diretamente na sua capacidade de suportar a vida vegetal e na produtividade das culturas, tais como, acidez, capacidade de retenção de nutrientes, teor de matéria orgânica, composição granulométrica e densidade. A acidez potencial (H + Al) é fundamental para avaliar o grau de acidez do solo e sua habilidade de reter nutrientes para o crescimento das plantas; a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) determina a capacidade do solo de reter e disponibilizar íons nutrientes para as plantas, a matéria orgânica desempenha um papel essencial na melhoria da estrutura do solo e na promoção da sua fertilidade; a composição granulométrica influencia diretamente na

textura do solo, afetando a capacidade de retenção de água e aeração (Tavares *et al*., 2008).

Um conjunto de dados foram medidos por Freitas *et al.* (2023), onde a acidez potencial (H + Al), apresentou um valor de 2,03 $cmol_c$ kg^{-1} para o solo de controle, enquanto o rejeito uma acidez menor, com 0,6 $cmol_c$ kg^{-1}. O solo possuiu uma CTC significativamente maior, atingindo 11,27 $cmol_c$ kg^{-1}, enquanto o rejeito apresentou uma CTC substancialmente menor, com apenas 1,28 $cmol_c$ kg^{-1}; teor de matéria orgânica, o solo possuiu 2,52 dag kg^{-1} de matéria orgânica, enquanto o rejeito 0,29 dag kg^{-1}. Em relação à composição granulométrica o solo apresentou 28,5 dag kg^{-1} de argila; 6,5 dag kg^{-1} de silte e 65 dag kg^{-1} de areia e no rejeito, essas proporções variam para 6 dag kg^{-1} de argila, 38 dag kg^{-1} de silte e 56 dag kg^{-1} de areia. No solo, a densidade das partículas foi de 2,65 g cm^{-3}, enquanto no rejeito, esse valor aumenta para 3,1 g cm^{-3}. A densidade do solo é um pouco mais baixa, registrando 1,27 g cm^{-3} para o solo utilizado no estudo e 1,53 g cm^{-3} no rejeito. A densidade das partículas e a densidade do solo estão intimamente relacionadas ao adensamento do solo, afetando a permeabilidade e a capacidade de retenção de água; a alta densidade do solo compromete o crescimento das raízes e a absorção de água e nutrientes (Coelho *et al.*, 2020).

Resultados semelhantes também foram encontrados por diversos outros autores como, Freitas *et al*. (2023); Silva *et al*. (2022) e Couto *et al*. (2021), que destacam a importância de avaliar não apenas o tamanho, mas também a estrutura e a morfologia das partículas, pois tais características podem influenciar significativamente seus comportamentos. Os baixos teores de CTC, H + Al, matéria orgânica, argila e areia combinada com a alta densidade de partícula, elevadas proporções de silte em rejeitos puros, contribuem para o crescente adensamento do solo e, consequentemente, para a diminuição de sua fertilidade.

A análise de MEV e os espectros de EDS revelaram diferenças significativas na composição entre as amostras de rejeito e solo (Figura 10 e Figura 11). De acordo com os dados obtidos utilizando-se essas técnicas foi possível inferir que amostra de rejeito é composta principalmente por Al, Fe, O e Si (Figura 10 a e Figura 11 a), enquanto a amostra de solo é mais diversificada, contendo Al, Ca, Fe, Mg, O, P, Si e S (Figura 10 b e Figura 11 b), Tabela 3. Essas diferenças de composição podem fornecer informações importantes sobre os processos de mineração e a geologia da região (Oliveira *et al*., 2008). A presença dos elementos Ca, Mg, P e S no solo é

benéfica, pois são nutrientes para as plantas. No entanto, a presença de teores elevados de Fe e Al no rejeito pode afetar a disponibilidade de outros nutrientes para as plantas, uma vez que esses elementos podem competir com outros cátions por locais de adsorção no solo. Concentrações altas para Fe, Mn e Al no rejeito foram observados nos estudos de Andrade *et al*. (2018), o rejeito continha frações não extraíveis de Fe provenientes da mineração.

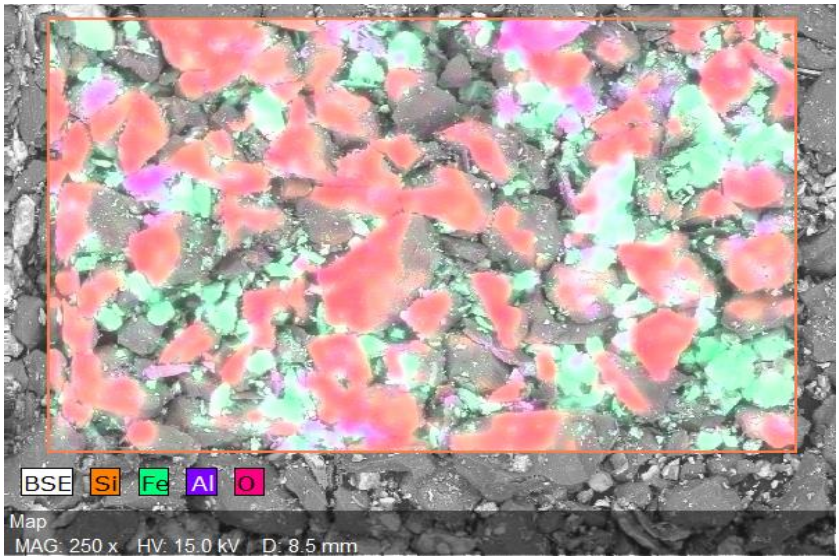
Os dados da Tabela 3 mostram que os teores de Fe no rejeito são muito elevados, chegando a 22%, e os de Si também são significativamente altos, em torno de 33%. Isso indica uma concentração considerável desses elementos relacionados à mineração. Em contraste, o solo contém teores mais baixos de Fe (6%) e Si (8%), já o teor de Al no rejeito é duas vezes menor do que no solo. É importante notar que os teores de O (31,2% para o solo e 42,8 para o rejeito%) não apresentaram diferenças significativas entre as amostras investigadas, sugerindo que a concentração de ânions de oxigênio que se ligam às espécies catiônicas mais abundantes (Si, Al, Fe, Mg) foi semelhante em ambas as amostras.

Outros estudos, como o de Pires *et al.* (2003), encontraram teores ainda mais elevados de ferro, cerca de 57,2%, além de 14% de SiO_2 e 1,3% de Al em amostras semelhantes. Já Segura et al. (2016) relatou teores de Si (6,2%), Fe (31,4%), Al (5,3%), e outros elementos como Ca, P, Br e Cd. Isso demonstra que a composição varia dependendo da área de estudo e das propriedades específicas do local de coleta.

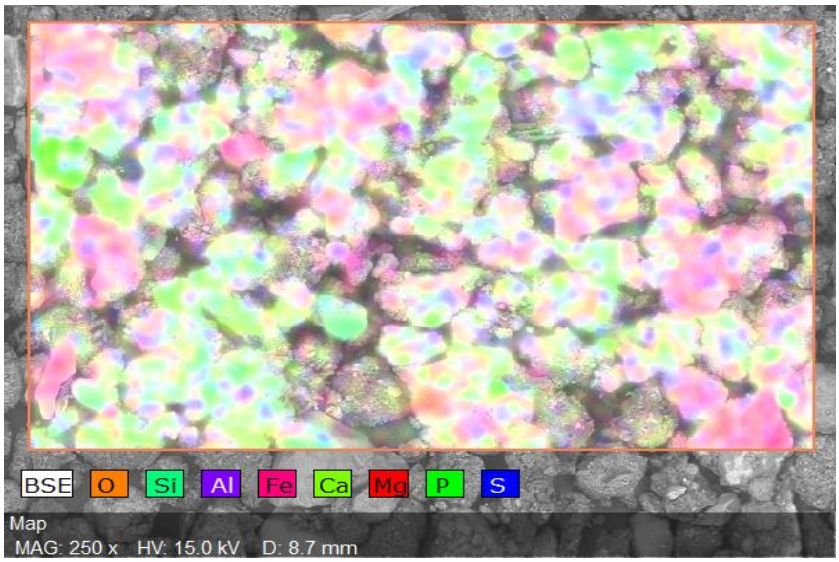
Couto *et al*. (2021) encontraram altos teores de P no solo contaminado por rejeito, enquanto o teor de K foi maior no solo não contaminado. Os resultados sugerem que a alta presença de fósforo solúvel adsorvido pode estar relacionada à presença de óxidos de ferro, como a hematita, que têm afinidade pelo fosfato. Isso pode ser resultado de processos químicos na superfície dos óxidos de ferro. Os micronutrientes Fe e Mn também foram encontrados em teores elevados na área contaminada, e a disponibilidade desses elementos pode ser influenciada pelo pH do solo (Zago *et al.*, 2019).

Figura 10 – Espectro obtido por MEV com os elementos presentes para a amostra de a) rejeito e b) solo

(a)



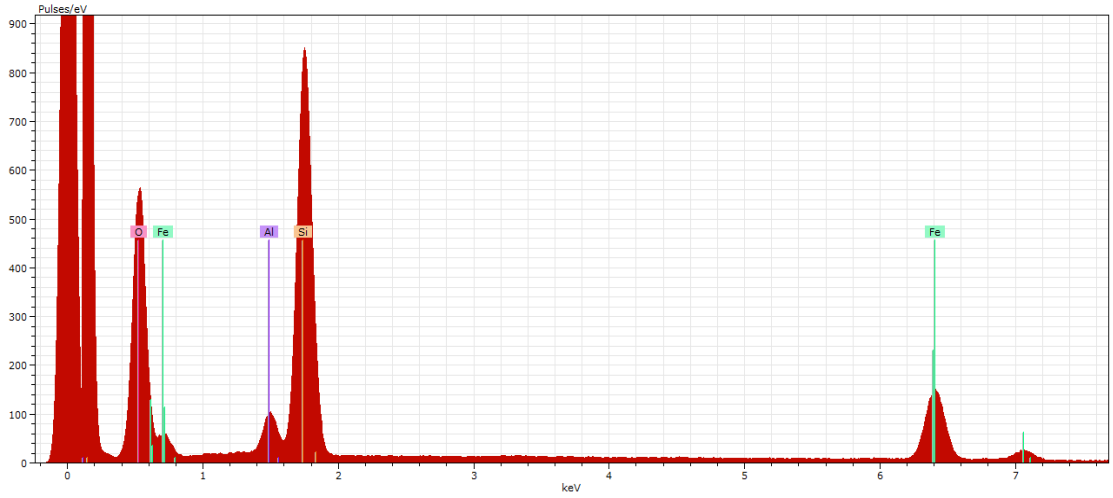
(b)



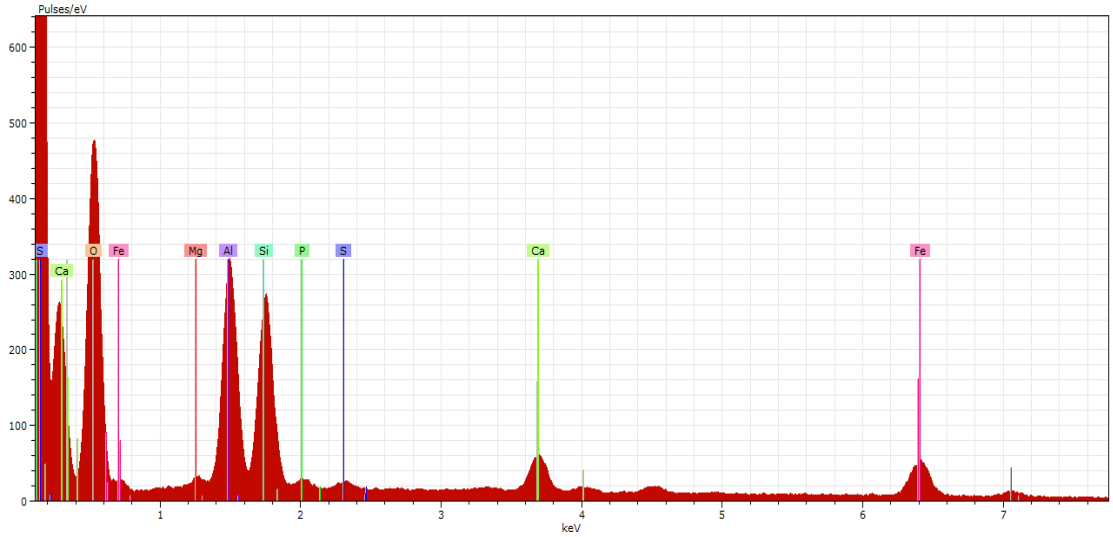
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 11 – Espectro obtido por EDS com os elementos presentes para a amostra de a) rejeito e b) solo

(a)



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 3 – Composição da amostra de rejeito e solo obtida por microanálise EDS

Amostra	Elementos (% m m^{-})							
	Al	Fe	O	Si	Ca	P	Mg	S
Rejeito	3,5	22,2	42,8	32,9	-	-	-	-
Solo	8,3	6,1	31,2	7,7	2,5	0,4	0,4	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A análise por DRX nas amostras de rejeito e de solo revelou diferenças significativas em sua composição mineralógica, como pode-se observar na Figura 12 a e b, e na Tabela 4. Na Figura 12 a, podemos observar que nas amostras de rejeito, os principais minerais identificados foram quartzo (SiO_2), goethita ($FeO(OH)$) e hematita (Fe_2O_3). Por outro lado, nas amostras de solo (Figura 12 b), o mineral predominante foi o quartzo, embora em menor quantidade em comparação com o rejeito; além disso, foram identificadas outras fases cristalinas, incluindo goethita - $FeO(OH)$, gibbsita – $Al(OH)_3$, caulinita – $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, feldspato - $(K, Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$ e mica - $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$.

Tabela 4 – Comparativo da quantidade de minerais presentes nas amostras de rejeito (a) e solo (b)

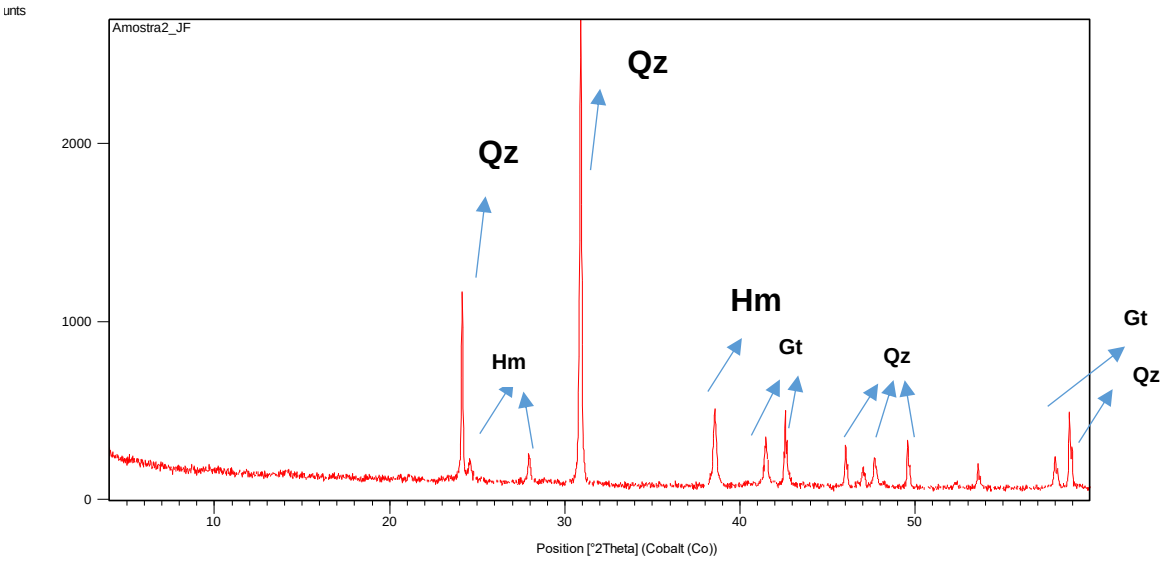
Amostras	Minerais						
	Quartzo	Hematita	Goethita	Gibbsita	Caulinita	Mica	Feldspato
Rejeito	+++++++	+++	++	--	--	--	--
Solo	++++	--	+++	+++	++	+	+

+++++++fase majoritária presente no rejeito; ++++ fase majoritária (pouco em relação à amostra de rejeito, mas ainda predominante na amostra) +++ fases abundantes; ++ fases minoritárias; + fases minoritárias; -- fase ausente.

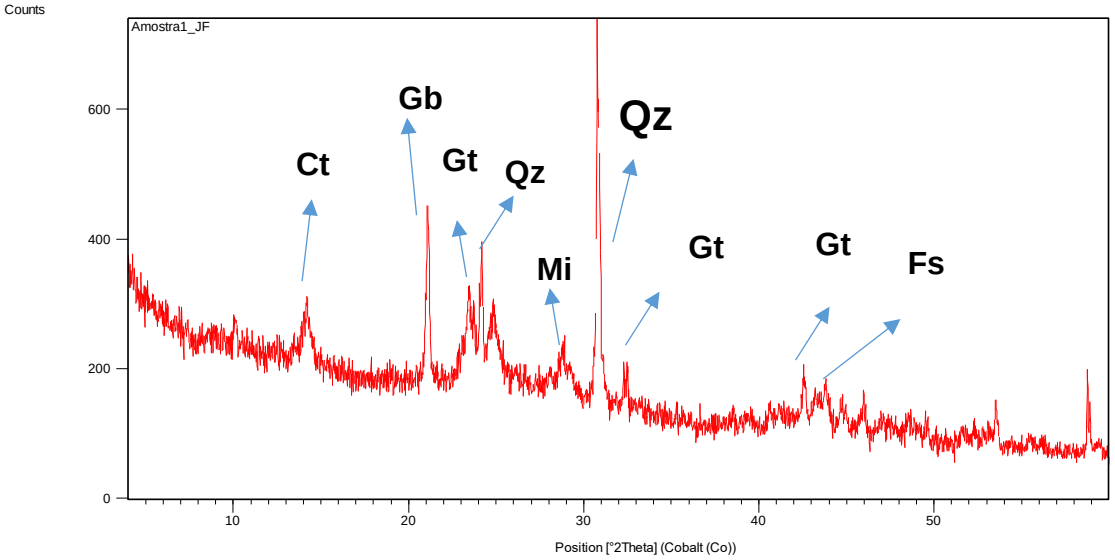
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 12 – Difratograma de raios X, amostras (fração < 106µm), a) rejeito: quartzo (Qz), goethita (Gt) e hematita (Hm) e b) solo: quartzo (Qz), goethita (Gt), gibbsita (Gb), caulinita (Ct), feldspato (Fs) e mica (Mi)

(a) Rejeito



(b) Solo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Esses dados estão em concordância com o estudo realizado por Couto *et al*. (2021), onde foram encontrados quartzo e hematita no rejeito de minério de ferro, minerais comuns em barragens de rejeitos de mineração de ferro. Já no solo de pastagem não contaminado da região, foram encontrados quartzo, hematita, goethita, caulinita, além de outros como muscovita ($KAl2(AlSi_3O_{10})$ $(OH)_2$) e calcita ($CaCO_3$), apresentando uma diversidade maior de minerais, o que é benéfico para a fertilidade, pois a presença de argilominerais, como caulinita e muscovita, contribui para a retenção de carbono orgânico, melhor retenção de água e micronutrientes no solo. Já o rejeito, composto principalmente por quartzo, apresentou valores mais baixos de carbono orgânico e CTC, sugerindo uma menor capacidade de reter nutrientes.

O estudo de Santos *et al.* (2019) também trouxe informações relevantes, demonstrando que em solos não contaminados por rejeitos, havia uma sequência mineralógica que incluía quartzo (areia), seguido por mica e caulinita (argilas), e hematita. Em contraste, nos locais impactados pela deposição de rejeitos, houve predominância de quartzo e hematita nos sedimentos. Essa variação na composição mineral pode ser atribuída às características geológicas da região do Quadrilátero Ferrífero, que possui uma variedade de minerais, como quartzitos, filitos, itabiritos, silicatos contendo ferro, micas, piroxênio, carbonatos, feldspatos, hematita, goethita, magnetita e argilas. No que diz respeito aos tipos de solos, a região do Vale do Rio Doce abriga uma coexistência de Latossolos, Cambissolos e Argissolos, sendo estes últimos mais ricos em termos de fertilidade química (Sá *et al*., 2023).

A exploração de minério de ferro na região envolve processos como britagem, trituração e flotação, nos quais o ferro é separado e concentrado por meio do uso de substâncias como NaOH, $Ca(OH)_2$ e amina, sendo a mineralogia dos rejeitos ricos em ferro dominada por goethita (64%), hematita (25%), quartzo (11%) e caulinita (7%) (Pires *et al*., 2003). A predominância do mineral quartzo no rejeito sugere fortemente sua origem vinculada às atividades de mineração. A presença notável de quartzo e hematita no rejeito está diretamente ligada ao processo de beneficiamento do minério de ferro, no qual a flotação reversa é empregada para concentrar o ferro e separar os minerais indesejados, conhecidos como ganga (Duarte, 2020). Contudo, parte desses óxidos de ferro acaba sendo arrastada para o rejeito, como evidenciado pelos dados de EDS, que revelaram altas concentrações de ferro (Fe) e silício (Si). Embora algumas fases minerais se assemelhem tanto no rejeito quanto no solo, a predominância do quartzo e a presença significativa de goethita e hematita no rejeito

os distinguem das características naturais do solo. No solo, o quartzo, goethita e hematita desempenham papéis cruciais na formação e qualidade do solo. Os depósitos brasileiros são compostos principalmente por hematita, goethita e magnetita, correspondendo a Fe, Al e Mn, respectivamente (Andrade *et al*. 2018).

O solo possui uma maior diversidade de minerais em comparação com o rejeito, e essa diversidade mineralógica é benéfica para a fertilidade do solo, uma vez que proporciona uma maior quantidade de nutrientes, muitos dos quais estão em formas mais acessíveis às plantas, como por exemplo, na forma de íons solúveis na solução do solo. Além disso, a diversidade mineral também pode influenciar a capacidade de troca catiônica, o pH e a matéria orgânica do solo, contribuindo para a sustentação e a saúde geral do solo. Os resultados estão em consonância com diversos estudos encontrados na literatura, como o de Pereira, Ker e Almeida (2012), Queiroz *et al*. (2018); Andrade *et al.* (2018), entre outros.

4.2 DETERMINAÇÃO DOS ANALITOS NAS AMOSTRAS DE REJEITO E SOLO

Para a abertura das amostras de rejeito e solo, foi utilizado o método de digestão assistida por radiação micro-ondas. Neste estudo, um forno de micro-ondas com cavidade e frasco fechado foi empregado, permitindo a extração eficiente de diversos analitos em matrizes complexas e gerando menores volumes de resíduos em comparação com os métodos convencionais de abertura (Coelho *et al*., 2020; Sá *et al*., 2023). As amostras solubilizadas foram analisadas por ICPOES, e os resultados para a determinação de Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni e Zn estão apresentados na Tabela 5.

Em termos de nutrientes, tais como Ca, Cu, Mg e Zn, foi possível observar que as concentrações no solo foram maiores que na amostra de rejeito. Já a concentração de Fe (cerca de 63.000 mg kg^{-1}) e Mn (373 mg kg^{-1}) foram maiores no rejeito, atestando que a essa é composta possivelmente por óxidos/hidróxidos de Fe e Mn (Queiroz *et al*., 2021). Os valores ideais de concentração de nutrientes no solo para garantir a fertilidade e o crescimento saudável das plantas podem variar de acordo com o tipo de solo, aqui estão alguns intervalos gerais de concentrações ideais: N: 0,1% a 2% em massa; P: 400 a 2.000 mg kg^{-1} ; K:300 a 14.000 mg kg^{-1}; Ca: 8000 a 25000 mg kg^{-1}; Mg: 1000 a 4000 mg kg^{-1}; S: 100 a 1.000 mg kg^{-1}; Fe: 1.000 a 40.000 mg kg^{-1}; Mn: 10 a 40 mg kg^{-1}; Cu: 1 a 30 mg kg^{-1} e Zn: 10 a 90 mg kg^{-1} (Ronquim, 2010; Malavolta, 2006); considera-se a faixa de pH entre 6,0 e 6,5 adequada para a maioria das plantas cultivadas no Brasil, pois nessa faixa a maioria dos nutrientes para as plantas estão disponíveis . Além disso, outros fatores, como a matéria orgânica e a textura, também influenciam a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Lopes, 1998; Santos, Primavesi e Bernardi, 2010; Mendes, 2007). Com base nas concentrações de Ca, Mg, Mn, Zn e, idealmente, P, o solo parece possuir propriedades adequadas para a agricultura.

Os resultados das concentrações de elementos químicos em amostras de rejeitos de mineração e solo indicaram que o Fe e Mn tem concentrações mais elevadas no rejeito que no solo, corroborando estudos anteriores em áreas de mineração (Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020). Em contraste, os analitos Al, Ca, Mg e Zn apresentam maiores teores no solo do que no rejeito; Ni, Cr e Cu foram detectados apenas no solo, sugerindo ausência ou concentrações muito baixas

desses elementos nos rejeitos o que coincide com resultados de Araújo *et al*. (2022) e Costa *et al*. (2018).

Com relação aos elementos tóxicos foi observada a presença de Cd nas amostras de rejeito numa concentração de 5 mg kg^{-1}, excedendo o valor máximo permitido (VMP) pela legislação brasileira (COPAM 166) que estabeleceu o valor de VMP de 3 mg kg^{-1}. O teor Cr foi de 44 mg kg^{-1} na amostra de solo, porém abaixo do valor máximo permitido (150 mg kg^{-1}) para solos para uso agrícola de acordo com a Resolução Copam (2011). Os demais analitos encontram-se dentro dos padrões regulatórios.

A concentração média de N foi de 0,04% em massa no rejeito e 1,62% no solo, de acordo com a método de Kjeldahl. Os valores de pH foram de 7,67 para o rejeito e 5,90 para o solo, consistentes com o trabalho de Costa *et al*. (2018), onde as concentrações médias de N no rejeito e solo foram de 0,1 e 1 g kg, respectivamente, e os valores de pH em H_2O foram de 8,1 para o rejeito e 5,9 para o solo. A ordem de concentração dos analitos nas amostras de rejeito foram Fe > Al > Mg > Ca > N > Mn > Zn > Cd, já para as amostras de solo a ordem de concentração foi Fe > N > Al > Ca > Mg > Mn > Zn > Cr > Cu > Ni.

A quantificação de macro e microelementos associada a determinação do teor de N e do pH, fornecem informações fundamentais para a compreensão da composição e possíveis problemas de contaminação nas amostras de rejeito e solo. Esse conhecimento é crucial para orientar a tomada de decisões e a implementação de medidas de proteção ambiental, tendo em vista os impactos da mineração no meio ambiente. Estudos abordaram os efeitos da deposição de rejeitos de mineração no solo, incluindo alterações na disponibilidade de nutrientes como Fe, Mn e Cu e remoção de elementos tóxicos, como Cr, As e Cd, que podem influenciar o crescimento de plantas em iniciativas de reflorestamento (Freitas *et al*., 2023).

A deposição de rejeitos também afetou o pH do solo, inicialmente tornando-o ligeiramente alcalino, mas com tendência a retornar aos níveis ácidos típicos da região com o tempo, podendo aumentar a biodisponibilidade desses metais no solo. Contudo, a complexa interação entre a matéria orgânica do solo, a atividade microbiana e as práticas de manejo tornam o entendimento da biogeoquímica do tecnosolo um desafio, ressaltando a necessidade de monitoramento contínuo para

avaliar as mudanças na disponibilidade de metais para os diferentes compartimentos ambientais (Segura *et al*., 2016).

Alguns estudos identificaram maiores concentrações de Fe e Mn em áreas contaminadas pelo rejeito de mineração, enquanto áreas não afetadas exibiram maiores teores de Cu e Zn. A adição de matéria orgânica pode ser uma estratégia benéfica para aprimorar a qualidade do solo, pois melhora a retenção de água e na fertilidade do solo (Couto et al., 2021; Silva et al., 2022).

Tabela 5 – Teores totais dos analitos determinados após digestão assistida por radiação micro-ondas nas amostras de rejeito e solo por ICPOES, após digestão ácida. Concentração em mg kg^{-1} ± desvio padrão, n=7

Elementos	(mg kg^{-1})		
	Rejeito	Solo	[a]VMP
Al	10.782 ± 1.444	12.150 ± 7.680	-
Ca	1.524 ± 1.718	11.208 ± 2.469	-
Cd	5 ± 0,8	< LD[b]	3
Cr	< LD[c]	56 ± 23	150
Cu	< LD[d]	14 ± 4	200
Fe	62.966 ± 2.059	22.951 ± 7.222	-
Mg	2.706 ± 1.397	4.398 ± 3.267	-
Mn	373 ± 227	246 ± 71	-
Ni	< LD[e]	4,3 ± 2,2	70
Zn	26 ± 31	78 ± 46	450
N (%)	0,04	1,62	-
pH	7,67	5,90	

[a]Valores máximos permitidos pela legislação brasileira (COPAM 166). Valores abaixo dos limites de quantificação (LQ): [b]0,002 mg kg^{-1}, [c]0,006 mg kg^{-1}, [d]0,008 mg kg^{-1}, [e]0,004 mg kg^{-1} (INMETRO, 2016; ANVISA, 2017, Mimura *et al*., 2016).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3 AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS DA *UROCHLOA DECUMBENS* NOS EXPERIMENTOS COM REJEITO E SOLO EM DIFERENTES PROPORÇÕES DESENVOLVIDAS EM CÂMARA DE CRESCIMENTO

Neste estudo foram realizadas avaliações fisiológicas da *Urochloa decumbens* em experimentos que envolveram a utilização de vermiculita e a combinação de rejeito e solo em diferentes proporções (adição de rejeito ao solo: 0, 25, 50, 75 e 100%). No presente estudo, em vista de suas características, a vermiculita foi utilizada como testemunha, para isolar e melhor quantificar os efeitos causados pelo rejeito da Samarco sobre o crescimento e balanço nutricional das plantas de braquiária avaliadas. Os meios de cultivo para uso em substituição ao solo devem ser inertes (ou pelo menos isentos de compostos prejudiciais), com elevada capacidade de absorção de água e de fácil reposição (Muller *et al.*, 2017). Dentre os substratos inorgânicos mais utilizados, a vermiculita destaca-se por atender a esses requisitos e possuir vantagens adicionais, tais como ter uma elevada taxa de expansão quando hidratada, propiciar alto grau de aeração e sustentação para o sistema radicular das plantas e permitir troca iônica em fases orgânicas e inorgânicas (Voropaeva *et al.*, 2014). Dessa forma, é crescente sua aplicação e reuso em estudos nutricionais de diferentes cultivos vegetais, inclusive em associação a outros substratos de crescimento (Kremenetskaya *et al.*, 2020).

As avaliações fisiológicas foram conduzidas em câmaras de crescimento (Biotronette), o que permitiu monitorar de perto o desenvolvimento das plantas sob diferentes condições experimentais. Os resultados fisiológicos produzidos nas plantas em relação aos tratamentos estão apresentados na Tabela 6, sendo que para cada tratamento foram realizadas cinco repetições e dez plantas por parcela, totalizando 250 plantas em cada avaliação; esse procedimento foi repetido três vezes. Após um período de crescimento contínuo de 60 dias, as plântulas foram avaliadas quanto ao comprimento da parte aérea, número de folhas verdes e mortas, índice SPAD e taxa de transpiração.

O desenvolvimento da parte aérea das plantas, que inclui caules e folhas, apresentou variação nos diferentes tratamentos, mas as diferenças não foram significativas. As médias variaram de 45,3 cm a 51,3 cm (Figura 13 a, Tabela 6). A quantidade de folhas verdes e secas também variou entre os tratamentos de 7 a 12 folhas verdes e 2 a 5 folhas secas (Figura 13 b-c, Tabela 6).

Para tirar conclusões mais precisas foi realizada análises estatísticas para determinar se as diferenças observadas foram significativas. Para essa finalidade foi utilizado o teste de Tukey ($p > 0,05$). Em geral os resultados apresentados na Figura 13, indicaram que a mistura de rejeito com o solo, nas proporções estudadas, não causou diferenças significativas no comprimento da parte aérea, número de folhas verdes, número de folhas secas, teor de clorofila e transpiração nos diferentes tratamentos.

O estudo de Ribeiro Junior *et al*. (2021), examinou o impacto do rejeito de mineração de ferro nas espécies *Urochloa decumbens, Schinus terebinthifolius* e *Eremanthus incanus;* e no solo. A *Urochloa decumbens* não foi significativamente afetada devido à sua capacidade de crescer em solos com baixa fertilidade e eficiente taxa de fotossíntese, assim como foi observado no presente estudo. No entanto, as espécies *Schinus terebinthifolius* e *Eremanthus incanus* foram afetadas de maneiras variadas, com *Eremanthus incanus* sendo menos afetada na presença de rejeito de mineração. O estudo enfatizou a importância de considerar melhorias biológicas e bioquímicas do solo e a reintrodução de espécies vegetais adequadas para recuperar áreas impactadas por resíduos de mineração de ferro. Para áreas afetadas por rejeitos contendo altas concentrações de ferro a espécie *Urochloa decumbens* parece ser a mais indicada para projetos de recuperação (Ferreira *et al*., 2022; Coelho *et al*., 2020).

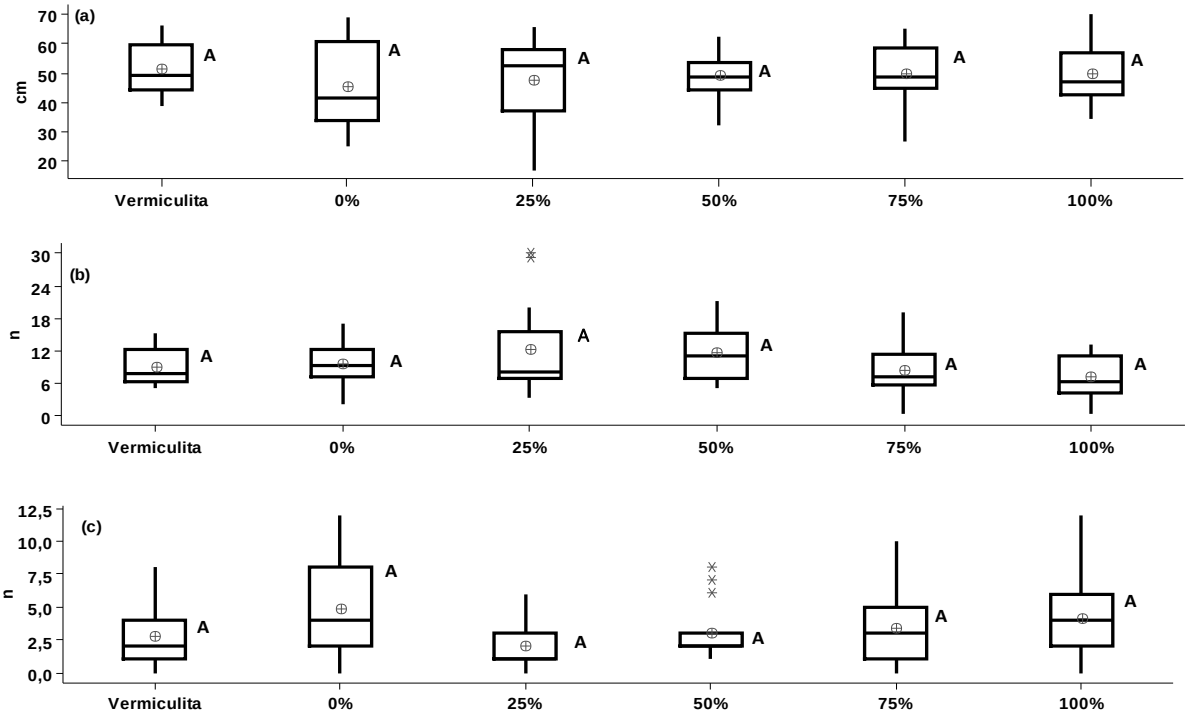
Tabela 6 – Avaliação dos dados fisiológicos da *Urochloa decumbens* em relação aos tratamentos com rejeito e solo em diferentes proporções. Médias ± desvio padrão, n=15

Parâmetros	Tratamentos					
	Vermiculita	0%	25%	50%	75%	100%
Parte Aérea (cm)	51,3 ± 8,6[a]	45,3 ± 15,1[a]	47,6 ± 13,7[a]	49,0 ± 8,2[a]	49,8 ± 11,2[a]	49,7 ± 9,9[a]
Folhas verdes	9 ± 3[a]	9 ± 4[a]	12 ± 9[a]	12 ± 5[a]	8 ± 5[a]	7 ± 4[a]
Folhas secas	3 ± 3[a]	5 ± 4[a]	2 ± 2[a]	3 ± 2[a]	3 ± 3[a]	4 ± 3[a]
Clorofila (SPAD)	26,4 ± 7,2[a]	26,7 ± 7,2[a]	29,6 ± 6,0[a]	29,1 ± 3,6[a]	26,7 ± 3,5[a]	27,3 ± 4,4[a]
Transpiração (mm s^{-1})	8,11 ± 7,29[a]	7,90 ± 6,49[a]	6,29 ± 4,54[a]	5,90 ± 4,06[a]	5,97 ± 2,97[a]	6,73 ± 5,06[a]
Peso verde folhas (g)	2,587 ± 1,569[a]	2,313 ± 1,740[a]	3,542 ± 2,797[a]	2,924 ± 1,608[a]	2,406 ± 1,614[a]	2,163 ± 1,331[a]
Peso verde raízes (g)	0,332 ± 0,491[a]	0,189 ± 0,203[a]	0,297 ± 0,365[a]	0,293 ± 0,289[a]	0,262 ± 0,240[a]	0,411 ± 0,432[a]
Peso verde total (g)	2,919 ± 1,768[a]	2,502 ± 1,788[a]	3,839 ± 2,996[a]	3,217 ± 1,825[a]	2,668 ± 1,741[a]	2,574 ± 1,722[a]
Peso seco folhas (g)	0,515 ± 0,312[a]	0,605 ± 0,360[a]	0,746 ± 0,585[a]	0,659 ± 0,348[a]	0,620 ± 0,372[a]	0,649 ± 0,365[a]
Peso seco raízes (g)	0,110 ± 0,070[b]	0,113 ± 0,083[b]	0,174 ± 0,121[ab]	0,197 ± 0,140[ab]	0,196 ± 0,131[ab]	0,249 ± 0,138[a]
Peso seco total (g)	0,625 ± 0,371[a]	0,718 ± 0,437[a]	0,920 ± 0,695[a]	0,856±0,476[a]	0,815 ± 0,488[a]	0,898 ± 0,486[a]

As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

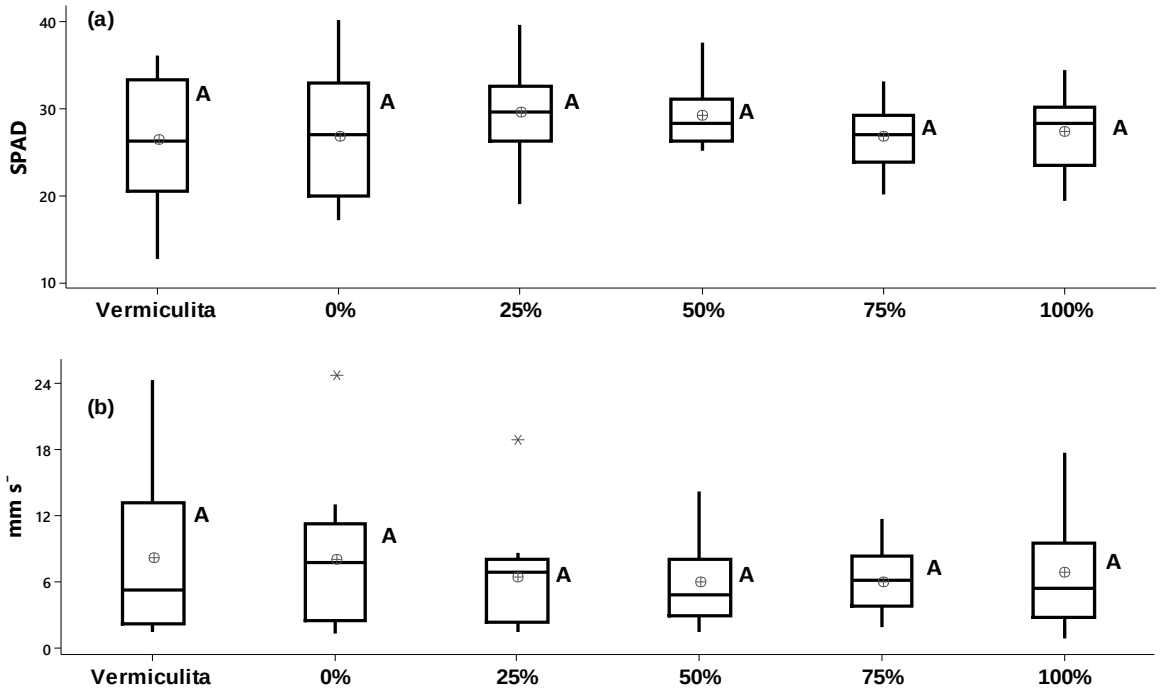
Figura 13 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre os indicadores fisiológicos comprimento da parte aérea (a), número de folhas verdes (b), número de folhas secas (c) em capim-braquiária



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p>0,05).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O teor de clorofila e a taxa de transpiração também variaram entre os tratamentos, mas, novamente, não foi observado uma tendência clara de aumento ou diminuição com o aumento da proporção de rejeito (Figura 14, Tabela 6). Os pesos verdes das folhas, raízes e o peso verde total da planta também variaram, porém, novamente não foi observado uma tendência clara à medida que a proporção de rejeito aumentou (Figura 15). O estudo de Silva *et al*. (2022) comparou o crescimento e os níveis de clorofila em *Urochloa decumbens* em diferentes condições. Segundo os autores as plantas ficaram mais altas e os níveis de clorofila mais elevados em solo não contaminado do que as plantas cultivadas em solo contaminado com rejeitos.

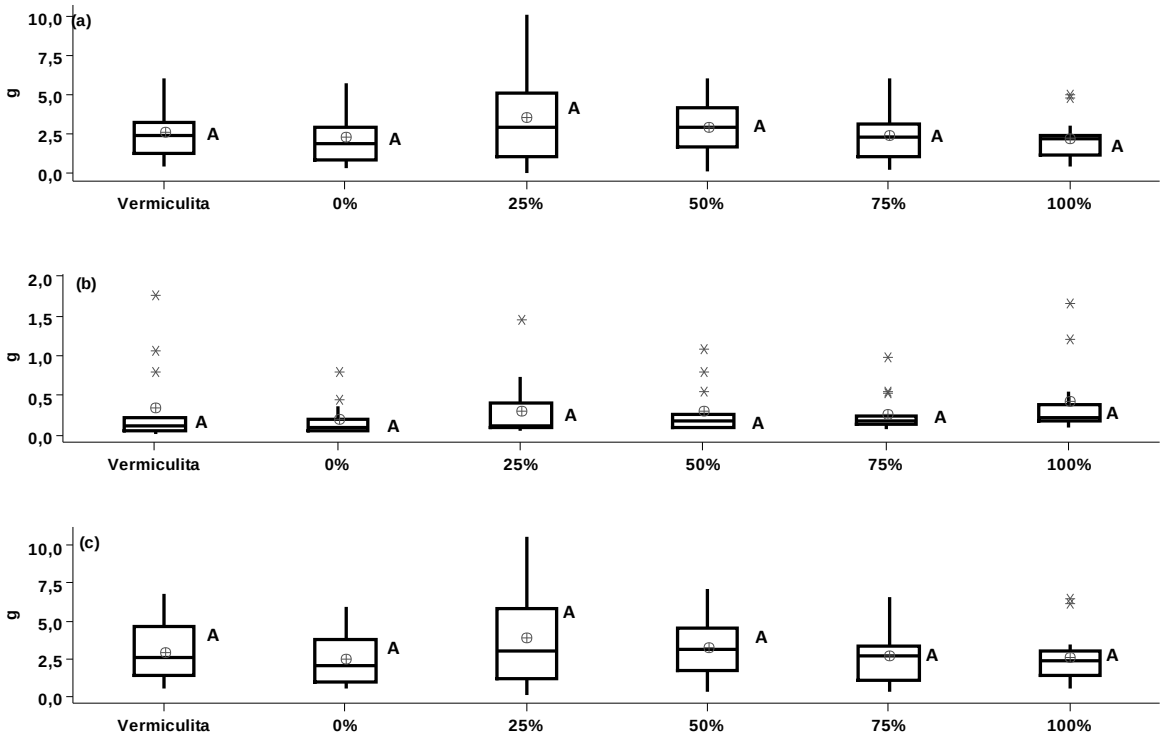
Figura 14 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre os indicadores fisiológicos teor de clorofila (a) e transpiração (b) em capim-braquiária



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p>0,05).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 15 – Efeito da proporção do rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre os indicadores fisiológicos peso verde total (a), folhas (b), das raízes (c) em capim-braquiária

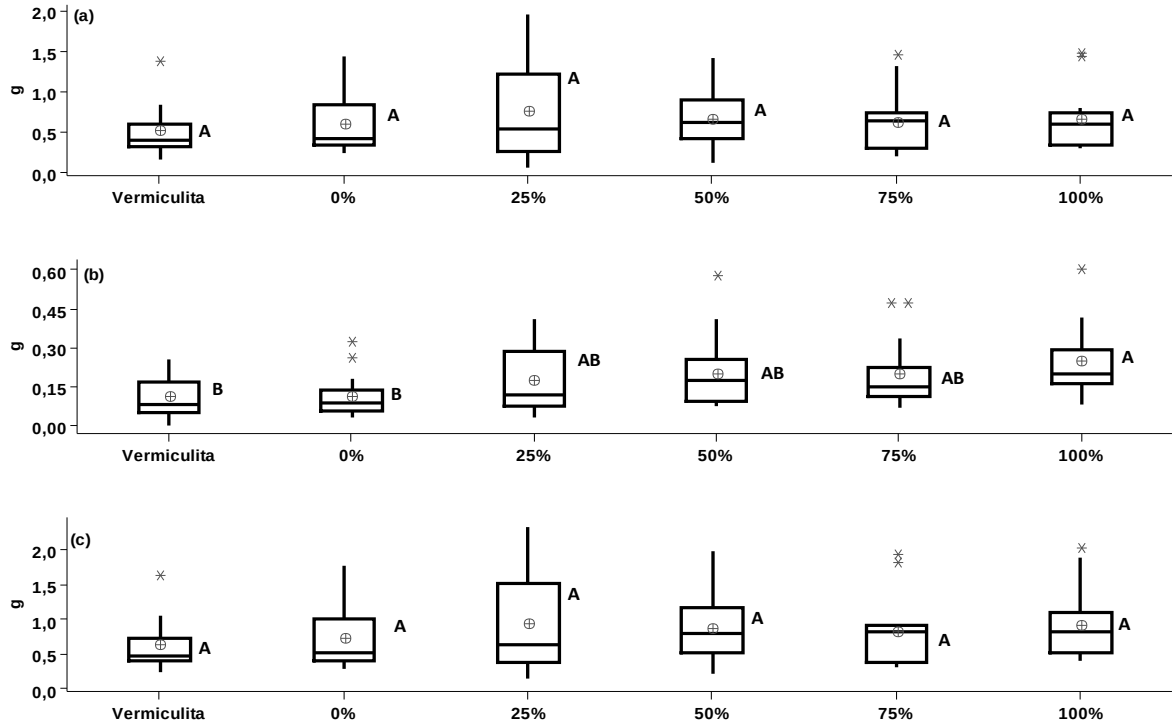


Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p>0,05).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O peso seco das folhas, raízes e o peso seco total mostraram uma tendência de aumento à medida que a proporção de rejeito no solo aumentou, mas as diferenças não foram significativas, com exceção do peso seco da raiz que apresentou diferença significativas nos tratamentos à medida que aumentou a quantidade de rejeito no solo (Figura 16, Tabela 6). Não foram verificadas diferenças significativas para os pesos verde total, folhas e raízes, pesos secos total e folhas. O peso seco das raízes mostrou aumento significativo à medida que a proporção de rejeito foi aumentada no substrato (Figura 16 b). As causas para esse comportamento ainda precisam ser investigadas. Todavia, dois processos de reação de plantas a situações adversas podem ser considerados como possíveis causas. O primeiro processo seria a promoção do crescimento radicular em condições de estresse, inclusive otimizando a absorção de

água, para manutenção da viabilidade do sistema radicular, como estratégia de resistência (Huang, Duncan e Carrow, 1997). Outro processo seria o crescimento radicular com acumulação de elementos em excesso, como estratégia de preservação da parte aérea e, principalmente, do aparato fotossintético (Chaves *et al.* 2011*)*.

Figura 16 – Efeito da proporção do rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre os indicadores fisiológicos peso seco total (a), raízes (b) e folhas (c) em capim-braquiária



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p>0,05).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A *Urochloa decumbens* demonstra um notável desenvolvimento de seu sistema radicular em condições de campo, podendo estender-se por vários metros de profundidade no solo. Essa característica a torna particularmente adequada para recuperar nutrientes que se deslocam para camadas mais profundas, ou que foram recobertos por uma camada de solo com baixa diversidade nutricional, como no caso do rejeito. Esse aspecto evidencia a alta capacidade de enraizamento da braquiária, permitindo sua sobrevivência mesmo durante a estação seca. Espécies com raízes

profundas têm uma vantagem considerável na captação e retenção de nutrientes provenientes de adubações, o que contribui para minimizar perdas ou indisponibilização desses elementos no solo (Resende *et al.*, 2016). O gênero *Urochloa* desenvolve raízes que alcançam profundidades maiores no solo em comparação com outras culturas anuais em geral. Essas raízes são finas e possuem muitos pelos absorventes, o que confere a ela um potencial elevado para extrair nutrientes, quando a disponibilidade de nutrientes é insuficiente (Costa, 2015).

A decomposição das raízes da braquiária também resulta na produção de matéria orgânica, inclusive em camadas subsuperficiais, onde essa matéria orgânica permanece por mais tempo. Essas condições são particularmente desejáveis quando o objetivo é aumentar o estoque de carbono no solo (Resende *et al.*, 2021). Esse efeito benéfico tem sido relatado com o uso de braquiárias (*Urochloa ruziziensis* e *Urochloa brizantha*) em sistemas de cultivo em consórcio (*intercropping*) ou como culturas de cobertura (*cover crops).* As principais medidas favorecidas são a matéria orgânica do solo (SOM – *Soil Organic Matter*) e o índice de manejo de carbono (CMI - *Carbon Management Index*) (Ensinas *et al.*, 2016). Por outro lado, Silva *et al.* (2022) encontraram resultados diferentes, onde notou-se que o peso da matéria vegetal fresca e seca foi mais elevado nas plantas cultivadas em solo não contaminado, seguidas por aquelas que foram cultivadas em solo não contaminado misturado com 50% de solo contaminado pelo rejeito que exibiram valores intermediários, enquanto as plantas cultivadas em solo contaminado pelo rejeito apresentaram os valores mais baixos.

No presente estudo foi possível observar que a adição do rejeito da Samarco no solo pareceu não afetar de maneira significativa a maioria dos indicadores fisiológicos e de crescimento das plantas estudadas, exceto pela produção de massa seca de raiz, que aumentou provavelmente como uma adaptação à falta ou o excesso de nutrientes no substrato de cultivo. Além disso, a capacidade de enraizamento profundo da braquiária e sua contribuição para o aumento de matéria orgânica no solo são destacadas como características vantajosas.

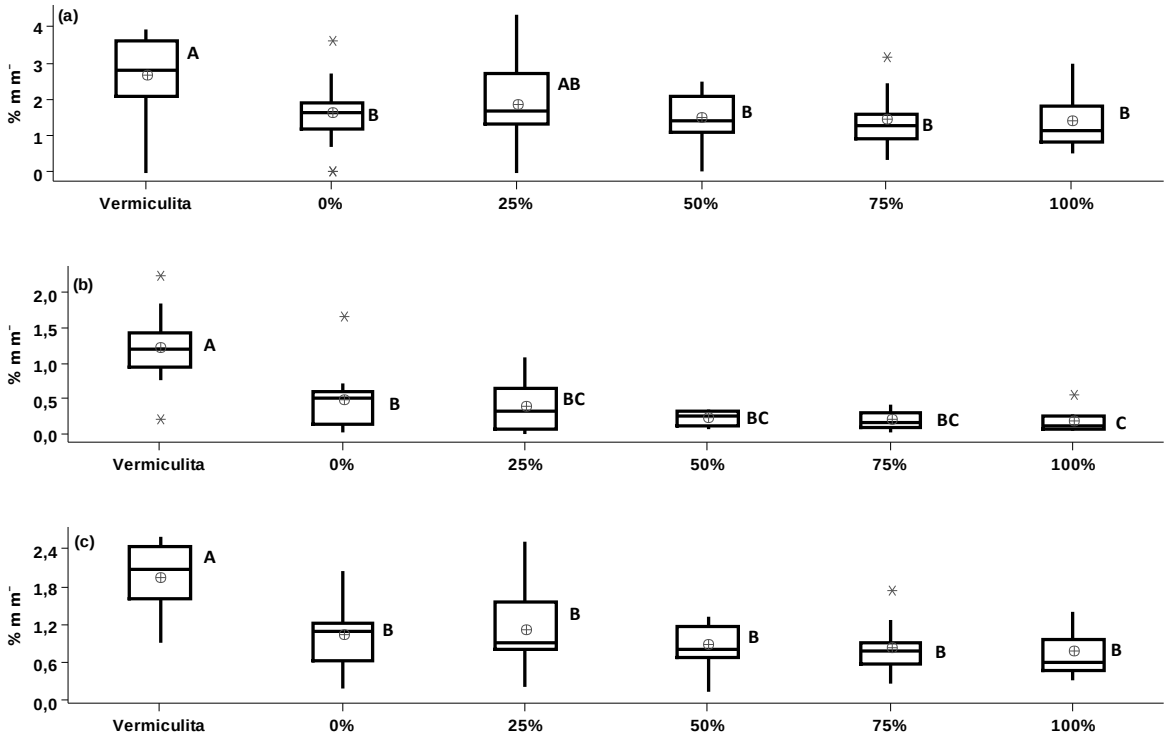
Após as medições iniciais, as amostras foram preparadas para as análises dos analitos estudados, para compreensão de como as plantas respondem a diferentes condições de crescimento, e são essenciais para avaliar o sucesso de projetos de reflorestamento, agricultura ou recuperação de áreas impactadas pela mineração.

4.4 DETERMINAÇÃO DOS ANALITOS NAS BRAQUIÁRIAS

O método de digestão ácida em bloco digestor para espécies vegetais foi utilizado para o preparo das amostras e posterior determinação dos teores totais dos metais Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na e Zn por ICPOES e para estimar os perfis desses elementos na planta inteira, parte aérea e raiz. A partir dos dados obtidos foi possível discutir e avaliar os efeitos da mistura de diferentes proporções de rejeito de mineração da Samarco e solo sobre os teores cada analito nas amostras de braquiárias. Vermiculita e solo foram utilizados como padrões de comparação (vermiculita, 0%, 25%, 50%, 75 e 100% de rejeito). Os resultados dos estudos realizados estão apresentados na Tabela 7 e Figuras 17 - 25.

O K apresentou uma concentração mais elevada na vermiculita. À medida que se aumentou a quantidade de rejeito adicionado ao solo, observamos uma diminuição na concentração de K nas raízes. No entanto, os tratamentos não influenciaram significativamente os níveis de concentração de K na planta inteira e na parte aérea. Os valores variaram de 0,17% a 1,23% nas raízes, de 1,40% a 2,66% na parte aérea e de 0,77% a 1,94% na planta conforme mostrado na Figura 17 e na Tabela 7. É importante notar que os níveis de K na parte aérea da planta foram consideravelmente mais elevados, sugerindo uma eficiente translocação do K a partir das raízes. Um estudo conduzido por Araújo *et al*., (2022) comparou rabanetes cultivados em diferentes concentrações de rejeitos de mineração em solo, e estes não alteraram o teor do macronutriente K nos tubérculos.

Figura 17 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de K na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 7 – Teores totais de Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na e Zn determinados por ICPOES após digestão ácida em bloco digestor na parte aérea e raízes das plantas. Experimento Total n = 15, concentração média ± sd, n = 3 leituras

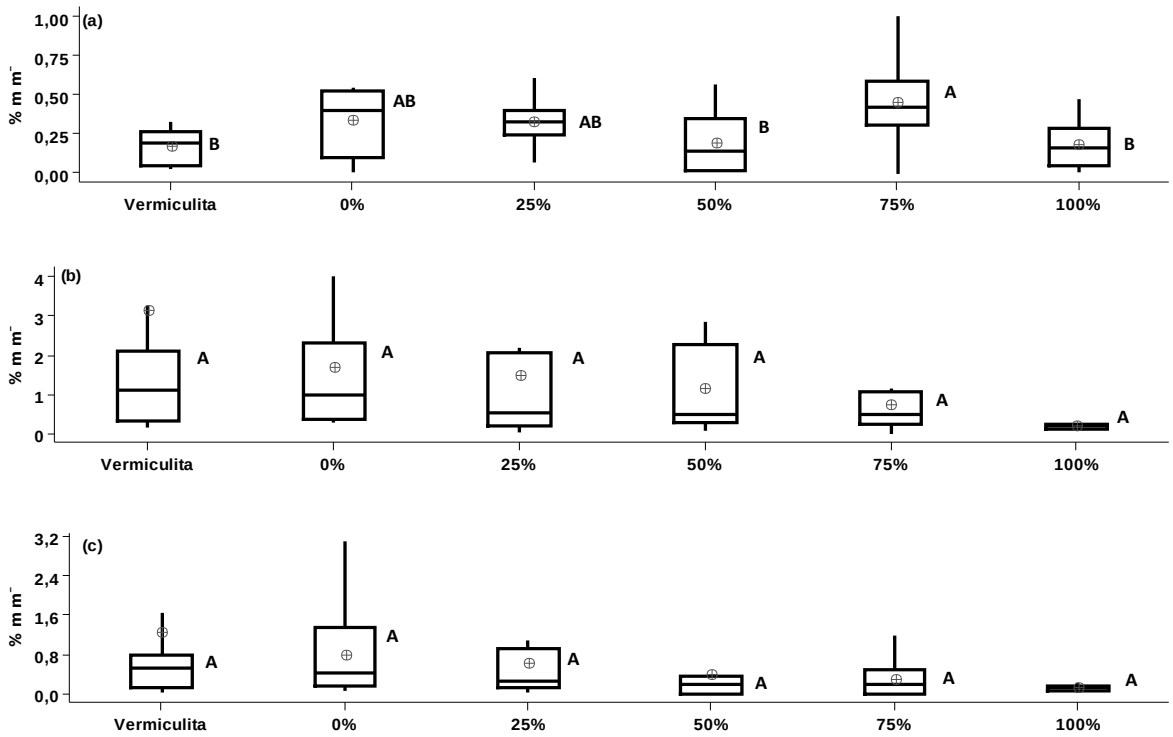
Elementos	Amostras	Tratamentos					
		Vermiculita	0%	25%	50%	75%	100%
K (%)	Parte aérea	2,66 ± 1,01^{a}	1,61 ± 0,93^{b}	1,84 ± 1,05^{ab}	1,51 ± 0,66^{b}	1,45 ± 0,68^{b}	1,40 ± 0,71^{b}
	Raiz	1,23 ± 0,47^{a}	0,48 ± 0,40^{b}	0,40 ± 0,32^{bc}	0,23 ± 0,10^{bc}	0,20 ± 0,12^{bc}	0,17 ± 0,13^{c}
	Planta Inteira	1,94 ± 0,51^{a}	1,04 ± 0,49^{b}	1,12 ± 0,60^{b}	0,87 ± 0,33^{b}	0,82 ± 0,36^{b}	0,77 ± 0,36^{b}
Mg (%)	Parte aérea	0,17 ± 0,12^{b}	0,34 ± 0,21^{ab}	0,33 ± 0,16^{ab}	0,19 ± 0,20^{b}	0,54 ± 0,26^{a}	0,18 ± 0,16^{b}
	Raiz	3,13 ± 6,39^{a}	1,68 ± 1,81^{a}	1,47 ± 1,85^{a}	1,14 ± 1,11^{a}	0,75 ± 0,76^{a}	0,20 ± 0,06^{a}
	Planta Inteira	1,24 ± 2,84^{a}	0,78 ± 0,87^{a}	0,61 ± 0,83^{a}	0,37 ± 0,48^{a}	0,43 ± 0,35^{a}	0,11 ± 0,07^{a}
Ca (%)	Parte aérea	0,22 ± 0,09^{c}	0,68 ± 0,23^{a}	0,58 ± 0,19^{ab}	0,59 ± 0,34^{ab}	0,51 ± 0,27^{ab}	0,39 ± 0,15^{bc}
	Raiz	0,92 ± 2,00^{a}	0,75 ± 0,63^{a}	0,63 ± 0,50^{a}	0,50 ± 0,42^{a}	0,40 ± 0,28^{a}	0,14 ± 0,13^{a}
	Planta Inteira	0,35 ± 0,77^{ab}	0,67 ± 0,26^{a}	0,57 ± 0,21^{ab}	0,53 ± 0,17^{ab}	0,45 ± 0,15^{ab}	0,25 ± 0,05^{b}
Al (%)	Raiz	0,95 ± 1,30^{a}	1,31 ± 1,10^{a}	1,24 ± 1,54^{a}	0,64 ± 0,58^{a}	0,67 ± 0,42^{a}	0,43 ± 0,33^{a}
Fe (%)	Raiz	0,19 ±0,20^{d}	0,22 ± 0,16^{d}	0,42 ± 0,32^{cd}	0,72 ± 0,41^{bc}	0,98 ± 0,56^{ab}	1,25 ± 0,69^{a}
Na (%)	Parte aérea	0,13 ± 0,08^{a}	0,15 ± 0,08^{a}	0,24 ± 0,18^{a}	0,22 ± 0,11^{a}	0,27 ± 0,32^{a}	0,12 ± 0,07^{a}
	Raiz	0,33 ± 0,19^{a}	0,39 ± 0,29^{a}	0,47 ± 0,30^{a}	0,37 ± 0,25^{a}	0,30 ± 0,21^{a}	0,43 ± 0,24^{a}
	Planta Inteira	0,22 ± 0,10^{a}	0,25 ± 0,17^{a}	0,33 ± 0,17^{a}	0,29 ± 0,13^{a}	0,28 ± 0,15^{a}	0,24 ± 0,15^{a}
Cu (mg kg^{-1})	Parte aérea	2,88 ± 0,70^{a}	2,86 ± 0,53^{a}	2,77 ± 0,88^{a}	3,25 ± 1,63^{a}	2,39 ± 0,77^{a}	2,81 ± 0,71^{a}
	Raiz	5,57 ± 2,03^{a}	7,08 ± 4,68^{a}	5,86 ± 3,00^{a}	6,11 ± 2,58^{a}	5,94 ± 2,36^{a}	5,26 ± 3,07^{a}
	Planta Inteira	3,95 ± 1,38^{a}	4,87 ± 2,56^{a}	4,22 ± 1,69^{a}	4,58 ± 1,65^{a}	4,17 ± 1,28^{a}	4,04 ± 1,68^{a}
Zn (mg kg^{-1})	Parte aérea	19,76 ± 8,03^{a}	23,30 ± 8,70^{a}	15,94 ± 4,25^{a}	17,70 ± 5,74^{a}	19,49 ± 8,54^{a}	13,96 ± 6,94^{a}
	Raiz	193,80 ± 436,71^{a}	101,00 ± 105,27^{a}	82,54 ± 114,32^{a}	58,81 ± 41,90^{a}	52,89 ± 48,06^{a}	26,00 ± 19,14^{a}
	Planta Inteira	68,64 ± 175,89^{a}	41,43 ± 46,53^{a}	35,58 ± 50,98^{a}	25,50 ± 18,86^{a}	24,13 ± 20,10^{a}	12,57 ± 8,45^{a}
Mn (mg kg^{-1})	Parte aérea	61,44 ± 30,12^{bc}	21,31 ± 8,58^{c}	31,68 ± 21,32^{c}	68,36 ± 24,55^{bc}	107,74 ± 58,73^{b}	258,60 ± 107,85^{a}
	Raiz	152,14 ± 116,35^{bc}	50,18 ± 45,34^{c}	106,33 ± 72,20^{c}	254,95 ± 74,38^{b}	450,18 ± 139,88^{a}	462,60 ± 242,76^{a}
	Planta Inteira	101,72 ± 68,27^{bc}	35,03 ± 24,11^{c}	67,95 ± 43,14^{c}	161,65 ± 31,98^{b}	278,96 ± 75,89^{a}	360,60 ± 160,03^{a}
Cr (mg kg^{-1})	Parte aérea	0,76 ± 0,25^{a}	1,00 ± 0,56^{a}	0,78 ± 0,49^{a}	1,15 ± 0,51^{a}	0,93 ± 0,24^{a}	0,75 ± 0,55^{a}
	Raiz	25,08 ± 29,33^{a}	45,89 ± 45,93^{a}	22,85 ± 21,45^{a}	20,67 ± 24,52^{a}	26,27 ± 27,03^{a}	23,70 ± 7,92^{a}
	Planta Inteira	8,49 ± 13,17^{a}	15,53 ± 21,38^{a}	7,80 ± 10,11^{a}	6,85 ± 10,77^{a}	7,16 ± 11,62^{a}	5,67 ± 6,48^{a}

As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$)

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os níveis de concentração de Mg nas raízes e planta inteira não foram afetados pelos tratamentos, embora tenha sido observado um pequeno acréscimo nas concentrações de Mg na parte aérea quando foram adicionados ao solo teores de 0,25 e 75% de rejeito; apresentando valores entre 0,20 e 3,13 % nas raízes; 0,18 a 0,54 % na parte aérea e 0,11 a 1,24 % na planta inteira (Figura 18, Tabela 7). A concentração de Mg nas raízes foi cerca de quatro vezes maior que na parte aérea, indicando uma baixa translocação. Almeida *et al*., (2022) encontrou valores de Mg nas hortaliças, rúcula e rabanete, que não diferiram entre o cultivo em rejeitos e em solo sendo para a rúcula cultivada em rejeitos foi de 2,7% enquanto no solo 2,3%; e para o rabanete, o teor de Mg nas plantas cultivadas em rejeito foi de 1,3% enquanto no solo foi de 1,6%.

Figura 18 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Mg na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária



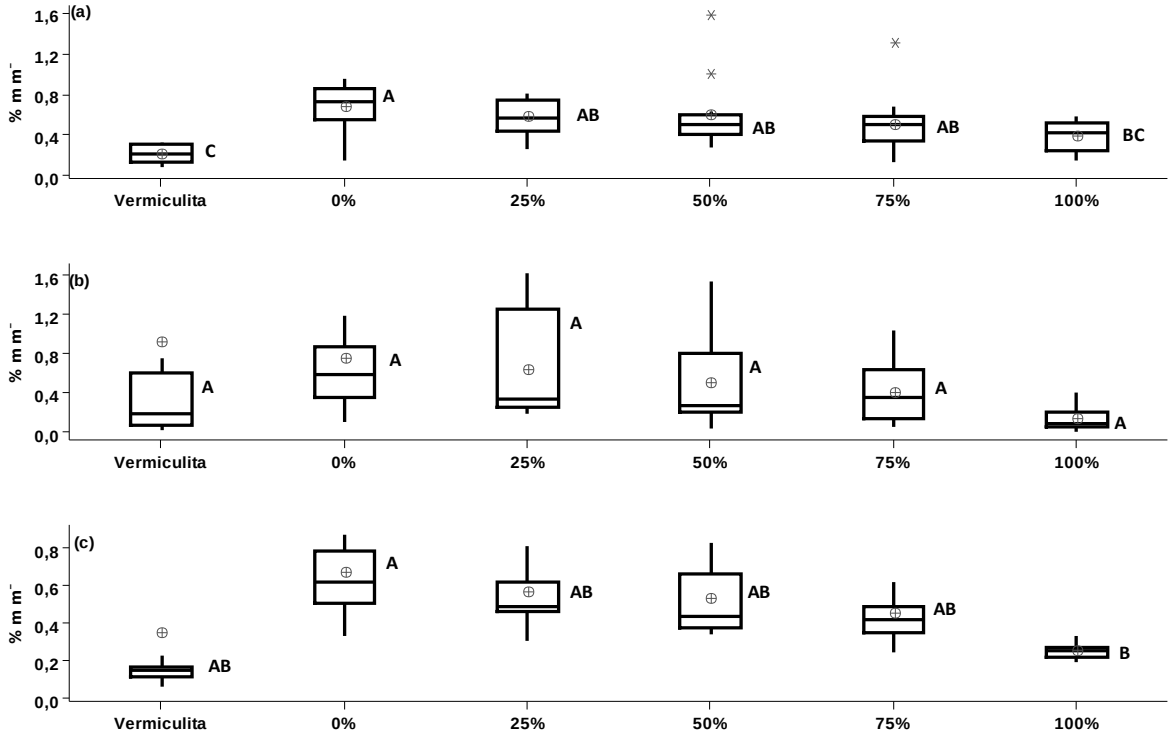
Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p > 0,05).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A concentração de Ca apresentou uma diminuição à medida que o rejeito foi adicionado ao solo, sendo também menor na vermiculita, essa diminuição foi identificada em todas as partes da planta, porém não de forma significativa nas raízes. Os valores observados variaram entre 0,14% e 0,92% nas raízes, entre 0,22% e 0,68% na parte aérea, e entre 0,25% e 0,67% na planta inteira (Figura 19 e Tabela 7). Essas reduções à medida que a quantidade de rejeito no solo aumentou, juntamente com a baixa concentração de Ca na vermiculita, sugerem a possibilidade de deficiência desse nutriente nesses substratos. É relevante notar que o Ca se distribuiu de maneira uniforme tanto na parte aérea quanto nas raízes, indicando uma boa translocação desse elemento. Em contraste, um estudo anterior conduzido por Silva *et al*. (2022) não observou diferenças significativas na concentração de Ca na parte aérea de braquiária cultivada no rejeito, em comparação com o solo não contaminado de uma região próxima ao local do acidente.

De acordo com o estudo de Werner *et al*. (1996), os teores de macronutrientes na forrageira braquiária variaram na seguinte faixa: 12 - 25 g kg^{-1} para o K, de 2 - 6 g kg^{-1} para o Ca e de 1,5 - 4 g kg^{-1} para o Mg. Esses valores representam a quantidade desses nutrientes presentes na matéria seca das amostras de braquiária e são essenciais para atender às necessidades nutricionais do gado e outros animais que a consomem.

Figura 19 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Ca na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

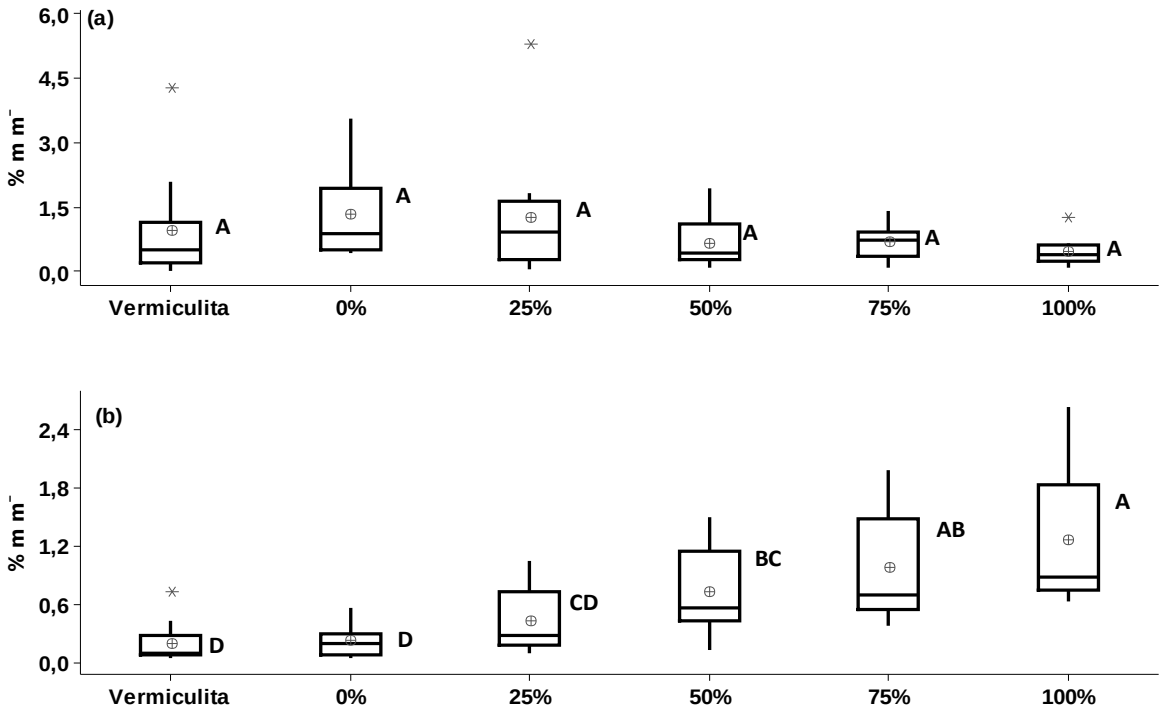
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7 e Figura 20, tanto o Al quanto o Fe apresentaram concentrações significativas somente nas raízes variando de 0,43% a 1,31% para Al e 0,19% a 1,25% para o Fe, sendo que o Al manteve seus valores praticamente constantes, não demonstrando diferenças significativas entre os grupos avaliados. Estudos anteriores realizados por Silva *et al*. (2022) e Ferreira *et al*. (2022) encontraram valores mais elevados de Al nas braquiárias cultivadas na região contaminada em comparação com a região não contaminada com o rejeito.

O Al tem sido muito estudado, pois os solos tropicais têm reação ácida com alta concentração do Al tóxico. Normalmente, o excesso de Al nos solos promove a toxicidade nas plantas, constituindo o principal fator limitante à produção de alimentos e a biomassa no mundo (Arroyave *et al*. 2013).

Em relação ao Fe, observou-se um padrão de acúmulo nas raízes à medida que a quantidade de rejeito adicionado ao solo aumentou, com valores variando entre 0,19% e 1,25% nas raízes (Figura 20 b e Tabela 7). Estudos anteriores conduzidos por Silva *et al*. (2022), Ferreira *et al.* (2022) e Coelho *et al*. (2020) encontraram valores de concentração de Fe mais elevados em braquiárias cultivadas em solos contaminados com rejeito de mineração de Fe em comparação com braquiárias cultivadas em áreas não afetadas pela contaminação, valores entre 0,04% na parte aérea e 4% em raízes. Os níveis adequados de Fe como micronutriente para a braquiária variam de 50 a 250 mg kg^{-1}, sendo que níveis críticos que podem causar toxicidade para as plantas estão acima de 500 mg kg^{-1} (Werner *et al*., 1996).

Figura 20 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Al (a) e Fe (b) nas raízes de capim-braquiária



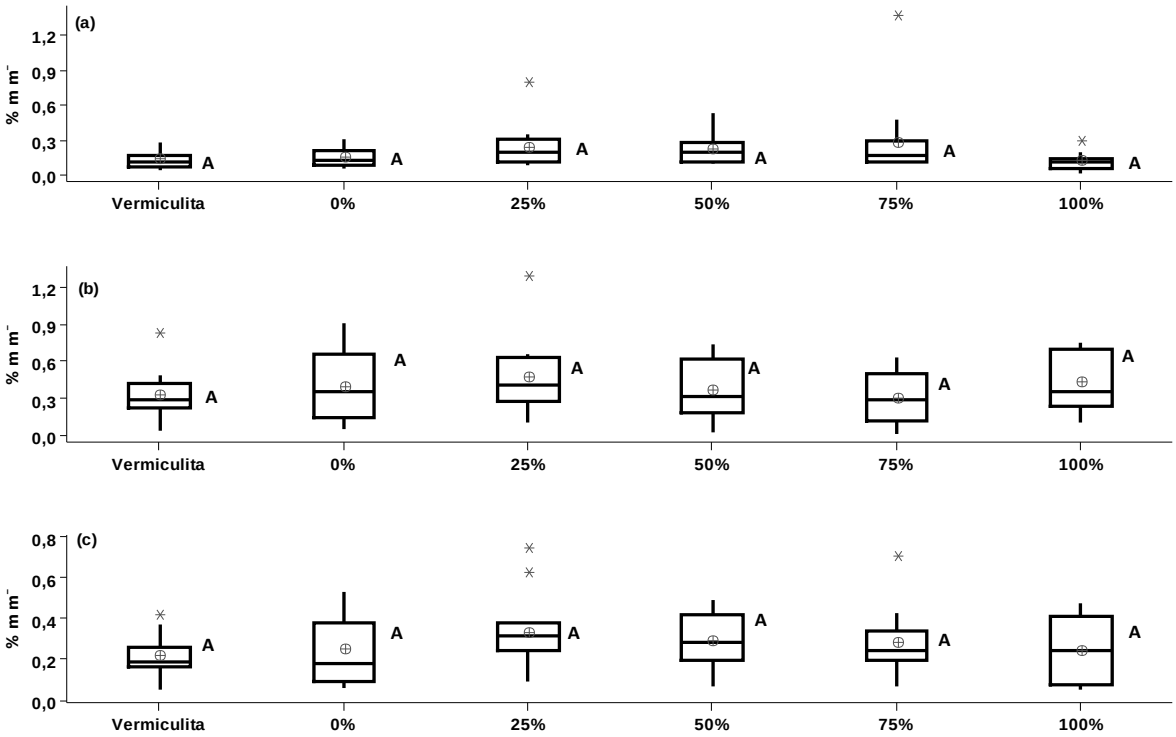
Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No caso do Na os resultados demostram que o seu teor permaneceu praticamente constante nas diferentes partes das plantas (Figura 21 a - c), não demonstrando diferenças significativas em resposta aos diversos tratamentos

(vermiculita, 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de resíduo adicionado ao solo), tanto na parte aérea quanto para a raiz e na planta inteira. Além disso, observou-se uma concentração ligeiramente maior nas raízes, embora ainda com uma translocação eficiente, uma vez que os valores de Na na parte aérea foram consideravelmente altos. Os valores de concentração de Na variaram entre 0,30% e 0,47% nas raízes, entre 0,12% e 0,27% na parte aérea e entre 0,22% e 0,33% de Na na planta inteira (Figura 21 e Tabela 7).

Figura 21 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Na na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária

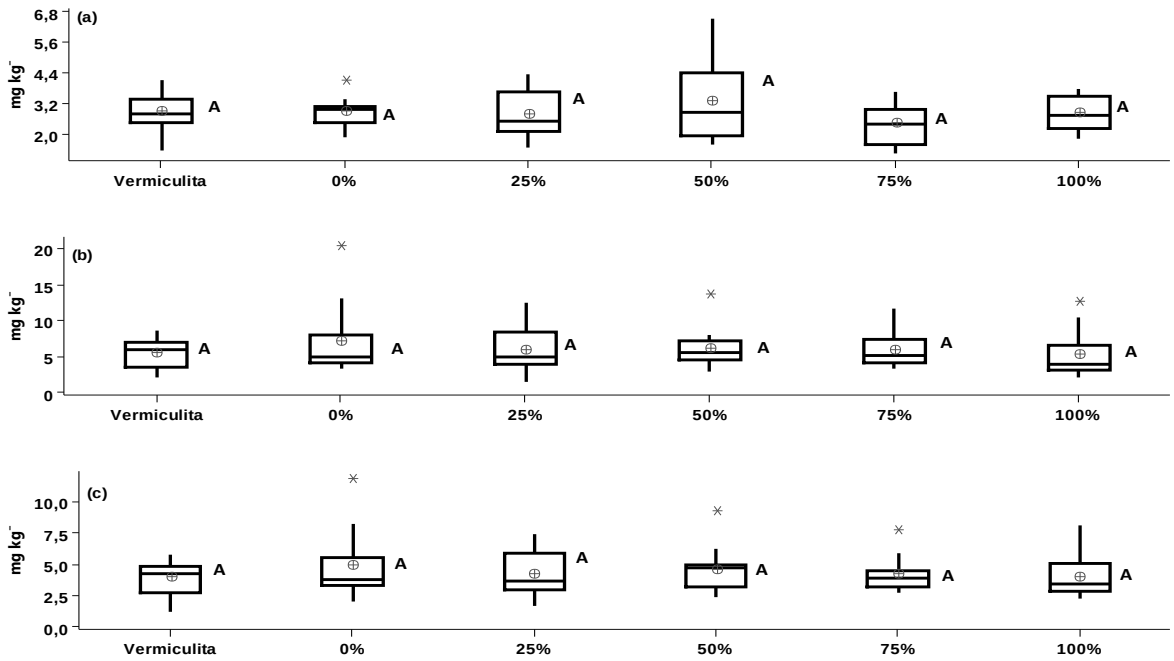


Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p > 0,05).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Assim como no caso da maioria dos elementos investigados, o teor de Cu manteve-se praticamente estável, não apresentando diferenças significativas em resposta aos diversos tratamentos, tanto na parte aérea, raiz e na planta inteira. Os valores

variaram entre 5,26 mg kg^{-1} e 7,08 mg kg^{-1} de Cu nas raízes, entre 2,81 mg kg^{-1} e 3,25 mg kg^{-1} na parte aérea e entre 3,95 mg kg^{-1} e 4,87 mg kg^{-1} de Cu na planta inteira (Figura 22 e Tabela 7). A translocação de Cu foi baixa, uma vez que os teores de Cu nas raízes foram aproximadamente duas vezes maiores do que na parte aérea. Coelho *et al*. (2020) também conduziram uma investigação envolvendo a braquiária *Urochloa decumbens* cultivada na região afetada por rejeitos de ferro. Os autores encontraram teores de Cu na parte aérea variando de 21,1 mg kg^{-1} a 48,3 mg kg^{-1}. Em contraste, o estudo de Ferreira *et al*. (2022) encontrou valores de Cu que variaram entre 2 mg kg^{-1} e 4 mg kg^{-1} nas plantas cultivadas nas áreas afetadas em comparação com as áreas de controle, que variaram de 4 mg kg^{-1} a 6 mg kg^{-1} de Cu. Por sua vez, Silva *et al*. (2022) encontraram uma concentração de 2,82 mg kg^{-1} de Cu nas plantas da área afetada e 3,12 mg kg^{-1} de Cu nas plantas da região não afetada. O fato de a quantidade de Cu não ter diminuído na presença do rejeito é um indicativo positivo, sugerindo que ele pode ser utilizado como meio de cultivo para a forrageira em estudo.

Figura 22 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Cu na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária

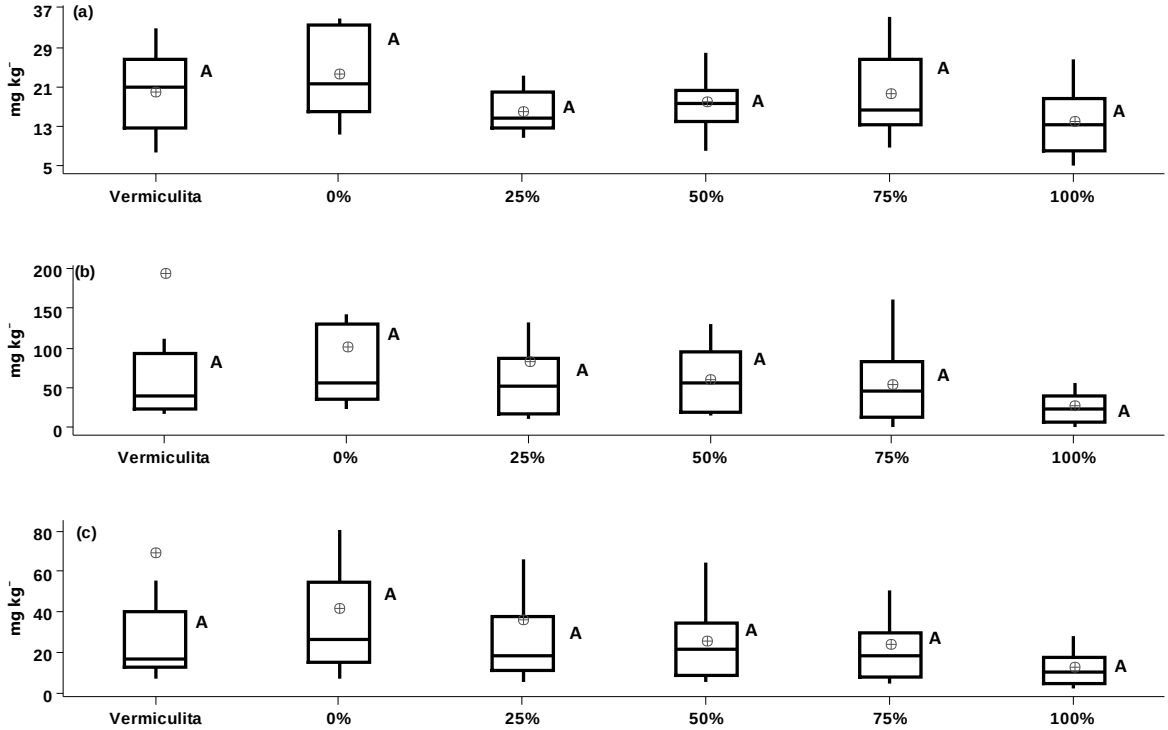


Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Avaliando os resultados para o Zn foi observado uma leve diminuição no teor desse elemento em resposta aos diferentes tratamentos, tanto na parte aérea quanto na raiz e na planta inteira. No entanto, assim como no caso do Cu, o Zn não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, com valores de Zn variando entre 26,00 mg kg^{-1} e 193,80 mg kg^{-1} nas raízes, entre 13,96 mg kg^{-1} e 23,30 mg kg^{-1} na parte aérea e na faixa de 12,57 mg kg^{-1} a 68,64 mg kg^{-1} na planta inteira (Figura 23 e Tabela 7). A translocação do Zn não foi expressiva, uma vez que os teores de Zn nas raízes foram maiores do que na parte aérea. Comportamento semelhante foi observado por Silva *et al*. (2022) e Coelho *et al*. (2020).

Figura 23 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Zn na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária



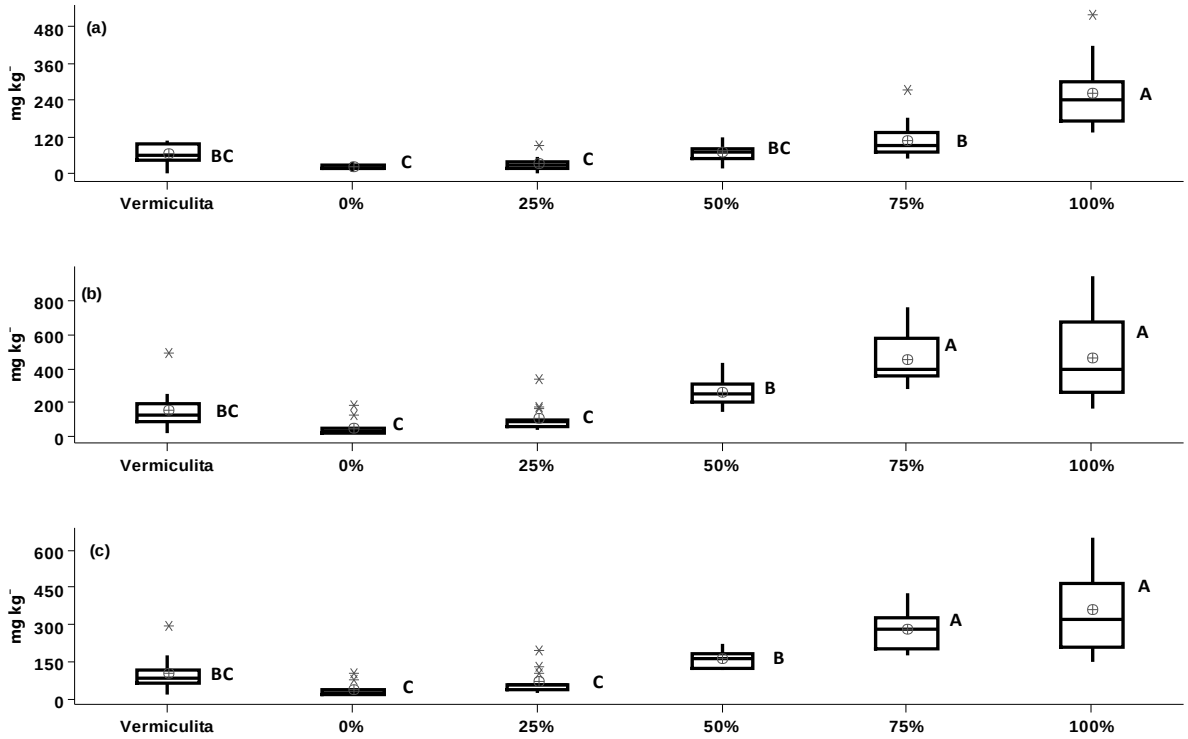
Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p > 0,05).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A concentração de Mn na parte aérea e nas raízes aumentou consideravelmente à medida que a proporção de rejeito adicionado ao solo aumentou,

pois o rejeito puro pode possuir maior concentração de Mn, aumentando sua disponibilidade para as plantas. Os valores de Mn variaram entre 50,18 mg kg^{-1} e 462,60 mg kg^{-1} nas raízes, entre 21,31 mg kg^{-1} e 258,60 mg kg^{-1} na parte aérea e entre 35,03 mg kg^{-1} e 360,60 mg kg^{-1} na planta inteira (Figura 24,Tabela 7). Houve diferenças significativas entre os tratamentos, e a concentração foi ligeiramente maior na vermiculita em relação ao solo, possivelmente devido a um teor mais elevado deste analito nesse substrato, podendo ser resultado de contaminação ou ocorrência natural. No entanto, a translocação do Mn não ocorreu de forma homogênea, e a maior parte do Mn permaneceu nas raízes da planta. Isso é consistente com estudos anteriores (Epstein e Bloom, 2006). Estudos recentes chegaram a mesma conclusão (Silva *et al.* 2022; Ferreira *et al.* 2022; Coelho *et al.* 2020).

Figura 24 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Mn na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária



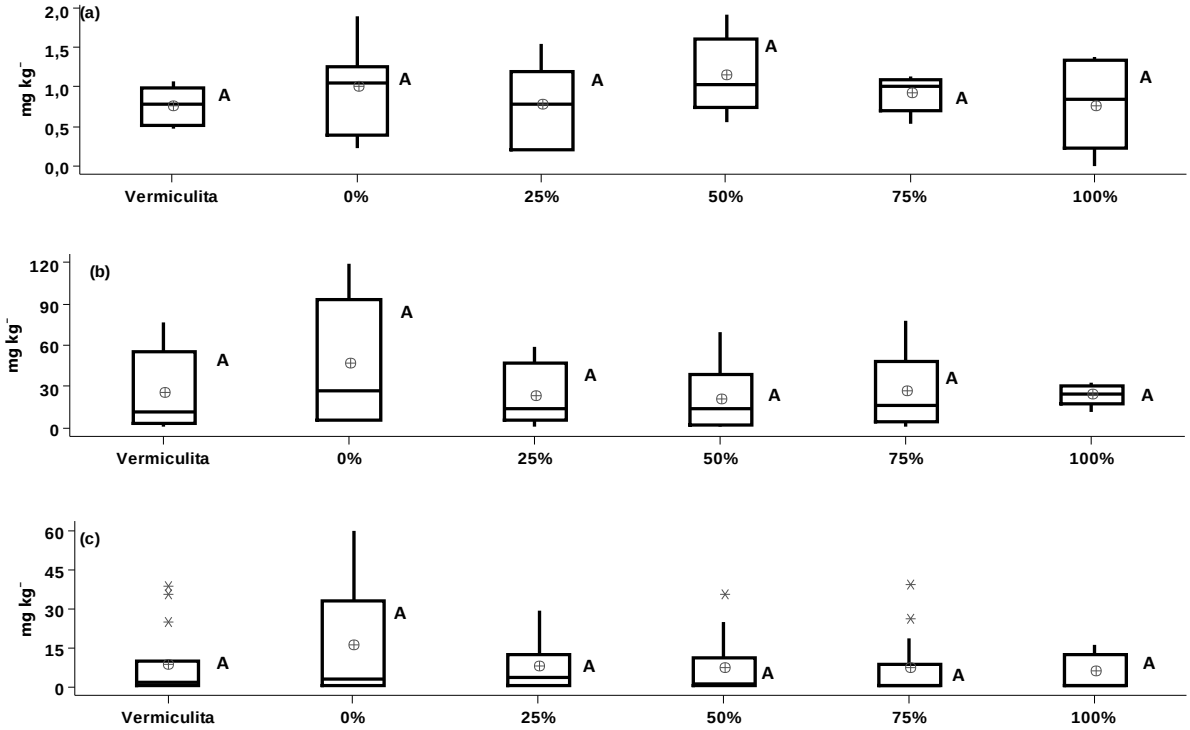
Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p>0,05).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De maneira geral os teores de micronutrientes na forrageira braquiária variaram nas seguintes faixas: 4 -12 mg kg^{-1} de Cu, 20 - 50 mg kg^{-1} de Zn e 40 - 250 mg kg^{-1} de Mn (Werner *et al*., 1996).

O comportamento do Cr assemelhou-se ao do Na e não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos na parte aérea, raiz e na planta inteira. Os valores variam entre 20,67 mg kg^{-1} e 45,89 mg kg^{-1} nas raízes, entre 0,75 mg kg^{-1} e 1,15 mg kg^{-1} na parte aérea e entre 5,67 mg kg^{-1} e 15,53 mg kg^{-1} de Cr na planta inteira (Figura 25 e Tabela 7). No entanto, observou-se concentrações consideravelmente maiores nas raízes, o que indica uma baixa translocação desse analito para as partes aéreas das plantas, comportamento semelhante observado por Coelho *et al*. (2020).

Figura 25 – Efeito da proporção de rejeito de mineração da Samarco adicionado ao solo sobre a concentração de Cr na parte aérea (a), nas raízes (b) e total (c) em capim-braquiária



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p > 0,05).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Plantas, como as gramíneas forrageiras, desempenham um papel importante na absorção eficiente de elementos potencialmente tóxicos em ambientes afetados por atividades humanas, como observado na região do desastre da barragem de Fundão (Rabêlo e Borgo, 2016). Essas gramíneas, como a *Urochloa decumbens* investigada nesse trabalho, têm a capacidade de acumular Fe, Mn, Cu e Cr, embora o excesso desses elementos possa levar à fitotoxicidade, inativação de enzimas e danos oxidativos nas plantas. É importante destacar que a acumulação desses elementos em plantas forrageiras pode representar um potencial risco de bioamplificação, o qual envolve a propagação dessa contaminação por diversos níveis tróficos em uma cadeia alimentar (Singh *et al*., 2016)

Recentes estudos conduzidos por Coelho *et al*. (2020) analisaram os efeitos da deposição de rejeitos de mineração da barragem de Fundão, tanto nas plantas quanto no solo das áreas afetadas. Esses estudos revelaram que as plantas nessas regiões acumularam concentrações elevadas de elementos, como Fe, Mn, Cu e Cr, afetando negativamente seu crescimento devido a desequilíbrios nutricionais e inativação de enzimas. No entanto, algumas plantas, incluindo *Stylosanthes guianensis* e *Urochloa decumbens*, demonstraram uma notável capacidade de acumular esses elementos, indicando potencial para a fitorremediação da área contaminada. Além disso, não foram detectados elementos perigosos, como arsênio (As), cádmio (Cd) e chumbo (Pb), nas plantas, reduzindo o risco para a saúde humana e animal. Entretanto, as condições desfavoráveis do solo, como a alcalinidade elevada e a baixa quantidade de matéria orgânica, representam desafios para a restauração da vegetação nativa ou o uso agrícola dessas áreas impactadas.

Além disso, a região afetada apresenta solos com alto teor de Fe na forma de óxidos pouco biodisponíveis, como hematita e goethita. A disponibilidade de Fe para as plantas é influenciada pelo pH do solo, com condições alcalinas e oxidantes precipitando o Fe^{3+} e tornando-o insolúvel, enquanto condições ácidas e redutoras solubilizam o Fe^{2}. A adição de matéria orgânica ao solo e eventos de inundação pode aumentar a disponibilidade de Fe para as plantas, e algumas plantas, como a *U. decumbens*, têm a capacidade de reduzir o Fe^{3+} para Fe^{2+}, permitindo sua absorção. Óxidos de Fe e Al podem complexar com alguns micronutrientes, dificultando sua absorção pelas plantas (Silva *et al*., 2006).

Em relação aos nutrientes, a deficiência de matéria orgânica nos solos compromete a capacidade de retenção de nutrientes, a estrutura e a retenção de água

no solo, resultando em uma menor disponibilidade de alguns micronutrientes, tais como, Cu, Fe, Mn e Zn (Silva *et al*., 2006). A adição de fertilizantes orgânicos ricos em matéria orgânica é uma estratégia para melhorar essas condições, contribuindo para o conteúdo orgânico do solo, enriquecendo-o com nutrientes e melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas (Zago *et al.*, 2019). Portanto, esses estudos ressaltam a complexa interação entre as plantas, o solo e os elementos tóxicos em ambientes afetados pela mineração. Embora haja desafios na restauração da vegetação nativa ou no uso agrícola dessas áreas, a pesquisa oferece informações importantes sobre os impactos da mineração e potenciais estratégias de mitigação, ressaltando a importância da fitorremediação e do equilíbrio nutricional nas plantações.

4.5 EFEITO DOS ÍONS AMÔNIO E NITRATO NO CRESCIMENTO E ABSORÇÃO DE ELEMENTOS EM BRAQUIÁRIA

O objetivo deste estudo foi comparar os efeitos dos íons NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-) e NO_3^- e sem adição de N, no crescimento, nos níveis de N e na absorção de Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni e Zn no capim-braquiária. Os resultados do estudo sobre os indicadores de crescimento da braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N estão apresentados na Tabela 8.

Segundo os resultados obtidos a ausência de N causou uma depressão geral do crescimento. Todas as fontes de N tiveram desempenho semelhante na altura das plantas, com valores maiores que no tratamento sem N (Figura 26 a). As taxas de transpiração não foram afetadas pelos tratamentos (Figura 26 b) e foram compatíveis com as medidas em *U. Brizantha* cultivadas em campo (Santos *et al.*, 2017). Já os níveis de clorofila foram maiores com o íon NH_4^+ e diminuidos sem N (Figura 26 c). No entanto, a amplitude de resposta com todas as fontes de N foi semelhante à verificada por Lima *et al*. (2016).

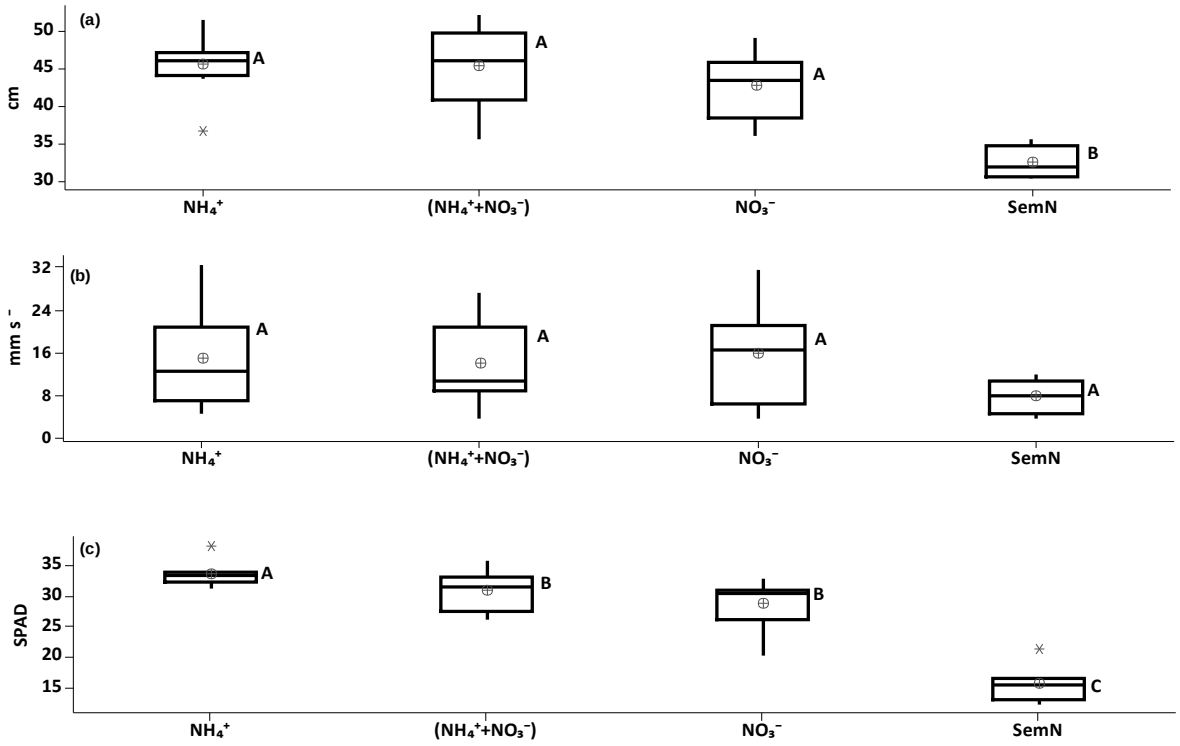
Tabela 8 – Indicadores de crescimento do capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N. Médias ± desvio padrão, n=15

Indicadores de crescimento	Tratamentos			
	NH_4^+	(NH_4^+ + NO_3^-)	NO_3^-	Sem N
Parte aérea (cm)	45,38 ± 4,25^a	45,25 ± 5,49^a	42,53 ± 4,45^a	32,49 ± 2,24^b
Transpiração (mm s^{-1})	14,75 ± 9,18^a	13,97 ± 7,99^a	15,75 ± 9,24^a	7,86 ± 3,01^a
Clorofila (SPAD)	33,68 ± 2,04^a	30,81 ± 3,30^b	28,88 ± 4,08^b	15,61 ± 2,78^c
Peso verde Total (g)	11,53 ± 3,60^a	7,20 ± 2,37^b	7,42 ± 1,36^b	2,71 ± 0,63^c
Peso verde Folha (g)	11,16 ± 3,46^a	6,98 ± 2,27^b	7,14 ± 1,28^b	2,57 ± 0,61^c
Peso verde Raiz (g)	0,38 ± 0,14^a	0,23 ± 0,12^{ab}	0,28 ± 0,12^{ab}	0,13 ± 0,02^b
Peso seco Total (g)	2,16 ± 0,68^a	1,53 ± 0,51^b	1,35 ± 0,33^{bc}	0,75 ± 0,14^c
Peso seco Folha (g)	1,82 ± 0,55^a	1,32 ± 0,41^{ab}	1,09 ± 0,24^{bc}	0,63 ± 0,13^c
Peso seco Raiz (g)	0,34 ± 0,13^a	0,21 ± 0,11^{ab}	0,26 ± 0,11^{ab}	0,12 ± 0,02^b

As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p>0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 26 – Indicadores de crescimento em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N, no comprimento na parte aérea (a), taxa de transpiração (b) e teor de clorofila (c)



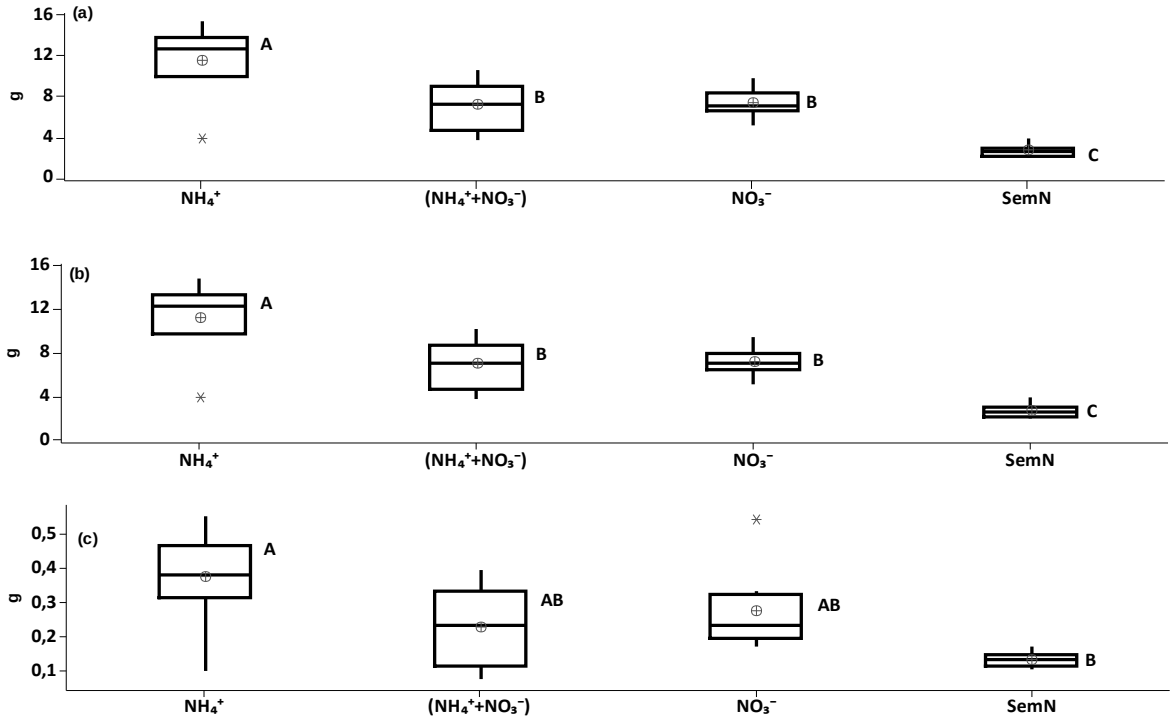
Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O uso de NH_4^+ como fonte de N favoreceu o crescimento das plantas e a fotossíntese mais do que o NO_3^-. O NH_4^+ reduz perdas de N e melhora a disponibilidade desse nutriente, pois esse íon pode manter o N no solo por mais tempo, reduzindo perdas, e promovendo a absorção de outros nutrientes benéficos para as plantas (Li *et al*., 2013).

As medidas de crescimento foram significativamente influenciadas pelas fontes de N (Figura 27 e Figura 28, Tabela 8). De acordo com os resultados foi possível observar que tanto o peso verde quanto o peso seco foram acentuados nas raízes e parte aérea na presença de NH_4^+, em comparação com os tratamentos com (NH_4^+ + NO_3^-) e NO_3^-.

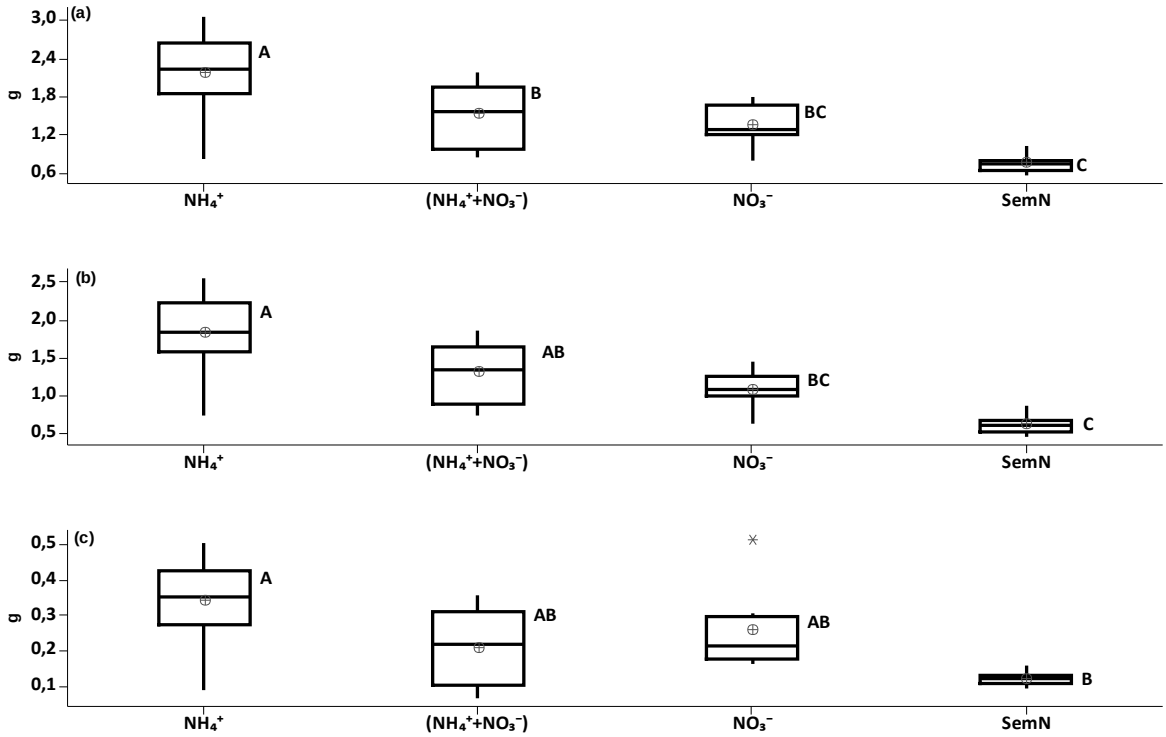
Figura 27 – Indicadores de crescimento em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N, no peso verde na planta inteira (a), parte aérea (b) e nas raízes (c)



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 28 – Indicadores de crescimento em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N, no peso seco na planta inteira (a), na parte aérea (b) e nas raízes (c)



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os níveis dos elementos Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni e Zn presentes nas amostras de capim-braquiária em resposta aos tratamentos com NH_4^+, (NH_4^++ NO_3^-), NO_3^- e sem N estão apresentados na Tabela 9, enquanto os resultados do estudo sobre os efeitos das fontes de N nos níveis desses elementos estão apresentados nas Figuras 29 a 40.

Os efeitos das fontes de N nos níveis de N são mostrados na Figura 29. De acordo com os resultados foi possível observar que a absorção de N com NH_4^+ foi maior que (NH_4^++NO_3^-) e não significativamente diferente de NO_3^- tanto na planta inteira quanto na parte aérea. Nas raízes, todas as fontes de N tiveram desempenho semelhante, ou seja, aumentando os níveis de N em relação ao tratamento sem N. As concentrações de N foram quase duas vezes maiores na parte aérea que nas raízes, indicando uma intensa translocação de N independentemente da fonte desse elemento, concordando com The, Snyder e Tegeder (2021). Os níveis de N na parte aérea foram compatíveis com os relatados por Castoldi *et al.* (2017) em gramíneas adubadas com NH_4NO_3.

No estudo em questão, foi possível que pequenas quantidades não controladas de N tenham se originado de diversas fontes, como as próprias sementes, o meio de crescimento (vermiculita) ou até mesmo como impurezas nos produtos químicos de grau analítico utilizados, apesar de estes estarem de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante.

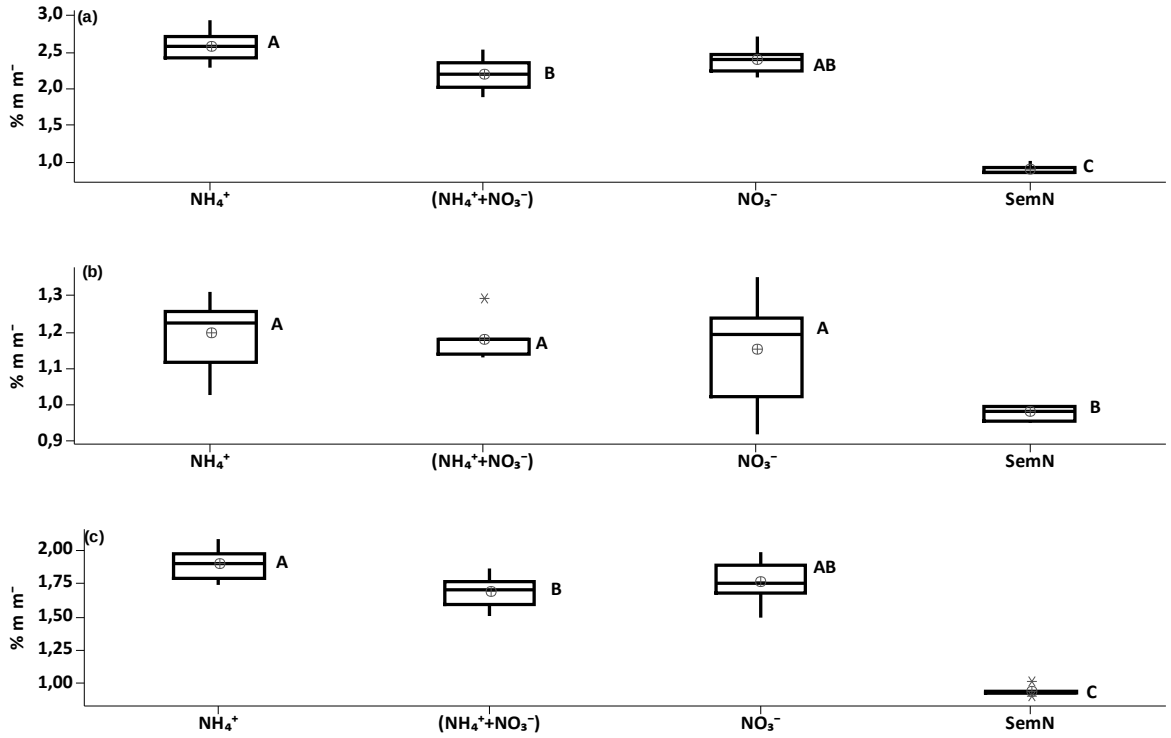
Tabela 9 – Níveis de elementos do capim- braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, ($NH_4^+ + NO_3^-$), NO_3^- ou sem N

Analitos	*PP	Tratamentos			
		NH_4^+	($NH_4^+ + NO_3^-$)	NO_3^-	Sem N
N (%)	**PA	2,58 ± 0,20[a]	2,20 ± 0,22[b]	2,40 ± 0,17[ab]	0,90 ± 0,06[c]
	***R	1,20 ± 0,09[a]	1,18 ± 0,05[a]	1,15 ± 0,14[a]	0,98 ± 0,02[b]
	****PI	1,89 ± 0,11[a]	1,69 ± 0,11[b]	1,76 ± 0,15[ab]	0,94 ± 0,03[c]
K (%)	**PA	3,71 ± 0,13[ab]	3,63 ± 0,80[b]	4,23 ± 0,20[a]	2,99 ± 0,09[c]
	***R	1,13 ± 0,18[a]	1,00 ± 0,21[a]	1,14 ± 0,10[a]	0,80 ± 0,07[b]
	****PI	2,42 ± 0,13[ab]	2,32 ± 0,37[b]	2,68 ± 0,10[a]	1,89 ± 0,05[c]
Ca (%)	**PA	0,30 ± 0,03[b]	0,38 ± 0,14[a]	0,44 ± 0,03[ab]	0,35 ± 0,02[ab]
	***R	0,26 ± 0,02[b]	0,20 ± 0,04[b]	0,54 ± 0,33[a]	0,18 ± 0,03[b]
	****PI	0,28 ± 0,02[b]	0,29 ± 0,07[b]	0,49 ± 0,17[a]	0,27 ± 0,01[b]
Mg (%)	**PA	0,32 ± 0,17[a]	0,29 ± 0,11[a]	0,28 ± 0,08[a]	0,36 ± 0,06[a]
	***R	1,06 ± 0,13[a]	0,82 ± 0,33[a]	0,85 ± 0,26[a]	0,38 ± 0,11[b]
	****PI	0,69 ± 0,08[a]	0,56 ± 0,18[a]	0,56 ± 0,12[a]	0,37 ± 0,04[b]
Na (%)	**PA	0,10 ± 0,05[b]	0,09 ±0,05[b]	0,10 ± 0,03[b]	0,31 ± 0,10[a]
	***R	0,16 ± 0,01[b]	0,21 ± 0,05[a]	0,20 ± 0,04[ab]	0,17 ± 0,003[b]
	****PI	0,13 ± 0,02[b]	0,15 ± 0,03[b]	0,15 ± 0,03[b]	0,24 ± 0,05[a]
Fe (%)	***R	0,43 ± 0,12[a]	0,43 ± 0,18[a]	0,42 ± 0,32[a]	0,02 ± 0,02[b]
Al (%)	***R	0,60 ± 0,18[a]	0,51 ± 0,22[a]	0,54 ± 0,33[a]	0,11 ± 0,03[b]
Mn (mg kg^{-1})	**PA	332,76 ± 42,16[b]	206,12 ± 54,75[c]	213,04 ± 31,60[c]	448,06 ± 45,41[a]
	***R	470,67 ± 19,88[a]	520,30 ± 57,17[a]	479,81 ± 68,98[a]	482,81 ± 51,79[a]
	****PI	401,72 ± 18,81[b]	363,21 ± 41,26[c]	346,43 ± 46,57[c]	465,43 ± 22,93[a]
Zn (mg kg^{-1})	**PA	13,38 ± 6,25[ab]	13,14 ± 7,51[ab]	14,72 ± 4,70[a]	6,01 ± 1,60[b]
	***R	29,99 ± 1,92[b]	32,67 ± 5,85[b]	27,58 ± 5,31[b]	59,39 ± 4,35[a]
	****PI	21,69 ± 2,90[b]	22,90 ± 4,05[b]	21,15 ± 3,16[b]	32,70 ± 2,31[a]
Cu (mg kg^{-1})	**PA	4,61 ± 0,55[a]	4,17 ± 0,45[ab]	4,50 ± 0,47[a]	3,62 ± 0,51[b]
	***R	13,23 ± 3,17[a]	10,71 ± 1,67[a]	11,53 ± 2,15[a]	7,35 ± 0,66[b]
	****PI	8,92 ± 1,67[a]	7,44 ± 0,86[a]	8,01 ± 1,21[a]	5,48 ± 0,43[b]
Ni (mg kg^{-1})	**PA	0,35 ± 0,11[a]	0,51 ± 0,28[a]	0,53 ± 0,40[a]	0,61 ± 0,20[a]
	***R	3,31 ± 1,49[ab]	4,00 ± 1,21[a]	1,42 ± 2,63[bc]	-
	****PI	1,83 ± 0,75[ab]	2,25 ± 0,57[a]	0,98 ± 1,26[bc]	0,31 ± 0,10[c]
Cr (mg kg^{-1})	**PA	0,78 ± 0,32[b]	2,09 ± 1,27[a]	1,05 ± 0,38[b]	1,51 ± 0,42[ab]
	***R	16,47 ± 9,77[a]	19,18 ± 13,62[a]	-	-
	****PI	8,63 ± 4,98[a]	10,64 ± 6,68[a]	0,53 ± 0,19[b]	0,75 ± 0,21[b]
Cd (mg kg^{-1})	**PA	0,07 ± 0,09[a]	0,01 ± 0,02[a]	0,07 ± 0,06[a]	0,07 ± 0,04[a]
	***R	0,49 ± 0,19[a]	0,32 ± 0,11[ab]	0,42 ± 0,13[ab]	0,27 ± 0,05[b]
	****PI	0,28 ± 0,12[a]	0,16 ± 0,05[b]	0,24 ± 0,07[ab]	0,17 ± 0,03[ab]

*PP (partes da planta), **PA (parte aérea), ***R (raiz) e ****PI (planta inteira). As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p>0,05).

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 29 – Conteúdos de N em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$)

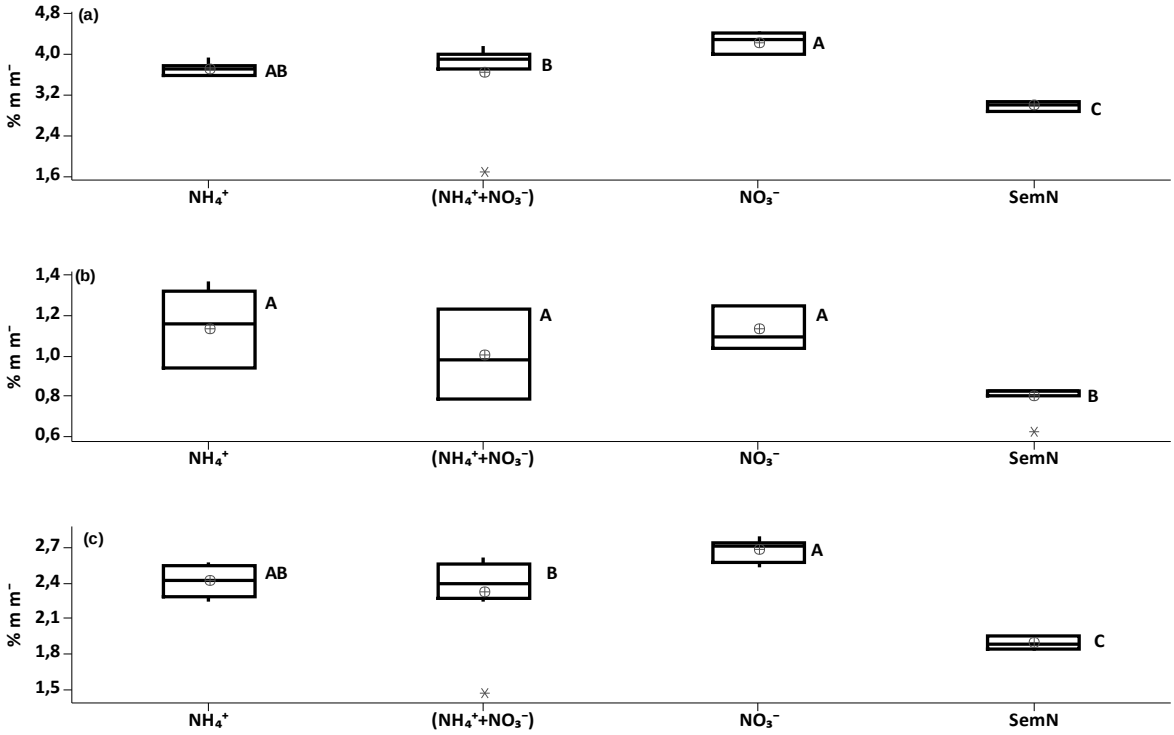
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os efeitos das fontes de N nos níveis de K são mostrados na Figura 30. De acordo com os dados a absorção de K na parte aérea foi favorecida pelo NO_3^- em relação ao (NH_4^+ + NO_3^-) sem diferença em relação ao NH_4^+. Nas raízes, todas as fontes de N tiveram desempenho semelhante, com aumentos significativos no nível de K em comparação com tratamento sem N. Os níveis de K nas plantas com tratamentos de N estavam acima das faixas críticas estabelecidas para as culturas de campo (Assis *et al.*, 2015). Como os níveis de K na parte aérea foram elevados, isso indica que a translocação de K das raízes foi intensa. Curiosamente, todas as fontes de N causaram magnitudes semelhantes de aumento nos níveis de N e K nas raízes.

Pesquisas recentes com dados genéticos do arroz revelaram uma relação mútua entre o K e a disponibilidade de N, destacando como a absorção e o transporte do K da raiz para a parte aérea estão interligados (Srivastava *et al.*, 2020). Observou-se

uma interação recíproca, especialmente em comparação com condições de deficiência de N, particularmente quando o NO_3^- está presente na parte aérea, sugerindo uma translocação significativa do K das raízes para a parte aérea quando o fornecimento de N é adequado (Coskun, Britto e Kronzucker, 2017).

Figura 30 – Conteúdos de K em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).

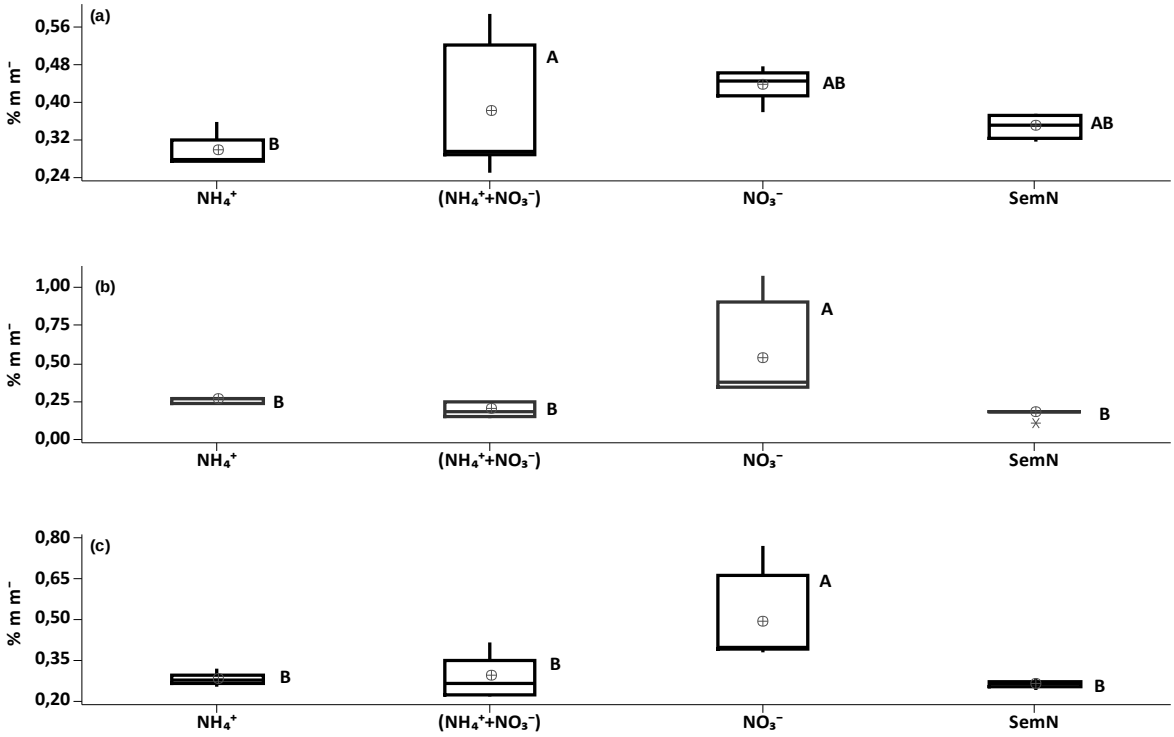


Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os efeitos das fontes de N nos níveis de Ca são mostrados na Figura 31. A absorção de Ca foi notavelmente favorecida por NO_3^- nas raízes, promovida por NO_3^- e (NH_4^++NO_3^-) em menor grau na parte aérea, e acentuadamente inibida por NH_4^+ e sem N nas raízes. O Ca participa na sinalização da disponibilidade de NO_3^- e nas mudanças decorrentes disso (Kudla *et al*., 2018). Foi observada uma relação análoga, uma vez que o NO_3^- aumentou as concentrações de Ca nas raízes. Em contraste, o NH_4^+ e a ausência de N exerceram um efeito contrário na absorção de Ca (Wallace e

Mueller, 1980). Os teores semelhantes de Ca nas raízes e na parte aérea indicam que a translocação de Ca foi relativamente constante.

Figura 31 – Conteúdos de Ca em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).



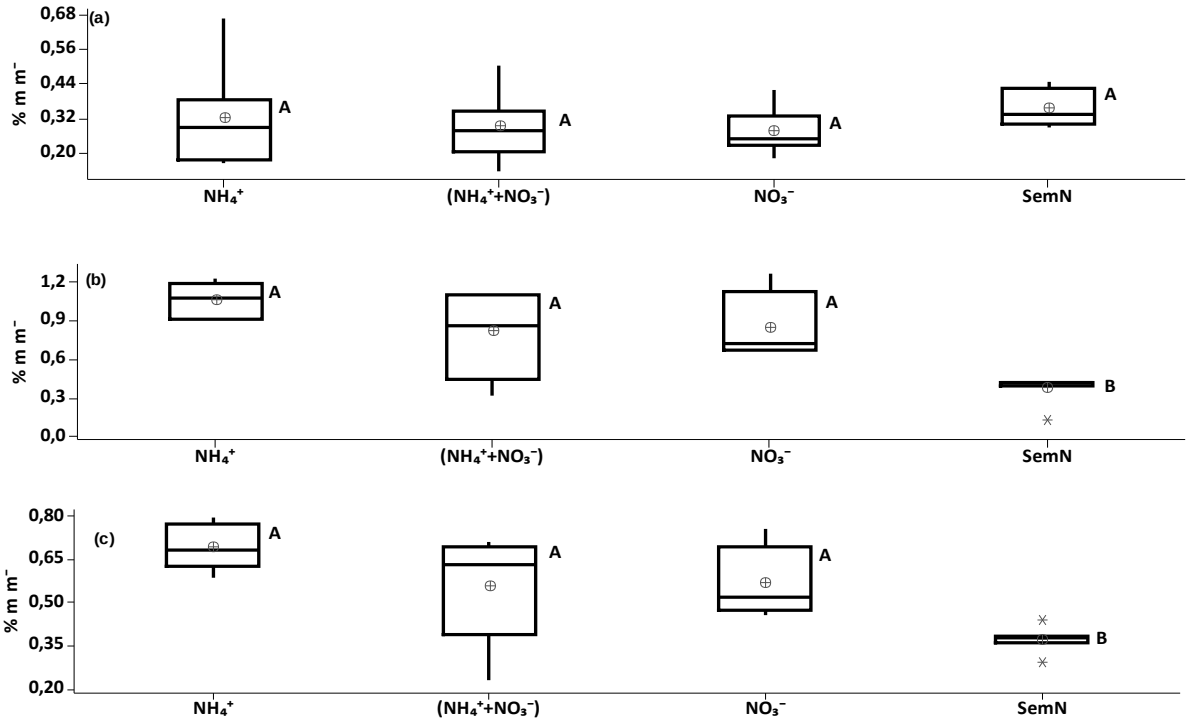
Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os efeitos das fontes de N sobre os níveis de Mg são mostrados na Figura 32. Os níveis de Mg na parte aérea não foram afetados pelos tratamentos e permaneceram dentro da faixa crítica de Mg foliar (Hauer-Jákli e Tränkner, 2019). Além disso, houve um acúmulo de Mg quase três vezes maior nas raízes independentemente da fonte de N, sugerindo que a translocação de Mg foi inexpressiva. Neste estudo, observou-se que a maior parte do Mg se acumulou nas raízes das plantas tratadas com N. Esperava-se que os níveis de Mg na parte aérea aumentassem à medida que as plantas envelhecessem, uma vez que é bem sabido

que o Mg é transportado para dentro das células para diversos processos biológicos, principalmente como Mg-ATP, Mg-enzimas e Mg-clorofila (Chen *et al.*, 2018).

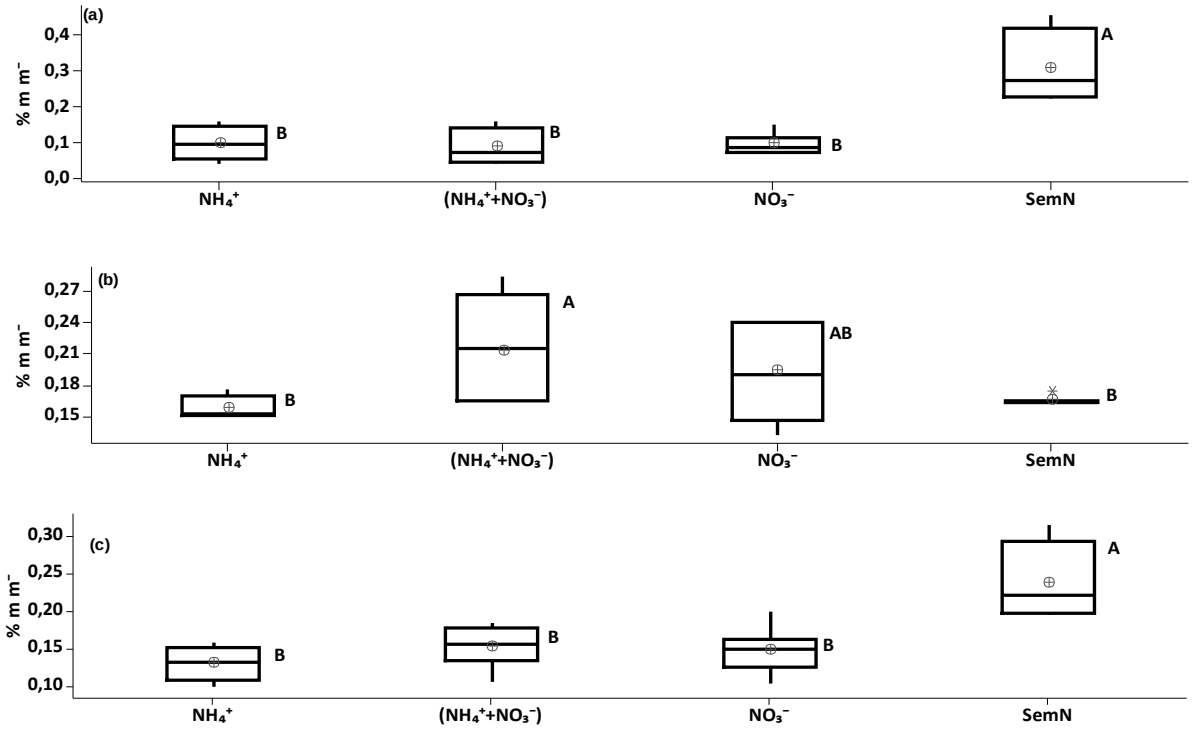
Figura 32 – Conteúdos de Mg em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os efeitos das fontes de N sobre os níveis de Na são mostrados na Figura 33. A ausência de N também causou um aumento notável na concentração de Na na parte aérea. Conforme discutido por Maathuis (2014), o Na não é prejudicial em níveis baixos e sua absorção ocorre de forma passiva. No entanto, proteínas de transporte de Na são acionadas quando o K se torna deficiente. Nesse estudo, considerando que não houve deficiência de K, os níveis de Na foram baixos. No entanto, a ausência de N promoveu maiores níveis de Na na parte aérea, sugerindo um comportamento semelhante ao observado com o K.

Figura 33 – Conteúdos de Na em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).

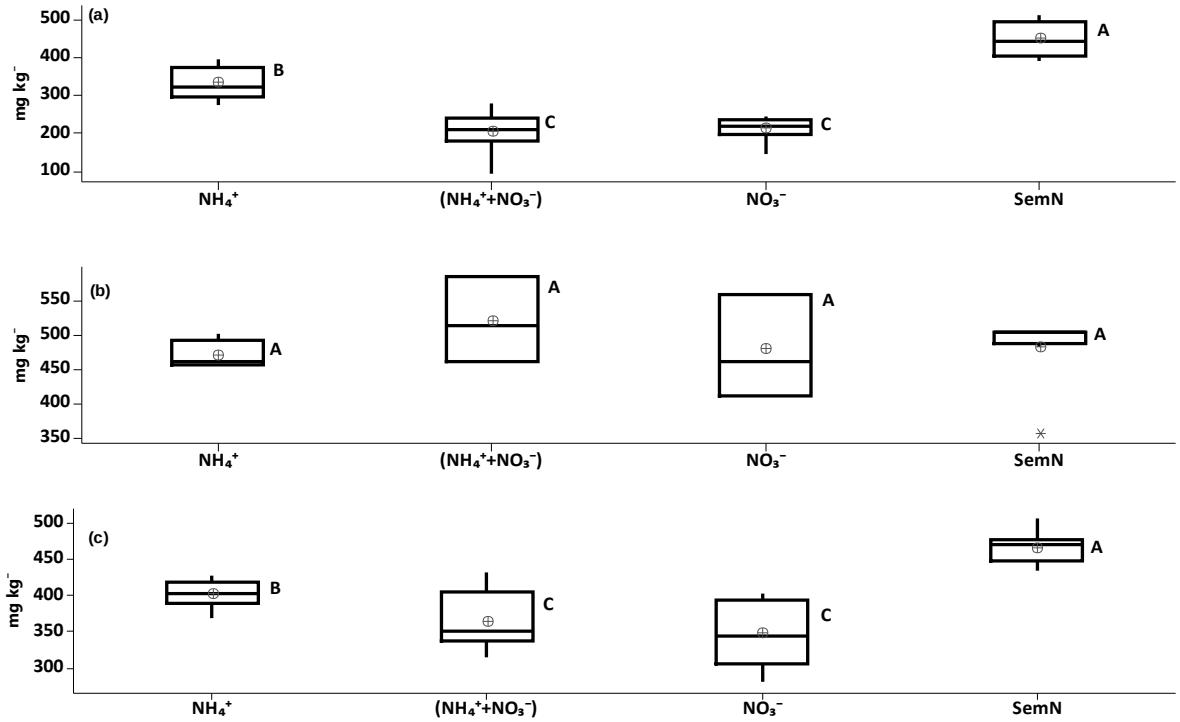


Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os efeitos das fontes de N sobre os níveis de Mn são mostrados na Figura 34. O tratamento sem N promoveu acentuadamente os níveis de Mn na parte aérea. O NH_4^+ não aumentou a captação de Mn como encontrado por Tong, Rengel e Graham (1997), pois os substratos não eram alcalinos. Os efeitos das fontes de N na absorção de Mn não são documentados e os resultados do presente estudo revelaram que a ausência de N favoreceu a absorção de Mn na parte aérea, um comportamento que pode abrir caminho para novos desenvolvimentos em formulações de fertilizantes. Já em relação à raiz não houve diferença de absorção entre os tratamentos.

Figura 34 – Conteúdos de Mn em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

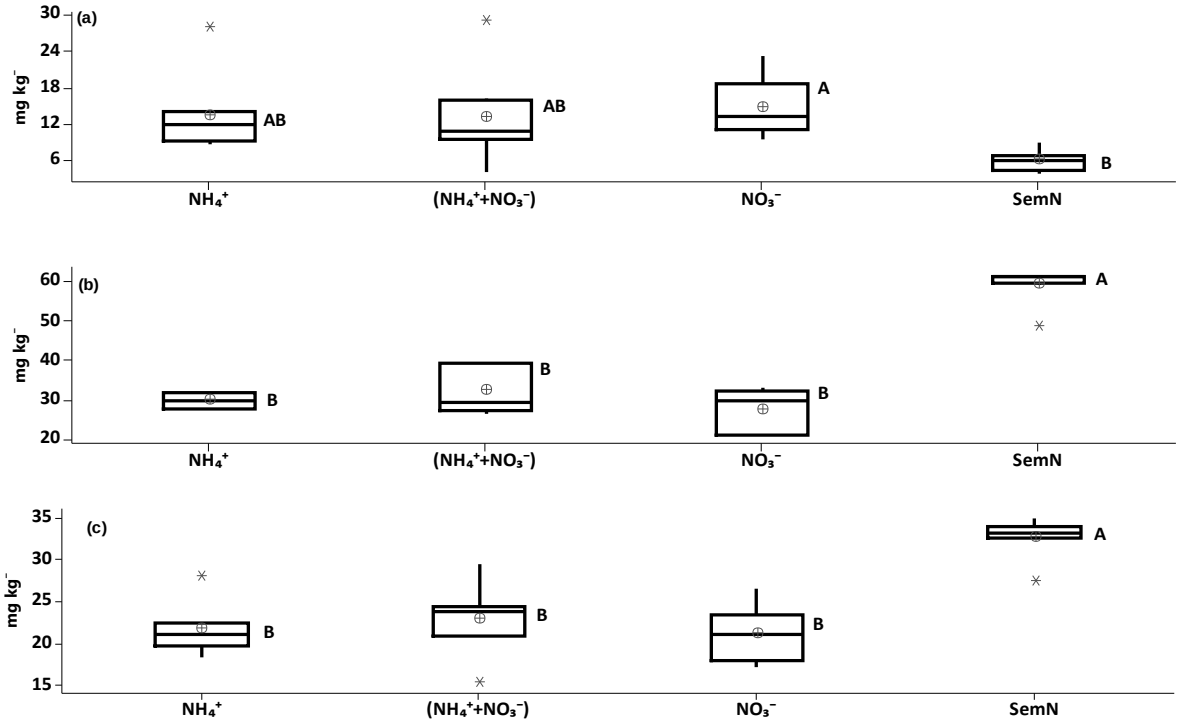
Os efeitos das fontes de N sobre os níveis de Zn são mostrados na Figura 35, nas raízes, os níveis de Zn foram acentuadamente aumentados pelo tratamento sem N, comportamento semelhante ao do Mn, porém sem causar sintomas visíveis de toxicidade. Na parte aérea, a absorção de Zn foi aumentada pelo NO_3^- em comparação com o tratamento sem N, e as concentrações alcançaram nível comumente utilizados na fertilização com Zn (Tolay, 2021).

Com relação as raízes foram observadas que essa parte da planta continha uma quantidade muito maior de Zn em comparação à parte aérea das plantas, e todas as fontes de N reduziram significativamente os níveis de concentração de Zn. As fontes de N reduziram a absorção de Zn pelas raízes, porém o NO_3^- favoreceu os níveis de Zn na parte aérea. Claramente, Zn teve baixa translocação, com maiores

concentrações nas raízes, possivelmente devido a padrões específicos de como o xilema carrega o Zn para outras partes da planta (Natasha *et al*., 2022).

Essa capacidade de acumular metais nas raízes, que também foi observada para outros metais, é um indício que a forrageira poderia ser usada para fitorremediação, pois as gramíneas forrageiras mostram especificidade em relação aos metais tóxicos, e, portanto, a seguinte escala de toxicidade pode ser sugerida (do mais tóxico para o menos tóxico) para esse grupo de plantas: Pb ≈ Cr > Cd ≈ As > Zn ≈ Cu ≈ Ni > Mn (Rabêlo e Borgo, 2016).

Figura 35 – Conteúdos de Zn em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).

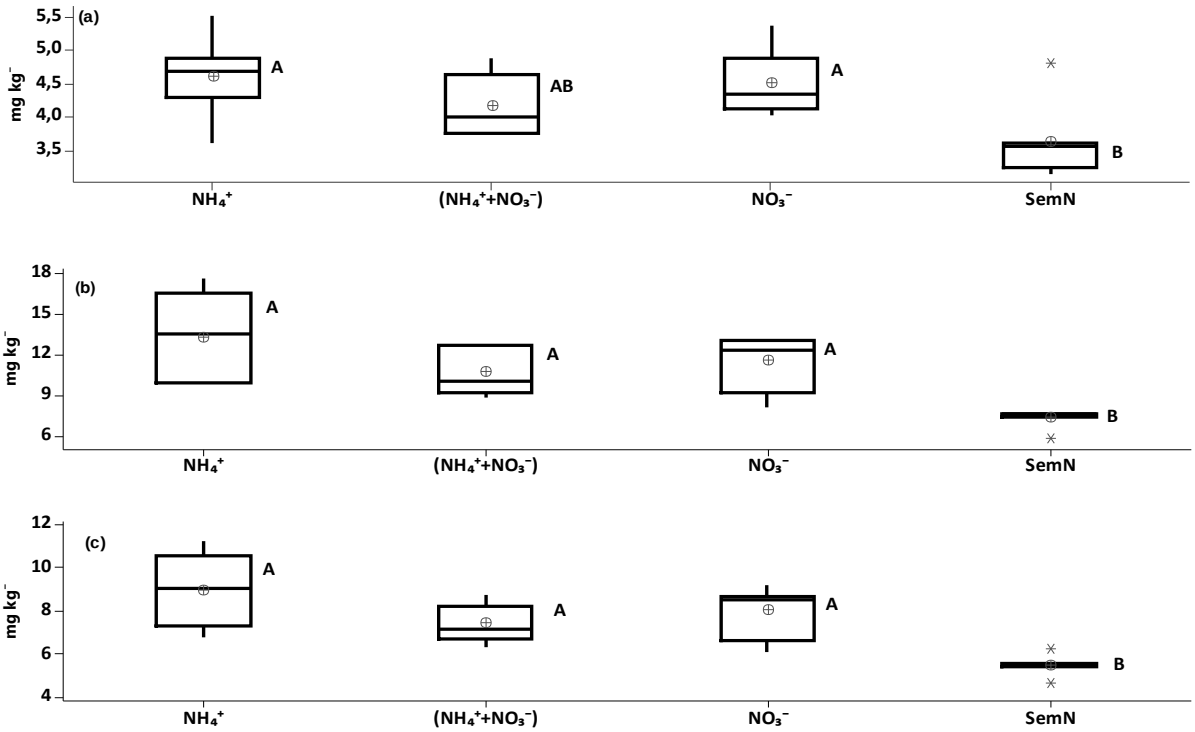


Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p > 0,05).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os efeitos das fontes de N sobre os níveis de Cu são mostrados na Figura 36. Os teores de Cu foram aumentados em resposta às diferentes fontes de N, com tendência de maior influência do NH_4^+. As concentrações nas plantas tratadas com N

foram quase três vezes maiores nas raízes do que na parte aérea e foram semelhantes aos observados em estudos com espécies de plantas (eudicotiledôneas) cultivadas em áreas de pastagens próximas umas das outras (Malinowska *et al*., 2015), e cerca de 50% menores do que as de *Catharanthus roseus* (Liu *et al*., 2016). No presente estudo, observou-se que a translocação de Cu foi relativamente baixa, conforme indicado pelos níveis nos tecidos, não sendo identificados sintomas de deficiência ou toxicidade de Cu.

Figura 36 – Conteúdos de Cu em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).



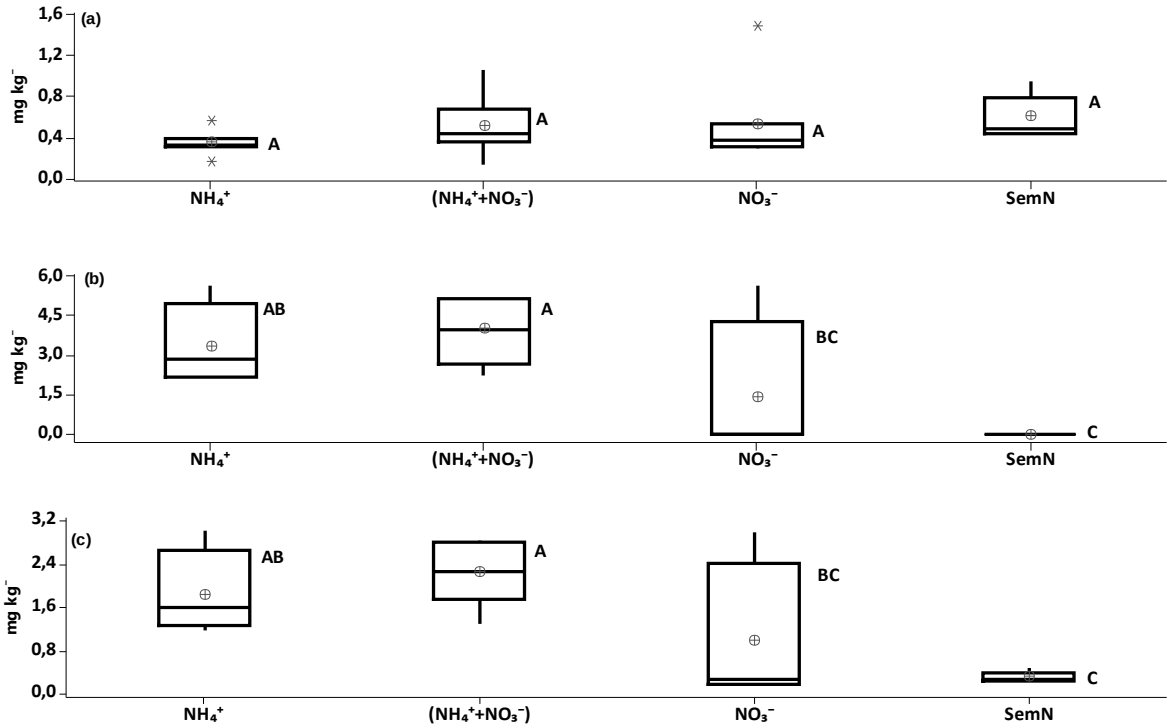
Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os efeitos das fontes de N sobre os níveis de Ni são mostrados na Figura 37, no caso do Ni, embora os teores desse elemento tenham atingido apenas níveis residuais, eles foram maiores nos tratamentos com (NH_4^++ NO_3^-) em relação a NO_3^- e sem N, com translocação relativamente desprezível para a parte aérea. Os níveis

verificados nas raízes foram semelhantes aos observados em várias outras espécies (Izosimova, 2005). O Ni é um micronutriente para as plantas, atuando no sistema antioxidante, funcionando como um protetor, especialmente quando as plantas estão sob estresse (Fabiano *et al*., 2015).

Nesse estudo, os níveis de Ni na parte aérea não foram alterados por nenhum tratamento com N. No entanto, todas as fontes de N causaram um aumento de quase cinco vezes nos teores de Ni nas raízes. Como as condições do estudo não eram estressantes, sugerem-se estudos adicionais para investigar o comportamento do Ni na presença de contaminantes.

Figura 37 – Conteúdos de Ni em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

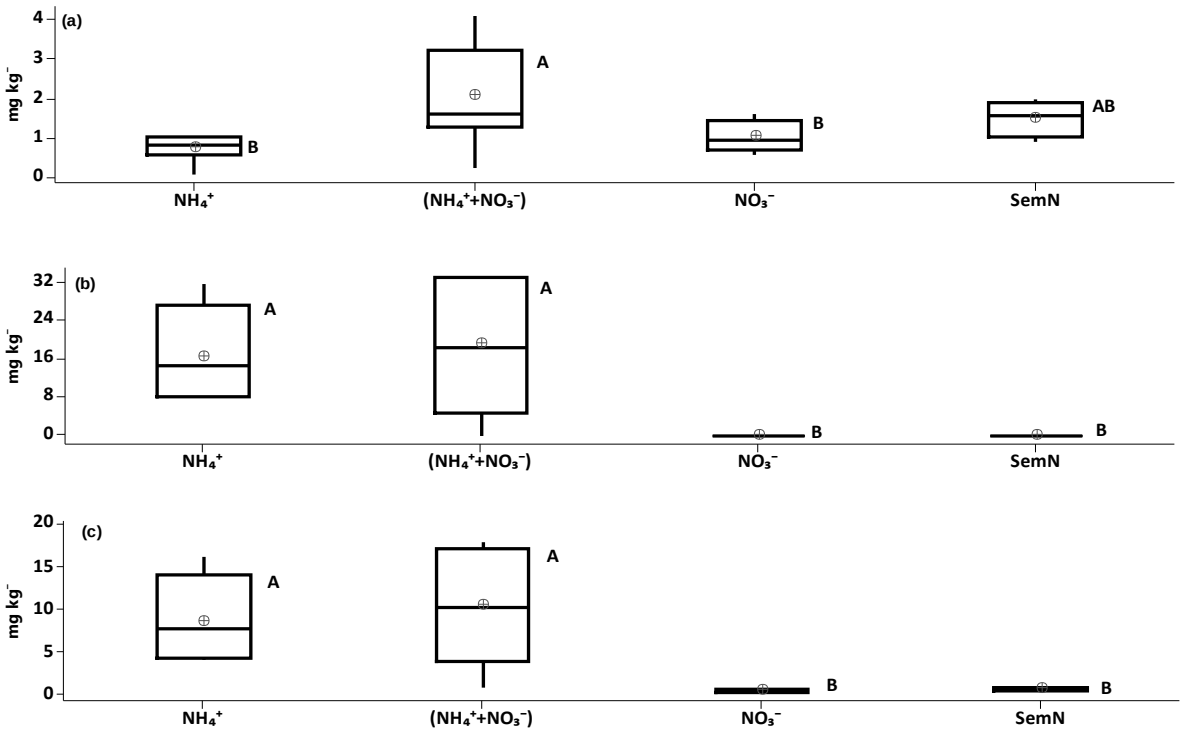
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados dos efeitos de N sobre os níveis de Cr são mostrados na Figura 38, o teor de Cr na parte aérea foi maior no tratamento (NH_4^+ + NO_3^-), porém de

maneira geral a concentração foi menor na parte aérea comparadas às raízes. A presença de Cr na parte aérea em pequenas quantidades, indica que a absorção e a translocação foram mínimas. Os níveis de Cr detectados em plantas tratadas com NH_4^+ e (NH_4^+ + NO_3^-) foram semelhantes aos observados na soja (Mei, Puryear E Newton, 2002).

O Cr não fez parte da formulação da solução de nutrientes e certamente se originou da vermiculita, apresentando níveis detectáveis nas raízes em resposta aos tratamentos NH_4^+ e (NH_4^+ + NO_3^-). No entanto, como a toxicidade do Cr requer um pH ácido próximo a 4,0 (Singh *et al*., 2013), o Cr não teve influência detectável nas plantas. É importante destacar que existem poucas evidências de impactos fisiológicos negativos no capim-braquiária devido à toxicidade de Cr (Marques *et al*., 2015).

Figura 38 – Conteúdos de Cr em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).

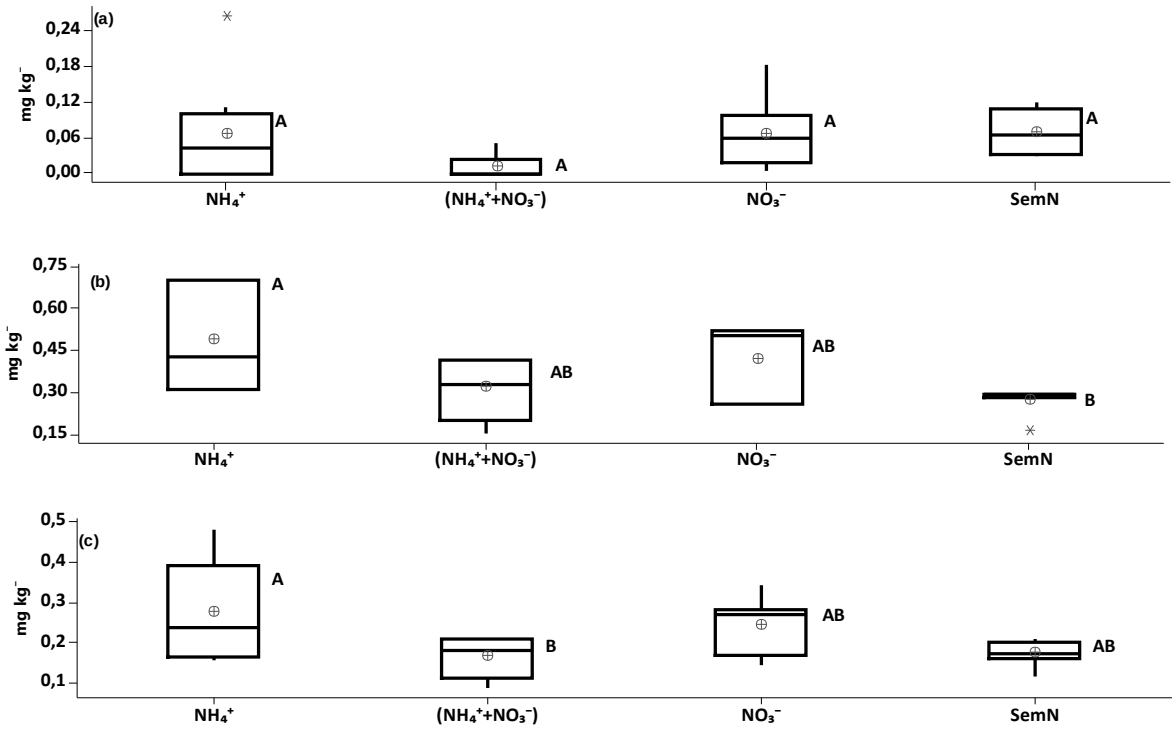


Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados dos efeitos de N sobre os níveis de Cd são mostrados na Figura 39. O Cd foi detectado em níveis vestigiais principalmente nas raízes, com maior efeito causado pelo NH_4^+, e os valores foram compatíveis com os verificados em *U. brizantha e U. decumbens* durante a germinação das sementes (Borges *et al*., 2018). O Cd não estava presente na formulação da solução de nutrientes, sendo conhecido por prejudicar a absorção e o metabolismo do N, bem como alterar características anatômicas das plantas do gênero *Urochloa* (Rabêlo e Borgo, 2016). Todas as fontes de N promoveram a captação de pequenas quantidades de Cd pelas raízes, havendo pouca translocação para a parte aérea.

Figura 39 – Conteúdos de Cd em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N na parte aérea (a), nas raízes (b) e na planta inteira (c).



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

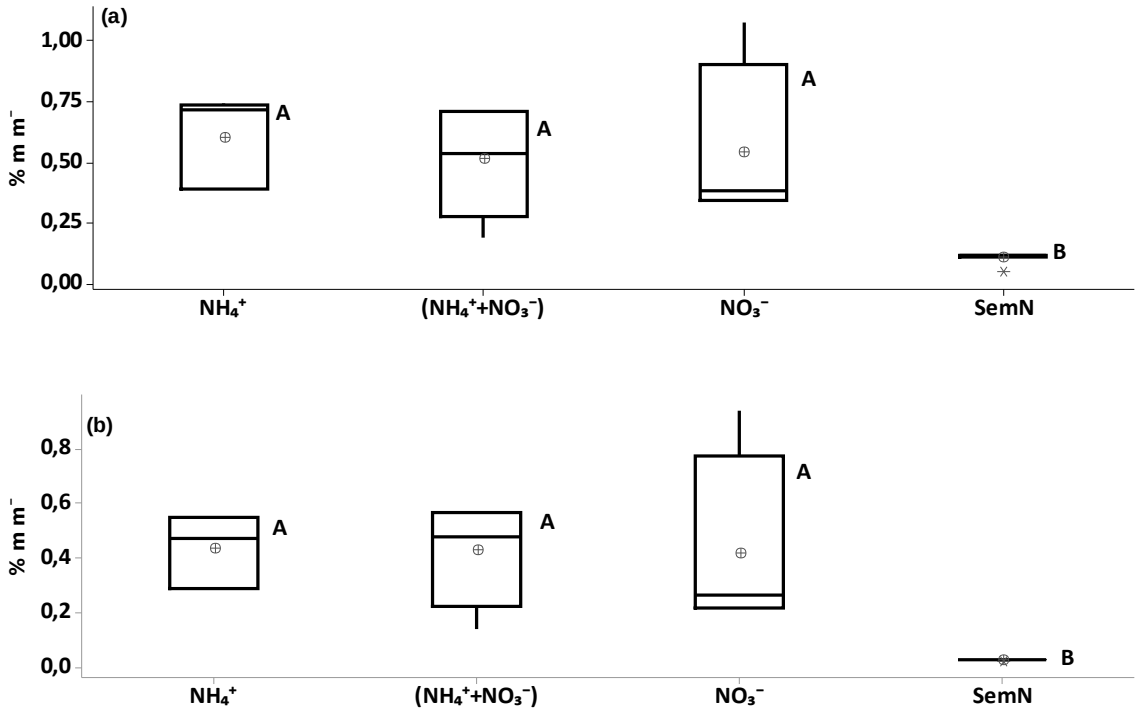
Os resultados dos efeitos de N sobre os níveis de Al e Fe são mostrados na Figura 40. O Al não foi detectado na parte aérea e os teores radiculares não foram expressivos em nenhum dos tratamentos com N, não havendo absorção na ausência de N (Figura 40 a). Provavelmente, os níveis de Al se originaram da vermiculita e aumentaram com todas as fontes de N, mas isso não causou nenhum dano detectável às plantas. É importante destacar que a toxicidade do Al só ocorre em solos com pH ácido, o que não foi o caso no substrato de crescimento utilizado (Cruz, Almeida e Santos, 2014). Em geral, os estudos têm se concentrado nos efeitos do Al sobre o N e não o contrário. Foi relatado que o Al reduz a atividade da redutase do nitrato (conversão de NO_3^- em formas utilizáveis de N pelas plantas) e o nível de NO_3^- em *Vigna unguiculata* (Cruz *et al.*, 2014); é possível que tal interação possa ocorrer quando o N induz o acúmulo de Al sob pH quase neutro no meio de cultivo.

Todas as fontes de N causaram um acúmulo notável de Fe nas raízes, mas não foi detectado concentrações significativas na parte aérea das plantas, portanto, a translocação foi despresível (Figura 40 b). Esse comportamento está de acordo com os estudos em *Triticum durum* que indicaram que a nutrição com N não tem efeito significativo na mobilização e absorção de ferro (Aciksoz *et al*., 2011). Como as medidas de crescimento das plantas estavam dentro dos valores normais e não houve sintomas de deficiência de Fe nas plantas tratadas com N, pode-se esperar um aumento nas concentrações de Fe na parte aérea com o tempo. Relacionando esses resultados com situações em que a concentração de Fe foi observada apenas nas raízes, com o aumento de rejeito adicionado ao solo por exemplo, pode-se inferir que as fontes de N podem ter um papel importante no aumento da absorção de Fe nas raízes, pois a concentração de Fe no rejeito também é alta.

A absorção de Fe em gramíneas é controlada pela síntese de compostos conhecidos como fitossideróforos. Para entender melhor esse processo, é necessário examinar as reações enzimáticas envolvidas. Estudos anteriores, como o realizado por Bashir *et al*. (2006), destacaram a importância de certas enzimas nesse contexto, incluindo a nicotianamina sintase, a nicotianamina aminotransferase e a ácido desoximuginico sintase. Essas enzimas atuam na produção de fitossideróforos, que são compostos orgânicos responsáveis por facilitar a absorção de Fe pelas raízes das gramíneas. Portanto, ao investigar e compreender as reações enzimáticas específicas nessas vias metabólicas, pode-se ganhar informações valiosas sobre como as

gramíneas regulam e realizam a absorção de Fe. Essa compreensão pode ser fundamental para explicar os resultados observados em estudos sobre o tema.

Figura 40 – Conteúdos de Al (a) e Fe (b) nas raízes em capim-braquiária em resposta aos tratamentos NH_4^+, (NH_4^+ + NO_3^-), NO_3^- ou sem N



Em cada variável, as médias seguidas da mesma letra não foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados no presente estudo mostraram pela primeira vez os efeitos de diferentes fontes de N sobre a absorção de elementos relevantes para o manejo nutricional de gramíneas tropicais. O aumento na absorção dos elementos variou de acordo com a fonte de N aplicada e o elemento alvo. Todas as fontes de N causaram discreto aumento na absorção de Cu e K na planta inteira e expressivas absorções de Al, Fe e Mg nas raízes. Houve um elevado aumento nos teores de Ni nas raízes causado por NH_4^+ e (NH_4^+ + NO_3^-), que se tornou mais intenso nas plantas expostas ao NO_3^-. Os tratamentos com NH_4^+ e (NH_4^++ NO_3^-) também promoveram níveis elevados de Cr nas raízes, havendo efeitos variados causados por fontes específicas de N, respectivamente, pelo NO_3^- sobre o Ca e pelo NH_4^+ sobre o Cd, ambos os casos expressos nas raízes. Efeitos negativos também foram verificados, como induzido por

todas as fontes de N sobre o acúmulo de Mn e Na na parte aérea e sobre Zn nas raízes. Batista *et al*. (2015), estudaram as alterações promovidas por NH_4NO_3 nas propriedades químicas de um solo para sucessão de culturas de soja com capim-braquiária, levando a reduções nos teores de Ca, Fe, Mn e Zn no solo.

Muitos estudos indicam relações complexas entre os elementos que podem causar ou prevenir desequilíbrios nutricionais nas culturas. Por exemplo, Rietra *et al*. (2017) relataram 117 interações entre macro e micronutrientes em diversas culturas, incluindo casos de sinergia, antagonismo e falta de interação. Novas descobertas de interações entre elementos têm aumentado o desafio de melhorar a nutrição das plantas (Kumar *et al*., 2021). Esta pesquisa se concentrou nos efeitos de diferentes fontes de N no crescimento e na absorção de outros elementos em condições de formulação de meio adequado. Não foi realizado procedimentos para quantificar os efeitos antagônicos e sinérgicos (Jacobsen, 1992), mas os resultados do estudo podem fornecer base para a caracterização dessas relações. As interações descobertas destacam a necessidade de análises químicas abrangentes do solo e da solução nutritiva sempre que possível.

O futuro da utilização de N na agricultura apresenta desafios significativos. O principal desafio é fornecer com precisão a quantidade necessária de N para atender às necessidades das culturas, enquanto controla o destino do N reativo para evitar perdas para o meio ambiente (Cassman e Dobermann 2022), especialmente porque a forma NO_3^- não é rapidamente incorporada no solo, resultando na contaminação da água e na degradação de ecossistemas aquáticos. Além disso, as previsões atuais indicam que os preços crescentes dos fertilizantes podem reduzir a produção de culturas em até 13% até 2050, com um aumento paralelo na área global de cultivo (Brunelle *et al*., 2021). Essas previsões destacam a urgência de melhorar a eficiência do uso e da escolha da fonte adequada de N.

A nutrição de plantas com íons NH_4^+ é considerada vantajosa devido aos menores custos energéticos associados à sua absorção e assimilação em comparação com o NO_3^- (Raven, 1985). Subbarao e Searchinger (2021) defendem o uso de NH_4^+ para reduzir a poluição por N e aumentar a produção de culturas. Como o íon NH_4^+ adere à maioria dos solos, especialmente argilosos e ricos em matéria orgânica, há pouca lixiviação com a água. Enquanto o N permanecer na forma de NH_4^+, o NO, um potente gás de efeito estufa, não será gerado, trazendo benefícios

mesmo na ausência de bloqueio sazonal da nitrificação. Os resultados desse estudo corroboram essas descobertas.

Compreender como as diversas fontes de nutrientes influenciam a absorção e translocação desses elementos é crucial para otimizar a aplicação de fertilizantes em diferentes contextos. Por exemplo, em regiões impactadas por rejeitos de mineração, como o acidente da Samarco, é essencial adaptar estratégias específicas para garantir a eficácia do fornecimento de nutrientes e promover a recuperação do solo. A atividade de mineração impacta a vegetação e a matéria orgânica, podendo resultar na perda de nutrientes do solo e restrições ao crescimento de espécies vegetais (Segura *et al*., 2016). Os resíduos depositados em áreas de mineração apresentam desequilíbrio de nutrientes, com baixa concentração de macronutrientes, como N, P K; e alta concentração de micronutrientes, Fe e Mn (Cruz *et al*., 2020).

O aumento significativo do pH do solo, passando de áreas preservadas para solos contaminados com rejeito, pode ser explicado pelo processo de beneficiamento de minério de ferro, especialmente a flotação reversa, que ocorre em um pH de aproximadamente 9. Esse aumento de pH poderia resultar em maior concentração de NH_4^+, e o NaOH utilizado no processo de flotação para estabilizar as éter-aminas, aumentando o pH para 10 (Araújo *et al*., 2012). Portanto, a tríade de pH elevado, Na e N-NH_4^+ encontrada em níveis significativamente elevados no rejeito, provavelmente tem origem no material proveniente da barragem (Santos *et al*., 2019).

Apesar de o N poder se apresentar na forma orgânica, as formas principais utilizadas pelas plantas são os íons NO_3^- e NH_4^+, com a preferência por essas formas variando entre as espécies. O NH_4^+ é considerado uma fonte alternativa de N em relação ao NO_3^-, devido à suscetibilidade deste último à lixiviação, reduzindo sua disponibilidade para as plantas e contribuindo para a eutrofização em corpos d'água. A absorção dessas formas de N pode afetar o estado nutricional das plantas devido às alterações no equilíbrio iônico no solo. Alterações na distribuição de massa seca entre a parte aérea e a raiz ocorrem em resposta às variações na concentração e na fonte de N no solo. Em geral, plantas apresentam maior proporção de biomassa na raiz em solos com baixa disponibilidade de N em comparação com solos ricos nesse elemento, favorecendo a busca ativa por N no solo (Liu *et al*., 2016).

Dentro dos elementos investigados, existem relatos sobre a influência do N e a disponibilidade de Mn em áreas impactadas, como no caso do estudo em questão, onde os rejeitos apresentam um teor elevado de Mn. Apesar de o Mn participar dos

processos metabólicos das plantas, sua alta concentração pode se tornar fitotóxica (Santos *et al*., 2017). A acidificação da rizosfera, promovida pela fonte de N, pode aumentar a disponibilidade de Mn no solo na ordem de $(NH_4)_2SO_4$ > NH_4NO_3 > $Ca(NO_3)_2$, comprometendo a absorção de Ca, Mg e K e acentuando os sintomas de toxicidade por Mn (Liu *et al*. 2016). Aumentar a disponibilidade de N é uma estratégia em programas de revegetação em áreas afetadas por resíduos de mineração. A escolha da fonte de N mais adequada para a revegetação em áreas de mineração pode assegurar o desenvolvimento ótimo das plantas, minimizando a contaminação dos recursos hídricos pela redução da lixiviação de N (Silva *et al*., 2022), e minimizar impactos ambientais, evidenciando a relevância de compreender as interações complexas entre os elementos em diferentes contextos, como na agricultura e em áreas de mineração.

Grande parte dos rejeitos da atividade humana, como é o caso do rejeito da Samarco, são deficientes em N, ou nem sequer possuem esse elemento em sua composição. Outros até possuem, mas a necessidade de processamento antes do uso, seja para a remoção de substâncias tóxicas ou por razões de segurança sanitária, acabam removendo o N ou deixando em níveis muito baixos, causadores de deficiência em vegetais. Já era sabido desde o início que a viabilização do uso do rejeito da Samarco para uso agrícola iria demandar o enriquecimento do substrato a ser produzido, tanto do ponto de vista nutricional, especialmente N, quanto do ponto de vista de características físicas. Conforme várias publicações da época, inclusive da Fundação Renova: (a) relativo ao primeiro caso, o rejeito da barragem de Bento Rodrigues tem baixos níveis de nutrientes e não possui, praticamente, disponibilidade de N (o qual é tido como o elemento mais importante para as plantas, especialmente aquelas cujo produto advém do crescimento vegetativo, como é o caso das braquiárias para a alimentação animal); e (b) relativo ao segundo caso, o referido rejeito perde água muito rapidamente e, quando está seco, apresenta adensamento, dificultando seu manuseio e também o estabelecimento sustentável de muitas espécies vegetais (o vegetal tem alto gasto energético para produzir sistema radicular frente à barreira física).

O melhor enriquecimento visualizado nesse trabalho foi a mistura do rejeito, em vários níveis, com solo, resolvendo a questão (b). Mas a questão (a) persistiria, necessitando de um enriquecimento com N e, para melhorar as chances de uma escolha sustentável adequada, foi realizado o estudo de diferentes fontes de N e suas

relações com a presença de vários outros elementos, benéficos ou não, e muitos dos quais estão presentes no rejeito da Samarco. E a potencial interferência (ou limitação) física do meio de sustentação, a qual poderia mascarar os resultados, foi removida neste estudo em particular pelo uso da vermiculita, um substrato inerte e altamente higroscópico e expansivo, permitindo assim avaliações mais precisas. A partir desse estudo, a fonte nitrogenada a ser adicionada ao rejeito, ou à mistura de rejeito com solo, poderá ser escolhida com base nas relações com vários outros elementos que estiverem sendo acrescentados ao substrato de crescimento final pela mistura do rejeito da Samarco com o solo. Haveria ganho nutricional no indicador “eficiência do uso de N”, certamente com reflexos econômicos.

5 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou ser viável incorporar o rejeito do rompimento da barragem da Samarco ao solo para o cultivo de braquiárias, tendo a proporção de 25 partes de rejeito e 75 partes de solo se revelado como a mais promissora.

As análises revelaram diferenças de morfologia e de composição entre o rejeito e o solo. O rejeito caracteriza-se pela presença de quartzo, goethita e hematita e o solo pela presença de uma série de minerais. Essas diferenças estruturais e texturais são relevantes para o adequado manejo agrícola do rejeito.

A digestão ácida em micro-ondas associada a análise por ICPOES foi utilizada para a caracterização elementar das amostras de solo e rejeito, tendo sido observado teores elevados principalmente de Al, Ca, Cr, Cu, Mg, Ni e Zn no solo, enquanto no rejeito foram observados níveis elevados de Fe e Mn. Destaque para o Cd que apresentou concentração acima do limite máximo permitido na amostra de rejeito. Foram encontrados maiores teores de N no solo em relação ao rejeito, também foi observado que o solo estudado apresentou leve acidez enquanto o rejeito apresentou pH neutro.

A avaliação fisiológica da braquiária em diferentes proporções de rejeito e solo indicou um aumento significativo no peso seco das raízes, sugerindo uma resposta adaptativa da planta. As análises de digestão ácida por bloco digestor associada à técnica de ICPOES revelaram que a adição de rejeito ao substrato de cultivo reduziu a concentração de K nas raízes e de Ca na parte aérea e aumentou o teor de Mn na planta inteira e de Fe nas raízes.

A braquiária mostrou respostas significativamente diferentes à fonte de suprimento de N. As maiores biomassas e absorção de N foram obtidas com a aplicação de NH_4^+. A absorção e a translocação dos elementos variaram de acordo com a fonte de N aplicada. Todas as fontes de N causaram discreto aumento na absorção de Cu e K na planta inteira e expressivas absorções de Al, Fe e Mg nas raízes.

Esses resultados oferecem contribuições importantes para o desenvolvimento de estratégias visando o uso sustentável de rejeitos de mineração, perspectiva a qual é ampliada tendo em vista a extensa área ocupada com pastagens de braquiárias no país. Por último, o estudo fornece base científica para a mitigação de danos

ambientais causados por derramamento de rejeitos de mineração, pela perspectiva de incorporar o poluente à produção agrícola.

5.1 ETAPAS FUTURAS

O estudo direciona as seguintes etapas futuras, considerando tanto o componente metodológico quanto o componente ecológico:

a) aprimorar um método de digestão para o rejeito, visando maior rapidez e eficiência;
b) otimizar o método de ICPOES e estabelecer as figuras de mérito para o método;
c) otimizar e validar o método de preparo de amostras para a técnica de espectrometria de absorção atômica;
d) investigar a opção de análise direta de elementos em baixa concentração nas amostras de solo, rejeito e braquiárias na forma de suspensões (slurry) por espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GFAAS);
e) realizar novas amostragens do rejeito para avaliar suas transformações físicas e químicas; carbono orgânico, atividade microbiológica, propriedades físicas do solo, drenagem, retenção de água;
f) ampliar o escopo do estudo para incluir uma avaliação mais abrangente da biodiversidade na área afetada, analisando outras espécies;
g) aprofundar a análise de elementos químicos, além daqueles identificados como relevantes no estudo, buscando ampliar o conhecimento sobre as interações químicas e biológicas promovidas pela inserção de rejeito nos sistemas produtivos ou de conservação ambiental;
h) investigar a especiação dos elementos de interesse, bem como sua disponibilidade nas amostras de rejeito, através de métodos de extração sequencial;
i) investigar em campo os efeitos do rejeito sobre o crescimento e composição mineral de braquiárias, bem como sobre a qualidade do solo;
j) avaliar em campo o potencial fitorremediador das braquiárias investigadas;

k) utilizar as informações obtidas para otimizar estratégias de fertilização, ajustando as quantidades dos nutrientes e formas de N aplicadas no solo e no rejeito, visando melhorar a disponibilidade para as plantas.

REFERÊNCIAS

ABRANCHES, J. L.; BATISTA, G. S.; RAMOS, S. B.; PRADO, R. M. Resposta da aveia preta à aplicação de zinco em Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 4, 278-282, 2009.

ACIKSOZ, B., OZTURK, L., GOKMEN, O. O., RÖMHELD, V., CAKMAK I. Effect of nitrogen on root release of phytosiderophores and root uptake of Fe (III)-phytosiderophore in Fe-deficient wheat plants. **Physiologia Plantarum**, 142, 287-296, 2011. doi.org/10.1111/j.1399-3054.2011.01460. x.

AGUIAR, C. A., MUNHOS, K. G., SAIDELLES, A. P. F., MULLER, C. C., DE MORAES FLORES, É. M., KIRCHNER, R. M. Determinação de Manganês em Amostras Vegetais como Bioindicador da Qualidade do Meio Ambiente. **BBR-Biochemistry and Biotechnology Reports**, v. 2, n. 3esp, p. 67-70, 2013.

ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M. A. Phytoremediation of heavy metals - Concepts and applications. **Chemosphere**, 91,869–881, 2013.

ALMEIDA, H., A.; TORRE, F. D.; GARCIA, Q. S. Cultivating vegetables in tailings from the Fundão dam collapse: metal accumulation and risks to food safety. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 6, p. 410, 2022.

ANDA, M., PURWANTARI, N. D., YULISTIANI, D., SURYANI, E., AGUS, F. Reclamation of post-tin mining areas using forages: A strategy based on soil mineralogy, chemical properties and particle size of the refused materials. **Catena**, v. 213, p. 106140, 2022.

ANDRADE, G. F., PANIZ, F. P., MARTINS JR, A. C., ROCHA, B. A., DA SILVA LOBATO, A. K., RODRIGUES, J. L., CARDOSO-GUSTAVSON, P., MASUDA, H. P., BATISTA, B. L. Agricultural use of Samarco's spilled mud assessed by rice cultivation: A promising residue use? **Chemosphere**, v. 193, p. 892-902, 2018.

ANDRESEN, E., PEITER, E., KÜPPER H. Trace metal metabolism in plants. **Journal of Experimental Botany**, 69, 909-954, 2018.doi:10.1093/jxb/erx465.

ANVISA, R. **Guia para validação de métodos analíticos e bioanalíticos**. 2017.

ARAÚJO, B. D., MAIA, R., ARANTES-GARCIA, L., OKI, Y., NEGREIROS, D., de ASSIS, I. R., FERNANDES, G. W. Aftershocks of the samarco disaster: Diminished growth and increased metal content of raphanus sativus cultivated in soil with mining tailings. **Acta Scientiarum-Biological Sciences**, v. 44, 2022.

ARAÚJO, M. M.S.; SANTOS, H. I.; FERREIRA, O. M. **Análise do gerenciamento dos resíduos sólidos da mineração Serra Grande S.A., Município de Crixás - Goiás.** 1989. 180 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental – Faculdade de Engenharia, Pontifica Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2012.

ARROYAVE, C., TOLRÀ, R., THUY, T., BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, C. Differential aluminum resistance in Brachiaria species. **Environmental and Experimental Botany**, v. 89, p. 11-18, 2013.

ASFORA, V. K. **Fluorescência de raio X por dispersão de energia aplicada à caraterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco**. 2010. Dissertação de mestrado (Ciências Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

ASSIS, G. A., GUIMARÃES, R. J., COLOMBO, A., SCALCO, M. S., DOMINGHETTI A. W. Critical ranges for leaf nitrogen and potassium levels in coffee fertigated at the production phase. **Revista Ciência Agronômica**, 46, 126-134, 2015.

BARBERO, R. P., RIBEIRO, A. C. C., MOURA, A. M., LONGHINI, V. Z., MATTOS, T. F. A., BARBERO M. M. D. Production potential of beef cattle in tropical pastures: a review. **Ciência Animal Brasileira**, 22, 1-21, 2021. doi: 10.1590/1809-6891v22e-69609.

BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável**: Desafios para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

BASHIR, K., INOUE, H., NAGASAKA, S., TAKAHASHI, M., NAKANISHI, H., MORI, S., NISHIZAWA, N. K. Cloning and characterization of deoxymugineic acid synthase genes from graminaceous plants. **Journal of Biological Chemistry** 281 (43):32395–402, 2006. doi: 10.1074/jbc.M604133200.

BATISTA, K., GIACOMINI, A. A., MATTOS, W. T., GERDES, L., OTSUK, I. P. Changes in the chemical properties of soil cultivated with Brachiaria ruziziensis regarding nitrogen fertilization. **International Journal of Plant and Soil Science**, 7, 160-171, 2015.

BHP, SamarcoAdvisory and Support Team, **Caso Samarco**, 2017170131_samarcoupdate.pdf (bhp.com). Acesso em: 22 nov. 2023

BORGES, K. S. C., D'AVILA, R. C., CAMPOS, M. L., COELHO, C. M. M., MIQUELLUTI, D. J., GALVAN, N. S. Germination, and initial development of Brachiaria brizantha and Brachiaria decumbens on exposure to cadmium, lead and cooper. **Journal of Seed Science**, 38, 335-343, 2018. doi: 10.1590/2317-1545v38n4165265.

BORKERT, C. M.; YORINORI, J. T.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; ALMEIDA, A. M. R.; FERREIRA, L. P.; SFREDO, G. J. **Seja o doutor da sua soja**, 66, 1994.

BRASIL, CÂMARA DOS DEPUTADOS, **Comissão Externa do Rompimento de Barragem na Região de Mariana – MG (CEXBARRA) RELATÓRIO FINAL**, 2016.

BRAZ, A. J. B. P., DA SILVEIRA, P. M., KLIEMANN, H. J., ZIMMERMANN, F. J. P. Acumulação de nutrientes em folhas de milheto e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, n. 2, p. 83-87, 2004.

BRUNELLE, T., DUMAS, P., SOUTY, F.; DORIN, B., NADAUD F. Evaluating the impact of rising fertilizer prices on crop yields. **Agricultural Economics**, 46, 653-666, 2021. doi.org/10.1111/agec.12161.

BURGES, A., EPELDE, L., BENITO, G., ARTETXE, U., BECERRIL, J. M., GARBISU, C. Enhancement of ecosystem services during endophyte-assisted aided

phytostabilization of metal contaminated mine soil. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 480-492, 2016.

CASSMAN, K. G., DOBERMANN, A. Nitrogen and the future of agriculture: 20 years on. **Ambio**, 51 (1):17–24, 2022. doi: 10.1007/s13280-021-01526-w.

CASTOLDI, G., REIS, J. G., FREIBERGER, M. B., SANTOS, D. C., ROSOLEM C. A. Soil dynamic alterations and use efficiency of nitrogen by Brachiaria species. **Australian Journal of Crop Science**, 11, 1221-1227, 2017. dx.doi.org/10.21475/ajcs.17.11.09. pne604.

CHAVES, L. H. G., ESTRELA, M. A., DE SOUZA, R. S. Effect on plant growth and heavy metal accumulation by sunflower. **Journal of Phytology**, v. 3, n. 12, 2011.

CHEN, Z. C., PENG, W. T., LI, J., LIAO, H. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. **Seminars in Cell & Developmental Biology** 4:142–52, 2018. doi: 10.1016/j.semcdb.2017.08.005.

CHHABRA, R. Salt-affected Soils and Marginal Waters: Global Perspectives and Sustainable Management. **Springer Nature**, p. 101-160, 2022.

CLARK, R. Characterization of phosphatase of intact maize roots. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 23, 458-460, 1975. doi.org/10.1021/jf60199a002.

COELHO, D. G., MARINATO, C. S., DE MATOS, L. P., DE ANDRADE, H. M., DA SILVA, V. M., NEVES, P. H. S., DE OLIVEIRA, J. A. Evaluation of metals in soil and tissues of economic-interest plants grown in sites affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 596-607, 2020.

COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa nº 166, de 29 de junho de 2011**. Diário Oficial do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, nº 140.de, 2011.

COSKUN, D., BRITTO, D. T., KRONZUCKER H. J. The nitrogen-potassium intersection: membranes, metabolism, and mechanism. **Plant, Cell and Environment**, 40, 2029-2041, 2017. doi: 10.1111/pce.12671.

COSTA, H.T. D. **Concentração de metais pesados nos solos utilizados para agricultura urbana na cidade de Lisboa**. 2015. Dissertação de Mestrado (Engenharia do Ambiente), Universidade de Lisboa (Portugal), 2015.

COSTA, K.A. P.; DE OLIVEIRA, I. P.; FAQUIN, V. Adubação nitrogenada para pastagens do gênero Brachiaria em solos do Cerrado. **Documentos / Embrapa Arroz e Feijão**, ISSN 1678-9644, 192, Santo Antônio de Goiás :Embrapa Arroz e Feijão, 2006.

COSTA, T., SOUZA, F. A., NETTO, D., de ALMEIDA, L. G., ROCHA, H., VIANA, J., ARAÚJO, N. Estabelecimento de espécies arbóreo-arbustivas no rejeito de minério de ferro da barragem de Fundão em Mariana-MG, tratado com calcário, fertilizantes

e microrganismos, **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo**, ISSN 1679-0154; 170, Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018.

COUTINHO, H. D.; BARBOSAS, A. R. Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. **Silva Lusitana**, 15(1), 103-117, 2007.

COUTO, F. R., DE MELLO FERREIRA, A., PONTES, P. P., MARQUES, A. R. Physical, chemical and microbiological characterization of the soils contaminated by iron ore tailing mud after Fundão Dam disaster in Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 158, p. 103811, 2021.

CRUZ, F. J. R., ALMEIDA, H. J., SANTOS, D. M. M. Growth, nutritional status and nitrogen metabolism in 'Vigna unguiculata' (L.) Walp is affected by aluminum. **Australian Journal of Crop Science**, 8, 1132-1139, 2014.

CRUZ, F. V. S.; GOMES, M. P.; BICALHO, E. M.; TORRE, F. D.; GARCIA, Q. S. Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic Rainforest? **Ecotoxicol Environ Saf**, v. 189, 2020.

DINARDI, A. L.; FORMAAGI, V. M.; CONEGLIAN, C. M. R.; BRITO, N. N.; SOBRINHO, G. D.; PELEGRINI, S. T. R. **FITORREMEDIAÇÃO, Curso de Tecnologia em Saneamento Ambiental, Laboratório de Pesquisas Ambientais – LAPA**. Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET) – UNICAMP, 2003.

DUARTE, H. A. Ferro-Um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Química Nova**, v. 42, p. 1146-1153, 2020.

EBDON, L.; FOULKES, M.; O`HANLON, K. Optimised simultaneous multi-element analysis of environmetal slurry by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry using a segmented array charge-coupled device detector. **Analytica Chimica Acta**, 123-134,1995.

EL SEBAI, T.; ABDALLAH, M. Role of Microorganisms in Alleviating the Abiotic Stress Conditions Affecting Plant Growth. **Advances in Plant Defense Mechanisms.** IntechOpen, 2022.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª edição revista, 2014.

ENSINAS, S. C., SERRA, A. P., MARCHETTI, M. E., DA SILVA, E. F., FERREIRA DO PRADO, E. A., LOURENTE, E. R. P., ALTOMAR, P. H., POTRICH, D. C., MARTINEZ, M. A., CONRAD, V. A., JESUS, M. V., EL KADRI, T. C. Cover crops affect on soil organic matter fractions under no till system. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 4, p. 503-512, 2016.

EPSTEIN, E., BLOOM A. P. **Princípios e perspectivas**. Editora Planta, Londrina, Brazil, 2006.

ESTRELA, M. A., CHAVES, L. H. G., SILVA, L. N. Fitorremediação como solução para solos contaminados por metais pesados. **Revista Ceuma Perspectivas**, 31(1), 160-172, 2018.

FABIANO, C. C., TEZOTTO, T., FAVARIN, J. L., POLACCO, J. C., MAZZAFERA, P. Essentiality of nickel in plants: A role in plant stresses. **Frontiers in Plant Science** 6:754, 2015. doi: 10.3389/fpls.2015.00754.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in agronomy**, v. 99, p. 345-399, 2008.

FERREIRA, D. A., GAIÃO, L. M., KOZOVITS, A. R., MESSIAS, M. C. Evaluation of metal accumulation in the forage grass Brachiaria decumbens Stapf grown in contaminated soils with iron tailings. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 18, n. 2, p. 528-538, 2022.

FERREIRA, E. V. O., NOVAIS, R. F., MÉDICE, B. M., BARROS, N. F., SILVA I. R. Leaf total nitrogen concentration as an indicator of nitrogen status for plantlets and young plants of eucalyptus clones. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** 39, 1127-1140, 2015. doi.org/10.1590/01000683rbcs20140689.

FONSECA, A. A., SANTOS, D. A., PASSOS, R. R., ANDRADE, F. V., RANGEL, O. J. P. Phosphorus availability and grass growth in biochar-modified acid soil: a study excluding the effects of soil pH. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 4, p. 714-725, 2020.

FREITAS, J. C. E., DE RESENDE, C. F., DE PAULA PIMENTA, M., FRATTINI, L. M., REIS, P. R. C., MIRANDA, J. B., DA SILVA, J. C. J., CÉSAR, D. E., NERY, F. C., PEIXOTO, P. H. P. Assessing the ecophysiological effects of iron mining tailings on velvet bean: implications for growth limitations based on mineral composition and physicochemical properties of tailings-soil substrates. **Brazilian Journal of Botany**, v. 46, n. 3, p. 715-729, 2023.

FUNDAÇÃO RENOVA, **barragem de Fundão**, 2016. www.fundacaorenova.org. Acesso em: 19 jan. 2019

GARCÍA, I. L.; VIÑAS, P.; CÓRDOBA, M. H. Slurry Procedure for the Determination of Titanium in Plant Materials Using Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, 7, 1992.

GOMES, A. C. F., CORDEIRO, C. C. M., SANTOS, R. A. D., SOARES, V. R. A., ROCHA, S. D. F. Aplicação de rejeito de mineração em pequena escala de ouro na produção de tijolo de solo-cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13141, 2022.

GOMES, M. P., NOGUEIRA, M. D. O. G., CASTRO, E. M. D., SOARES, Â. M. Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in Brachiaria decumbens. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 566-573, 2011.

GONDIM, T. F., INGUNZA, M. D. P. D., FREITAS NETO, O. D., SANTOS JÚNIOR, O. F. D. Potencialidade de uso do resíduo da scheelita em sistemas de cobertura de aterro de resíduos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, p. 597-606, 2022.

GRUPO DA FORÇA-TAREFA, GOVERNO DO ESTADO DE MINAS. **Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana-MG**, 2016.

GUO, W., NAZIM, H., LIANG, Z., YANG, D. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. **The Crop Journal** 4 (2):83–91, 2016. doi: 10.1016/j.cj.2015.11.003.

HAQUE, I.; ADUAYI, E. A.; SIBANDA, S. Copper in soils, plants, and ruminant animal nutrition with special reference to sub-Saharan Africa. **Journal of plant nutrition,** v. 16, n. 11, p. 2149-2212, 1993.

HASANUZZAMAN, M., BHUYAN, M. B., NAHAR, K., HOSSAIN, M. S., MAHMUD, J. A., HOSSEN, M. S., FUJITA, M. Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. **Agronomy**, v. 8, n. 3, p. 31, 2018.

HAUER-JÁKLI, M., TRÄNKNER M. Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: A systematic review and meta-analysis from 70 years of research. **Frontiers in Plant Science**, 10, 1-15, Article 766, 2019. doi.org/10.3389/fpls.2019.00766.

HUANG, B.; DUNCAN, R. R.; CARROW, R. N. Drought-resistance mechanisms of seven warm-season turfgrasses under surface soil drying: II. Root aspects. **Crop science**, v. 37, n. 6, p. 1863-1869, 1997.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, **Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Laudo Técnico Preliminar, 2015.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas Gerência de Monitoramento de Qualidade das Águas. **Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce Após o Rompimento da Barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG**, 2016.

INMETRO – **Orientações sobre validação de métodos de ensaios químicos. Instituto Nacional de Metrologia**, Normalização e Qualidade Industrial, 2016.

IZOSIMOVA, A. **Modelling the interaction between calcium and nickel in the soil-plant system**. (130 pp.) (FAL), 2005.

JACOBSEN, S. T. Interaction between plant nutrients. 1. Theory and analytical procedures. Acta Agriculture Scandinavica. **Soil and Plant Science**, Section B, 42, 208-212, 1992. doi.org/10.1080/09064719209410213.

JUNIOR, A. B. O., FIGUEIREDO, M. A. P., FOGAÇA, C. A., FIGUEIREDO, L. H. A., HORN, A. H. Análise foliar de urochloa decumbens e identificação de plantas invasoras em uma área de recuperação de um depósito de metalurgia de zinco. **Geochimica Brasiliensis**, v. 33, n. 4, p. 370-377, 2019.

KLAASSEN, C. D. **Toxicology: The Basic Science of Poisons**. 6 ed. McGraw-Hill, p.812-837, 2001.

KHATUN, J.; INTEKHAB, A.; DHAK, D. Effect of uncontrolled fertilization and heavy metal toxicity associated with arsenic (As), lead (Pb) and cadmium (Cd), and possible remediation. **Toxicology**, p. 153274, 2022.

KIDD, P., BARCELÓ, J., BERNAL, M. P., NAVARI-IZZO, F., POSCHENRIEDER, C., SHILEV, S., MONTERROSO, C. Trace element behaviour at the root–soil interface: implications in phytoremediation. **Environmental and Experimental Botany**, v. 67, n. 1, p. 243-259, 2009.

KREMENETSKAYA, I.; IVANOVA, L.; CHISLOV, M.; ZVEREVA, I.; VASILEVA, T.; MARCHEVSKAYA, V.; SEMUSHIN, V.; SLUKOVSKAYA, M. Physicochemical transformation of expanded vermiculite after long-term use in hydroponics. **Applied Clay Science**, v. 198, 105839, 2020. doi.org/10.1016/j.clay.2020.105839.

KUDLA, J., BECKER, D., GRILL, HEDRICH, E. R., HIPPLER, M., KUMMER, U., PARNISKE, M., ROMEIS, T., SCHUMACHER, K. Advances and current challenges in calcium signaling. **The New Phytologist** 218 (2):414–31,2018. doi: 10.1111/nph.14966.

KUMAR, S., KUMAR, S., MOHAPATRA, T. Interactions between macro- and micro-nutrients in plants. **Frontiers in Plant Science** 12:665583, 2021. doi: 10.3389/fpls.2021.665583.

LAKIĆ, Ž.; PREDIĆ, T., ĐURĐIĆ, I., POPOVIĆ, V. Recultivation of degraded soil due to mining activity without adding organic layers of soil using Alfalfa and mixtures of grass legumes. **Agriculture & Forestry**, v. 66, n. 4, p. 223-237, 2020.

LAKSHMI, P.M., JAISON, S., MUTHUKUMAR, T., MUTHUKUMAR, M. Assessment of metal accumulation capacity of Brachiaria ramose collected from cement waste dumping area for the remediationof metal contaminated soil. **Ecological Engineering**, 60, 96– 98, 2013.

LEDUC, D. L.; TERRY, N. "Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water". **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology,** 32.11-12, 514-520, 2005.

LI, S. X., WANG, Z. H., STEWART, B. A. Response of crop plants to ammonium and nitrate N. **Advances in Agronomy**, 118, 205-397, 2013. doi: 10.1016/B978-0-12-405942-9.00005-0.

LIMA, J. E. S., NASCENTE, A. S., LEANDRO, W. M., SILVEIRA, P; M. Urochloa ruziziensis responses to sources and doses of urea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** 20, 401-497, 2016. dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi. v20n5p401-40.

LIMA, T. O. C.; OLIVEIRA, R. M. P. B. Reações expansivas em concretos com agregados minerais: uma revisão. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia,** ISSN: 1984-5693, v. 12, 2020.

LIU, S., YANG, R., PAN, Y., REN, B., CHEN, Q., LI, X., XIONG, X., TAO, J., HENG, Q. Beneficial behavior of nitric oxide in copper-treated medicinal plants. **Journal of Hazardous Materials,** 314, 140-154, 2016. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.04.042

LONGO, R. M., RIBEIRO, A. Í., MELO, W. J. D. Uso da adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica. **Bragantia,** *70*, 139-146, 2011

LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Tradução e Adaptação, v. 2, 1998.

MAATHUIS, F. J. M. Sodium in plants: Perception, signaling, and regulation of sodium fluxes. **Journal of Experimental Botany** 65 (3):849–58, 2014. doi: 10.1093/jxb/ert326.

MACEDO, M. C. M., ZIMMER, A. H., KICHEL, A. N., ALMEIDA, R. D., ARAUJO, A. D. Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. **Encontro de Adubação de Pastagens da Scot Consultoria. Ribeirão Preto: Scot Consultoria**, v. 1, p. 158-181, 2013.

MACEDO, M. C. M. Pastagens no ecossistema cerrados: pesquisas para o desenvolvimento sustentável. In: SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSSISTEMAS BRASILEIROS: PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 1995, Brasflia, DF. Anais. **Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, 32, Brasilia, DF, 1995, p. 28-62.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALINOWSKA, E., JANKOWSKI, K., WISNIEWSKA-KADZAJAN, B., J. SOSNOWSKI, B., KOLCZAREK, R., JANKOWSKA, J., CIEPIEL, G. A. Content of zinc and copper in selected plants growing along a motorway. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology** 95 (5):638–43, 2015. doi: 10.1007/s00128-015-1648-8.

MANTOVANELLI, B. C., PETRY, M. T., MARTINS, J. D., CARLESSO, R. Qualidade física de solos do Brasil e aplicabilidade de métodos para estimativas de retenção de água no solo: A revisão. **Revista Edutec**, v. 3, n. 1, 2022.

MARQUES, R., OLIVEIRA, M. A. L., REIS, C. R. G., KOPP, M. M., PASSOS, L. P. factorial design applied to the study of chromium toxicity on the glutathione levels of Brachiaria brizantha and Brachiaria ruziziensis seedlings. **Química Nova,** 38:987–91, 2015. doi: 10.5935/0100-4042.20150089.

MARTINS, M. A. A., DE JESUS JUNIOR, N. P., TAGUCHI, S. P., OLIVEIRA, R. N., DE GÓES CASQUEIRA, R., JÚNIOR, L. A. B. Utilização do resíduo de vidro de uma empresa metalúrgica para aplicação em placas de solo-cimento. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 19, 2022.

MARTINS, M.; LIMA, N. P.; LEAL FILHO, L. S. Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. **Revista Escola de Minas**, v. 65, p. 393-400, 2012.

MEI, B., PURYEAR, J., NEWTON, R. J. Assessment of Cr tolerance and accumulation in selected plant species. **Plant and Soil** 247 (2):223–31, 2002. doi: 10.1023/A:1021509115343.

MENDES, A. **Introdução a fertilidade do solo**, 2007.

MIMURA, A. M. S.; FERREIRA, C. C. M.; SILVA, J. C. J. Fast and feasible sample preparation methods for extraction of trace elements from deposited particulate matter samples. **Analytical Methods**, v. 9, n. 3, p. 490-499, 2017.

MIRANDA, D. M., DE OLIVEIRA COELHO, B. A., BENITES, L. P., DE OLIVEIRA, G., PARREIRA, A. J. P. D. C., FERNANDES, P. N. F. Impactos físicos e psicológicos na população de Brumadinho após rompimento da barragem de rejeitos. **Rev. méd. Minas Gerais**, p. 31212-31212, 2021.

MORAES, C. P., BRITO, I. P. F. S., MATOS, A. K. A., CARBONARI, C. A., GOMES, G. L. G. C., VELINI, E. D. Efeito de subdoses de glyphosate no crescimento e no teor nutricional de plantas de capim-braquiária. **Anais Simpoherbi**, v. 1, 2019.

MORALES, L. F. G.; HINRICHS, R.; FERNANDES, L. A. D. A técnica de difração de elétrons retro-espalhados (EBSD) em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e sua aplicação no estudo de rochas deformadas. **Pesquisas em Geociências**. Vol. 34, n. 1 (jan./jun. 2007), p. 19-34, 2007.

MPF - Ministério Público Federal, **Case Samarco - The Disaster**. Retrieved from https://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/o-desastre. Acesso em: 20 jul. 2023.

MULLER, A.; FERRÉ, M.; ENGEL, S.; GATTINGER, A.; HOLZKAMPER, A.; HUBER, R.; MULLER, M.; SIX, J. Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture? **Land Use Policy**, v. 69, p. 102-105, 2017. doi:10.1016/j.landusepol.2017.09.014.

NASCIMENTO, D. R. Flotação aniônica de minério de ferro. 2010. 116p. **Tratamento de minérios –Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto**, 2010.

NASCIMENTO, S. S., SILVA, E. B., ALLEONI, L. R. F., GRAZZIOTTI, P. H., FONSECA, F. G., NARDIS, B. O. Availability and accumulation of lead for forage grasses in contaminated soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 14, n. 4, p. 783-802, 2014.

NATASHA, N., SHAHID, M., BIBI, I., IQBAL, J., KHALID, S., MURTAZA, B., BAKHAT, H. F., FAROOQ, A. B. U., AMJAD, M., HAMMAD, H. M., NIAZI, N. K. ARSHAD M. Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. **Science of the Total Environment**, 808, 1-13, Article 152024, 2022. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152024.

NOVAES, C. G., BEZERRA, M. A., DA SILVA, E. G. P., DOS SANTOS, A. M. P., DA SILVA ROMAO, I. L., NETO, J. H. S. A review of multivariate designs applied to the optimization of methods based on inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP OES). **Microchemical journal**, v. 128, p. 331-346, 2016.

OLESIK, J. W. Elemental analysis using icp-oes and icp/ms. **Analytical Chemistry**, v. 63, n. 1, p. 12A-21A, 1991.

OLIVEIRA, F. B.; SILVA CANDOTTI, C.; ABREU MARQUES, R. **Geologia Aplicada**, 2008.

OMACHI, C.Y., SIANI, S.M.S., CHAGAS, F.M., MASCAGNI, M.L., CORDEIRO, M., GARCIA, G.D., THOMPSON, C.C., SIEGLE, E., THOMPSON, F.L. Atlantic Forest loss caused by the world´ s largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 2018. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.08.003.

OURIVES, O. E. A., SOUZA, G. M., TIRITAN, C. S., SANTOS, D. H. Fertilizante orgânico como fonte de fósforo no cultivo inicial de Brachiaria brizantha cv. Marandú. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 2, p. 126-132, 2010.

PACIULLO, D. S. C., RODRIGUES, P. R., SOARES, N. A., GOMIDE, C. A. M., SOUZA SOBRINHO, F. MORENZ M. J. F. Produção de Brachiaria ruziziensis cv. BRS Integra sob pastejo, ao longo do ano. Production of Brachiaria ruziziensis cv. BRS Integra under grazing throughout the year (26 pp.) **Embrapa Gado de Leite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 43, 2021.

PENNA, I. C.; MARTINS, T. S.; DA SILVEIRA, J. V. W. Fibras Eletrofiadas Aplicadas na Remoção de Metais Pesados em Águas Residuárias da Mineração: uma Revisão Sistemática. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 3, 2022.

PEREIRA, T. T.C.; KER, J. C.; ALMEIDA, C. C. Qualidade de solos cultivados com eucalipto na região central de Minas Gerais: atributos físicos, químicos e mineralógicos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. suplemento, p. 706-713, 2012.

PIRES, A. M. M.; MARCHI, G., MATTIAZZO, M. E.; GUILHERME, L. R. G. Organic acids in the rhizosphere and phytoavailability of sewage sludge-borne trace elements. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 42(7), 917-924, 2007.

PIRES, J. M. M., LENA, J. C. D., MACHADO, C. C., PEREIRA, R. S. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano. **Revista Árvore**, v. 27, p. 393-397, 2003.

PRADO, R.M. **Manual de Plantas Forrageiras**, 2008.

PREZOTTI, L. C., GUARÇONI, A. M. **Guia de interpretações de análise de solo e foliar**, 2013.

PUGA, A. P. Biocarvão na mitigação da toxicidade de metais pesados em solos de área de mineração. **Instituto Agronômico de Campinas, Campinas**, v. 105, 2015.

QADIR, M., NOBLE, A. D., SCHUBERT, S., THOMAS, R. J., ARSLAN, A. Sodicity-induced land degradation and its sustainable management: Problems and prospects. **Land Degradation & Development**, v. 17, n. 6, p. 661-676, 2006.

QUEIROZ, H. M., NÓBREGA, G. N., FERREIRA, T. O., ALMEIDA, L. S., ROMERO, T. B., SANTAELLA, S. T., BERNARDINO, A. F., OTERO, X. L. The Samarco mine tailing disaster: a possible time-bomb for heavy metals contamination? **Science of the Total Environment**, v. 637, p. 498-506, 2018.

QUEIROZ, H. M., YING, S. C., ABERNATHY, M., BARCELLOS, D., GABRIEL, F. A., OTERO, X. L., FERREIRA, T. O. Manganese: The overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse. **Environment international**, v. 146, p. 106284, 2021.

RABÊLO, F. H. S., BORGO, L. Changes caused by heavy metals in micronutrient content and antioxidant system of forage grasses used for phytoremediation: an overview. **Ciência Rural**, (AHEAD), 2016.

RAGEL, P., RADDATZ, N., LEIDI, E. O., QUINTERO, F. J., PARDO, J. M. Regulation of K^+ nutrition in plants. **Frontiers in Plant Science** 10:281,2019. doi: 10.3389/fpls.2019.00281.

RAO, I. M.; CRAMER, G. R. Plant Nutrition and Crop. **Plants, Genes, and Crop Biotechnology**, p. 270, 1996.

RAVEN, J. A. Regulation of pH and generation of pH and generation of osmolarity in vascular plants: a cost-benefit analysis in relation to efficiency of use of energy, nitrogen, and water. **New Phytologist**, 101, 25-77, 1985. dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137. 1985.tb02816. x.

REATTO, A., FONTES, M. P. F., ALVAREZ V, V. H., RESENDE, M., KER, J. C., COSTA, L. M. Caracterização mineralógica, potencial de reserva e sustentabilidade agrícola de alguns sítios florestais de eucalipto da região do Vale do Rio Doce (MG). **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 22, p. 255-266, 1998.

RESENDE, A. V., GIEHL, J., SIMÃO, E. D. P., ABREU, S. C., FERREIRA, A. C. B., BORIN, A. L. D., MARRIEL, I. E., MELO, I. G., MARQUES, L. DE S. NETO, M. M. G. Créditos de nutrientes e matéria orgânica no solo pela inserção do capim-braquiária em sistemas de culturas anuais. **Sete Lagoas: Embrapa**, 2021.

RESENDE, A. V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, v. 156, p. 1-17, 2016

RIBEIRO JUNIOR, A. C., Silva, A. O., Batista, É. R., Naves, F. S., Pinto, F. A., SANTOS, J. V. D., CARNEIRO, M. A. C. Biochemical attributes, and establishment of tree seedlings in soil after *Urochloa decumbens* cultivation in soil with deposition of iron mining residues. **Cerne**, v. 27, p. e-102623, 2021.

RIETRA, R. J. J., HEINEN, M., DIMKPA, C. O., BINDRABAN, P. S. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. **Communications in**

Soil Science and Plant Analysis, 48 (16):1895–920, 2017. doi: 10.1080/00103624.2017.1407429.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais,** 2010.

SÁ, R. T. S., PRIANTI, M. T. A., ANDRADE, R., SILVA, A. O., BATISTA, É. R., DOS SANTOS, J. V., RIBEIRO, B. T. Detailed characterization of iron-rich tailings after the Fundão dam failure, Brazil, with inclusion of proximal sensors data, as a secure basis for environmental and agricultural restoration. **Environmental Research**, v. 228, p. 115858, 2023.

SANTINI, J. M. K., BUZETTI, S., GALINO, F. S., DUPAS, E., COAGUILA, D. N. Técnicas de manejo para recuperação de pastagens degradadas de capim-braquiária (Brachiaria decumbens Stapf cv. Basilisk). **Boletim de Indústria Animal**, v. 72, n. 4, p. 331-340, 2015.

SANTOS, M., FERREIRA, E. A., VALADÃO, D., OLIVEIRA, F. L. R., MACHADO, V. D., SILVEIRA, R. R., SOUZA M. F. Brachiaria physiological parameters in agroforestry systems. **Ciência Rural**, 47, 1-5, 2017. doi: 10.1590/0103-8478cr20160150.

SANTOS, O. S. H., AVELLAR, F. C., ALVES, M., TRINDADE, R. C., MENEZES, M. B., FERREIRA, M. C., FRANÇA, G. S., CORDEIRO, J., SOBREIRA, F. G., YOSHIDA, I. M., MOURA, P. M., BAPTISTA, M. B., SCOTTI, M. R. Understanding the environmental impact of a mine dam rupture in Brazil: Prospects for remediation. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, n. 2, p. 439-449, 2019.

SANTOS, P. M.; PRIMAVESI, O. M.; BERNARDI, A.C.C. **Adubação de pastagens**, 2010.

SEGURA, F. R.; NUNES, E. A.; PANIZ, F. P.; PAULELLI, A. C. C.; RODRIGUES, G. B.; BRAGA, G. U. L.; PEDREIRA-FILHO, W. R.; BARBOSA-JÚNIOR, F.; CERCHIARO, G.; FERREIRA-SILVA, F. B. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environ Pollut**, v. 218, p. 813-825, 2016.

SHARMA, J. K., KUMAR, N., SINGH, N. P., SANTAL, A. R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1076876, 2023.

SILVA, A. D. A., LANA, Â. M., LANA, R. M., COSTA, A. M. Fertilização com dejetos suínos: influência nas características bromatológicas da Brachiaria decumbens e alterações no solo. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 254-265, 2015.

SILVA, D. R., SCHAEFER, C. E. G. R., KUKI, K. N., SANTOS, M. F. S., HERINGER, G., DA SILVA, L. C. Why is Brachiaria decumbens Stapf. a common species in the mining tailings of the Fundão dam in Minas Gerais, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 52, p. 79168-79183, 2022.

SILVA, F. C.; SILVA, C. A.; BERGAMASCO, A. F.; RAMALHO, A. L. Disponibilidade de micronutrientes em cinco solos em função do tempo de incubação de um composto de lixo. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.26, n.1, p.224-234, jan./abr. 2006

SILVA, J. C. J., MATOS, J. M., DIVINO, A. C., FERREIRA, T. P., CIMINELLI, V. S. T. Determinação de metais pesados em amostras de sedimentos superficiais da bacia do rio São Francisco por espectrometria de massas com fonte de plasma acoplada indutivamente após decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas. **Eclética Química**, v. 39, p. 22-34, 2014.

SILVA, J. G., GOMES, M. P., PEREIRA, E. G., BICALHO, E. M., GARCIA, Q. S. Initial Growth of Peltophorum dubium Is Affected by Nitrogen Source and Manganese Concentration. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 1, p. 201-211, 2022.

SILVA, L. C. S., MARINHO, D. Y., SILVA FILHO, C. M. D., SILVA, E. C. S., ESPINOSA, J. W. M. Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. **Anais do IX SIMPROD**, 2017.

SILVA, M. L. S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 527-535, 2007.

SILVA, P. I. T., MARTINS, A. M., GOUVEA, E. G., PESSOA-FILHO, M. FERREIRA M. E. Development and validation of microsatellite markers for Brachiaria ruziziensis obtained by partial genome assembly of illumine single end reads. **BioMed Central Genomics**, 14, 1-9, 2013.

SILVA, T. R., DE MELLO PRADO, R., DAVALO, M. J., SILVA, M. S., MONTES, R. M., BORGES, B. M. M. N. Manganês no crescimento e na produção de massa seca de capim-braquiária cultivado em Latossolo Vermelho distrófico. **Científica**, v. 41, n. 1, p. 94-98, 2013.

SILVA, Y. J. A. B. D., NASCIMENTO, C. W. A. D., BIONDI, C. M., PRESTON, W. Comparação de métodos de digestão para metais pesados em fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 650-655, 2014.

SINGH, H. P., MAHAJAN, P., KAUR, S., BATISH, D. R., KOHLI, R. K. Chromium toxicity and tolerance in plants. **Environmental Chemistry Letters**, 11 (3):229–54, 2013. doi: 10.1007/s10311-013-0407-5.

SOARES, R., ESCALEIRA, V., MONTEIRO, M. I. C., PONTES, F. V. M., SANTELLI, R. E., BERNARDI, A. C. D. C. Uso de ICP OES e titrimetria para a determinação de cálcio, magnésio e alumínio em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1553-1559, 2010.

SOUZA, E. A. D., MORAES, J. C. D., AMARAL, J. L. D., LIBERATO, R. D., BONELLI, E. A., LIMA, L. R. Efeito da aplicação de silicato de cálcio em *Brachiaria rizantha cv. Marandu* sobre a população de ninfas do percevejo castanho das raízes *Scaptocoris carvalhoi* Becker, 1967, características químicas do solo, planta e produção de matéria seca. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1518-1526, 2009.

SPAZIANI, M., DE OLIVEIRA, P. V., CADORE, S., DE OLIVEIRA, E., PRESTES, A. P. L. Determinação de alguns constituintes inorgânicos em amostras de vinhos por espectrometria atômica: ICP OES e ETAAS. **CEP**, v. 5508, p. 900, 2006.

SRIVASTAVA, A. K., SHANKAR, A., NALINI CHANDRAN, A. K., SHARMA, M., JUNG, K.H., SUPRASANNA, P., PANDEY, G. K. Emerging concepts of potassium homeostasis in plants. **Journal of Experimental Botany**, 71 (2):608–19, 2020. doi: 10.1093/jxb/erz458.

STUMPF, L., PAULETTO, E. A., COSTA DE-CASTRO, R., SPINELLI-PINTO, L. F., FONTANA-FERNANDES, F., STUMPF DA-SILVA, T. NUNES, M. R., Capability of grass in recovery of a degraded area after coal mining. **Agrociencia**, v. 48, n. 5, p. 477-487, 2014.

SUBBARAO, G. V. SEARCHINGER T. D. A “more ammonium solution” to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 118, 1-5, No.22e2107576118, 2021. doi.org/10.1073/pnas.2107576118.

TAKASE, I., PEREIRA, H. B., LUNA, A. S., GRINBERG, P., CAMPOS, R. C. D. A geração química de vapor em espectrometria atômica. **Química Nova**, v. 25, p. 1132-1144, 2002.

TAKUWA, D. T.; SAWULA, G.; WIBETOE, G.; LUND, W. Determination of Cobalt, Nickel and Copper in Flowers, Leaves, Steam and Roots of Plants Using Ultrasonic Slurry Sampling Electrothermal Atomic. **Absorption Spectrometry, Analytica Chimica Acta**,12, 849-854, 1997.

TAVARES, S. D. L., MELO, A. D. S., DE ANDRADE, A. G., ROSSI, C. Q., CAPECHE, C. L., BALIEIRO, F. D. C., DONAGEMMA, G. K., CHAER, G. M., POLIDORO, J. C., DE MACEDO, J. R., PRADO, R. B., FERRAZ, R. P. D., PIMENTA, T. S. **Curso de recuperação de áreas degradadas:** a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação, 2008.

TAYLOR, A.; BRANCH, S.; HALLS, D. J.; OWEN, L. M. W.; WHITE, M. Atomic Spectrometry Update-Clinical and Biological Materials, Foods and Beverages. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**,15, 451-487, 2000.

THE, S. V., SNYDER, R., TEGEDER M. Targeting nitrogen metabolism and transport processes to improve plant nitrogen efficiency. **Frontiers in Plant Science**, 11, 1-22, 2021. Article 628366. doi: 10.3389/fpls.2020.628366.

TOLAY, I. The impact of different Zinc (Zn) levels on growth and nutrient uptake of Basil (Ocimum basilicum L.) grown under salinity stress. **Plos one**, 16, 1-12, 2021. e0246493. doi: 10.1371/journal.pone.0246493.

TONG, Y., RENGEL, Z. GRAHAM R. Interactions between nitrogen and manganese nutrition of barley genotypes differing in manganese efficiency. **Annals of Botany**, 79, 53-58, 1997. doi.org/10.1006/anbo.1996.0302.

TORRES, A. M., MORTON, C. M. Molecular and morphological phylogenetic analysis of Brachiaria and Urochloa (Poaceae). **Molecular Phylogenetics and Evolution**, 37, 36-44, 2005. doi: 10.1016/j.ympev.2005.06.003.

TÓTOLA, M. R., CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 195-276, 2002.

USEPA - United State Environment Protection Agency. SW-846. Test Methods for Evaluating Solid Waste, **Physical Chemical Methods**, 1995.

VAZ, F. A. S., SILVA, P. A., PASSOS, L. P., HELLER, M., MICKE, G. A., COSTA, A. C. O., OLIVEIRA, M. A. L. Optimisation of a capillary zone electrophoresis methodology for simultaneous analysis of organic aliphatic acids in extracts of Brachiaria brizantha. **Phytochemical Analysis**, 23(6), 569-575, 2012.

VIEIRA, E. A.; GALVÃO, F. C. A.; BARROS, A. L. Influence of water limitation on the competitive interaction between two Cerrado species and the invasive grass Brachiaria brizantha cv. Piatã. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 135, p. 206-214, 2019.

VIEIRA, M. G. **Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO**. 2008. Dissertação de Mestrado (Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2008.

VOROPAEVA, N.; KARPACHEV, V.; VARLAMOV, V.; FIGOVSKY, O. Influence of improved (nano) systems on cultivated corn growth, development and yield. International Letters of Chemistry. **Physics and Astronomy**, v. 9, p. 1-7, 2014.

WALLACE, A., MUELLER R. T. Calcium uptake and distribution in plants. **Journal of Plant Nutrition**, 2, 247-256, 1980. doi.org/10.1080/01904168009362774.

WANG, L., JI, B., HU, Y., LIU, R., SUN, W. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. **Chemosphere**, 184, 594-600, 2017.

WERNER, J. C.; PAULINO, V. T.; CANTARELLA, H. Forrageiras. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Campinas: Instituto Agronômico,** p. 263273 (Boletim técnico, 100), 1996.

XAVIER, D. F., CARVALHO, M. M., BOTREL, M. D. A., VILELA, D. **Características e potencialidades de pastagens de braquiárias para produção de leite**, 2002.

ZAGO, V**.** C**.** P**.**; DAS DORES, N**.** C**.**; WATTS, B. A. Strategy for phytomanagement in an area affected by iron ore dam rupture: A study case in Minas Gerais State, Brazil. **Environmental Pollution**, v. 249, p. 1029-1037, 2019.

ZINATO, N. L. **Comparação entre as características estruturais e mineralógicas de rejeito de minério de ferro em faixas ultrafinas provenientes de diferentes depósitos e rotas de beneficiamento**, 2016.

APÊNDICE A – PRODUÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

Trabalhos e Publicações no período de 2018 a 2023

REIS, P. R.C., SILVA, J. C.J., PASSOS, L. P. Determinação de Al, Cr, Cu e Zn em Amostras de Cana-De-Açúcar Usando Amostragem Direta de Suspensão e Detecção Por GF AAS. In: **19º ENQA - Encontro Nacional de Química Analítica e o 7º CIAQA - Congresso Iberoamericano de Química Analítica**, 2018, Caldas Novas/GO.

REIS, P. R.C., MARTINS, J. W., ALMEIDA, J. M., RESENDE, L. M., LOPES, M. M., SILVA, J. C.J. Pré-concentração de Ag por Extração em Ponto Nuvem (CPE) em Amostras de Minério e determinação por FAAS. In:**XXXII Encontro Regional da Sociedade Brasileira de Química** –XXXII ERSBQ-MG, 2018, Juiz de Fora

PASSOS, L. P., REIS, P. R. C., LIMA, L. C. R. S., SOBRINHO, F. S., SILVA, J. C. J. D. Comparative effects of ammonium and nitrate ions on growth and uptake of multiple elements of ruzigrass. **Journal of Plant Nutrition**, p. 1-15, 2023.

FREITAS, J. C. E., DE RESENDE, C. F., DE PAULA PIMENTA, M., FRATTINI, L. M., REIS, P. R. C., MIRANDA, J. B., DA SILVA, J. C. J., CÉSAR, D. E., NERY, F. C., PEIXOTO, P. H. P. Assessing the ecophysiological effects of iron mining tailings on velvet bean: implications for growth limitations based on mineral composition and physicochemical properties of tailings-soil substrates. **Brazilian Journal of Botany**, v. 46, n. 3, p. 715-729, 2023.