

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO
DA NATUREZA

Maria de Paula Pimenta

**Análises ecofisiológicas e nutricionais em plantas de Cabreúva (*Myroxylon peruiferum*
L.f.) cultivadas em diferentes proporções de rejeitos oriundos do rompimento da
barragem do Fundão**

Juiz de Fora

2023

Maria de Paula Pimenta

**Análises ecofisiológicas e nutricionais em plantas de Cabreúva (*Myroxylon peruiferum*
L.f.) cultivadas em diferentes proporções de rejeitos oriundos do rompimento da
barragem do Fundão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Conservação da Natureza. Área de concentração: Comportamento, Ecologia e Sistemática.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Pereira Peixoto

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)

Pimenta, Maria de Paula.

Análises ecofisiológicas e nutricionais em plantas de Cabreúva (*Myroxylon peruiferum* L.f.) cultivadas em diferentes proporções de rejeitos oriundos do rompimento da barragem do Fundão. / Maria de Paula Pimenta. -- 2023.

110 f.

Orientador: Paulo Henrique Pereira Peixoto

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza, 2023.

1. Ecofisiologia vegetal. 2. Leguminosas. 3. Lama. 4. Cultivo. 5. Espécie nativa. I. Peixoto, Paulo Henrique Pereira, orient. II. Título.

Maria de Paula Pimenta

**Análises ecofisiológicas e nutricionais em plantas de Cabreúva (*Myroxylon peruiferum* L.f.)
cultivadas em diferentes proporções de rejeitos oriundos do rompimento da barragem do
Fundão.**

Dissertação
apresentada ao
Programa de Pós
Graduação em
Biodiversidade e
Conservação da
Natureza da Universidade
Federal de Juiz de
Fora como requisito
parcial à obtenção do
título de Mestre em
Biodiversidade e
Conservação da
Natureza. Área de
concentração: Comportamento,
Ecologia e
sistemática

Aprovada em 01 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Henrique Pereira Peixoto - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Maiana Reis Pimenta

Universidade Federal do Sergipe

Prof. Dr. Leandro Elias Morais

Instituto Federal de Minas Gerais

Juiz de Fora, 02/02/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Maiana Reis Pimenta, Usuário Externo**, em 01/03/2023, às 11:57, 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 **Paulo Henrique Pereira Peixoto, Professor(a)**, em 01/03/2023, às 11:57, 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 Elias Moraes, Usuário Externo**, em 01/03/2023, às 11:57, 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 **1136884** e o código CRC **F3A12BBE**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram, de alguma forma, para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho de pesquisa.

Ao Professor Doutor Paulo Henrique Pereira Peixoto, pela generosidade em permitir que fizesse parte desse projeto, abrindo as portas do Laboratório de Fisiologia Vegetal. Agradeço a sua orientação e compreensão em todos os momentos.

Aos colegas do Laboratório de Fisiologia Vegetal pelos auxílios, ensinamentos e paciência!

Ao Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Juiz de Fora, em especial aos docentes, discentes, técnicos e funcionários do Departamento de Botânica, pelo acolhimento, apoio e momentos compartilhados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza.

À Maiana, em especial, por todo o apoio e tempo destinado a me ajudar.

À Luana, sou grata por toda ajuda durante a realização deste trabalho.

Vocês foram fundamentais!

E, a todos que de alguma forma contribuíram nessa caminhada desafiadora e com muitas surpresas, o meu muito obrigada!

*“Em Minas, entre minérios e riquezas ecoava
sonho
Mas, em todas as manhãs foram invadidas até
sangrarem
Derramou-se lama de resíduo tóxico em
Pessoas, animais, matas, casas, esperanças.
Vidas enlameadas secou as Gerais
Expôs, em Minas
A Miséria Humana (...)”*

(Cecília de Paula)

RESUMO

Em 2015, aproximadamente 55 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro, provenientes do rompimento da barragem do Fundão, localizada na região do Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, formaram uma avalanche de rejeitos e água que percorreu um total de 663 km, causando destruição ao longo da bacia do Rio Doce. O mar de lama acarretou o maior desastre socioambiental do setor de mineração no país, com o soterramento da vegetação e o assoreamento de corpos hídricos, causando impactos em toda bacia do Rio Doce. O processo natural de sucessão ecológica nesse ecossistema dificilmente se restabelecerá sem a interferência antrópica. Nesse contexto, visando à preservação dos recursos naturais, ações para recuperar e conservar as áreas remanescentes de mata ciliar e a recuperação das áreas diretamente impactadas são necessárias. Do ponto de vista ecológico, uma das etapas fundamentais para o sucesso da recuperação ambiental é a identificação de espécies arbóreas nativas e capazes de se estabelecer e desenvolver nas áreas ripárias impactadas. Como parte dessa iniciativa, o presente estudo analisou as respostas ecofisiológicas, bioquímicas e a acumulação de elementos minerais nos tecidos de plantas de Cabreúva (*Myroxylon peruiferum* L.f.), assim como as condições físico-químicas dos substratos utilizados, antes e após o cultivo da espécie por 40 meses, em vasos contendo misturas de rejeitos / substrato fértil, nas proporções de 0, 25, 50, 75 e 100% de rejeitos da barragem de Fundão. O aporte de rejeitos nos substratos, principalmente ao nível de 100%, influenciou negativamente o desempenho da espécie. A baixa fertilidade e os teores reduzidos de matéria orgânica e, principalmente, as características físicas-estruturais dos substratos formados foram fatores limitantes ao estabelecimento vegetal. No entanto, mesmo assim, a espécie manteve suas estruturas foliares e as taxas fotossintéticas estáveis, desenvolvendo-se, no período observado, sobre baixos níveis de nutrientes, armazenando a maior parte do Fe e do Mn em suas raízes e caules. Essas características são importantes para a inclusão de plantas de Cabreúva em projetos de recuperação das áreas atingidas pelo desastre da barragem de minério de ferro do Fundão.

Palavras-chave: Ecofisiologia vegetal, leguminosas, lama, cultivo, espécie nativa.

ABSTRACT

In 2015, approximately 55 million m³ of iron ore tailings from the collapse of the Fundão dam, located in the Iron Quadrangle region of the State of Minas Gerais, southeastern Brazil, formed an avalanche of tailings and water that covered a total of 663 km, causing destruction along the Doce River. The sea of mud caused the biggest socio-environmental problem of the mining sector in the country, with the burial of vegetation and the silting up of water bodies, causing impacts in the entire Rio Doce basin. The natural process of ecological succession in this ecosystem is unlikely to be re-established without anthropic interference. In this context, aiming at the preservation of natural resources, actions to recover and conserve the remaining areas of riparian forest and the recovery of the areas directly impacted are necessary. From an ecological point of view, one of the fundamental steps for the success of environmental recovery is the identification of native tree species capable of establishing and developing in the impacted riparian areas. As part of this initiative, the present study analyzed the ecophysiological and biochemical responses and the accumulation of mineral elements in the tissues of Cabreúva (*Myroxylon peruiferum* L.f.) plants, as well as the physical and chemical conditions of the substrates used, before and after growing the species for 40 months in pots prepared from a mixture of tailings/fertile substrate, in the proportions of 0, 25, 50, 75 and 100% of tailings from the Fundão dam. The contribution of tailings in the substrates, especially at the 100% level, negatively influenced the performance of the species. The low fertility and reduced levels of organic matter, and especially the physical-structural characteristics of the substrates formed were limiting factors for plant establishment. However, even so, the species maintained its leaf structures and photosynthetic rates stable, developing, in the observed period, over low nutrient levels, storing most of the Fe and Mn in its roots and stems. These characteristics are important for the inclusion of Cabreúva plants in reclamation projects in areas affected by the Fundão iron ore dam disaster.

Keywords: Plant ecophysiology, leguminous plants, mud, cultivation, native species.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Introdução Geral

Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio Doce. A) O Estado de Minas Gerais evidenciando as diferentes macrorregiões. Em verde-escuro, a região do Vale do Rio Doce, onde se encontram as nascentes do Rio do Doce. B) A Bacia Hidrográfica do Rio Doce, localizada nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo13

Figura 2. O Mapa da destruição Causada pelo rompimento da barragem do Fundão14

Figura 3. Imagens de satélite das barragens da Samarco (A) e do povoado de Bento Rodrigues (B)15

Capítulo I

Figura 1. Fenótipo de plantas de Cabreúva após 29 meses de cultivo nos diferentes tratamentos (13 de dezembro de 2019) na presença de 0, 25, 50, 75 e 100% de rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão.....45

Figura 2. Painel com parâmetros alométricos médios analisados em plântulas de *M. peruiferum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 26 e 40 meses de cultivo NF: Número de folhas compostas; NFolíolos: Número de folíolos; Espessura do folíolo (mm); Diâmetro de caule (mm); Altura (cm) e Área foliar total (cm²). Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....46

Figura 3. Painel com parâmetros médios analisados em plântulas de *M. peruiferum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 21 e 29 meses de cultivo. A: Taxa de fotossíntese líquida; E: Transpiração; gs: Condutância Estomática; Ci: Concentração intercelular de CO₂. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....47

Figura 4. Painel com parâmetros médios analisados em plântulas de *M. peruiferum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 21 e 29 meses de cultivo. Ci/Ca: Razão entre a concentração interna e externa de CO₂; ETR: Taxa de transporte de elétrons; A/Ci: Eficiência instantânea de carboxilação; A/E: Eficiência instantânea do uso da água; A/g_s:

Eficiência intrínseca do uso da água. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....48

Figura 5. Teores médios de clorofila a (μg de Chl a/g de matéria fresca), clorofila b (μg de Chl b/g de matéria fresca), clorofilas totais e a razão entre clorofila a e b (chl a/chl b), analisados em plântulas de *M. peruiiferum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 29 meses de cultivo. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....49

Figura 6. Teores médios de carotenoides totais (μg de carotenoides totais/g de matéria fresca) e pigmento antocianina (em cianidina-3-glicosídeo/L do extrato), analisados em plântulas de *M. peruiiferum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 29 meses de cultivo. Os teores de carotenoides totais foram divididos por 10 para a representação gráfica. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....50

Figura 7. Teores médios de carboidratos solúveis totais (CST; mg de CST/g de matéria fresca) e amido (mg de amido/g de matéria fresca), em plântulas de *M. peruiiferum* submetidas a proporções crescentes de rejeitos de minério de ferro, após 29 meses de cultivo. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....51

Capítulo II

Figura 1. Médias dos valores de pH em H_2O e de Acidez potencial - H^+Al ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) em substratos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, cultivados por 40 meses com *M. peruiiferum*. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....91

Figura 2. Médias dos teores de nitrogênio (N; dag/Kg), fósforo (P; mg/dm^3), potássio (K; mg/dm^3), cálcio (Ca^{2+} ; cmol/dm^3) e magnésio (Mg^{2+} ; mg/dm^3) em substratos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, cultivados por 40 meses com *M. peruiiferum*. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....92

Figura 3. Médias dos teores de matéria orgânica (M.O.; dag/Kg), da capacidade de troca catiônica (CTC; $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$), da soma de bases (SB; $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) e do fósforo remanescentes

(P-rem; mg/L) em substratos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, cultivados por 40 meses com *M. peruiiferum*. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....93

Figura 4. Médias dos teores (em mg/dm³) de cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe) em substratos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, cultivados por 40 meses com *M. peruiiferum*. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....94

Figura 5. Painel com *boxplots* das variáveis estudadas nos substratos em pré- e pós-cultivo por 40 meses com *M. peruiiferum* nos diferentes tratamentos (Controle, 25%, 50%, 75% e 100% de rejeitos de minério de ferro). (A: pH; B: Acidez Potencial; C: Fósforo; D: Potássio; E: Cálcio; F: Magnésio; G: Soma de Bases; H: Capacidade de Troca Catiônica; I: Matéria Orgânica; J: Fósforo Remanescente; K: Cobre; L: Zinco; M: Manganês; N: Ferro). Os valores nos *boxplots* representam os níveis de significância e os *whiskers* representam o erro padrão.....97

Figura 6. Médias dos teores (em dag Kg⁻¹) de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) em raízes, caules e folhas de plântulas de *M. peruiiferum* submetidas a proporções crescentes de rejeitos de minério de ferro, após 40 meses de cultivo. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....98

Figura 7. Médias dos teores (em dag Kg⁻¹) de zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn) em raízes, caules e folhas de plântulas de *M. peruiiferum* submetidas a proporções crescentes de rejeitos de minério de ferro, após 40 meses de cultivo. Os teores de ferro foram divididos por 10 para a representação gráfica. Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.....99

Figura 8. Painel demonstrando as concentrações de cada elemento em tecidos de plantas de *M. peruiiferum* nos diferentes tratamentos (A: Nitrogênio; B: Fósforo; C: Potássio; D: Cálcio; E: Magnésio; F: Cobre; G: Ferro; H: Zinco; I: Manganês). As linhas apresentam a ligação entre as médias dos elementos nos tratamentos (0%, 25%, 50%, 75% e 100% de rejeitos de minério de ferro) em cada parte da planta (raiz, caule e folha) e os *whiskers* representam o intervalo de confiança de 95%.....101

LISTA DE TABELAS

Capítulo I

Tabela 1. Constituição dos tratamentos contendo diferentes proporções de substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão.....44

Capítulo II

Tabela 1. Constituição dos tratamentos contendo diferentes proporções de substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão.....88

Tabela 2. Resultados referentes às análises de rotina, textura, porosidade e de elementos minerais em substratos preparados com diferentes proporções de um substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão em condições de pré-plantio.....89

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1 A MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS	12
1.2 O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO FUNDÃO	13
1.3 DANOS SOCIOAMBIENTAIS E RECUPERAÇÃO FLORESTAL	15
1.4 ESPÉCIE ARBÓREA	17
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19
2 CAPÍTULO I - Análises ecofisiológicas e bioquímicas de <i>Myroxylon peruiferum</i> L.f submetidas à rejeitos de minério de ferro oriundos do rompimento da barragem do Fundão.....	22
3 CAPÍTULO II - Análise nutricional de <i>Myroxylon peruiferum</i> L.f submetida a rejeitos oriundos do rompimento de uma barragem de rejeito de minério de ferro.....	56
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106

1 INTRODUÇÃO GERAL

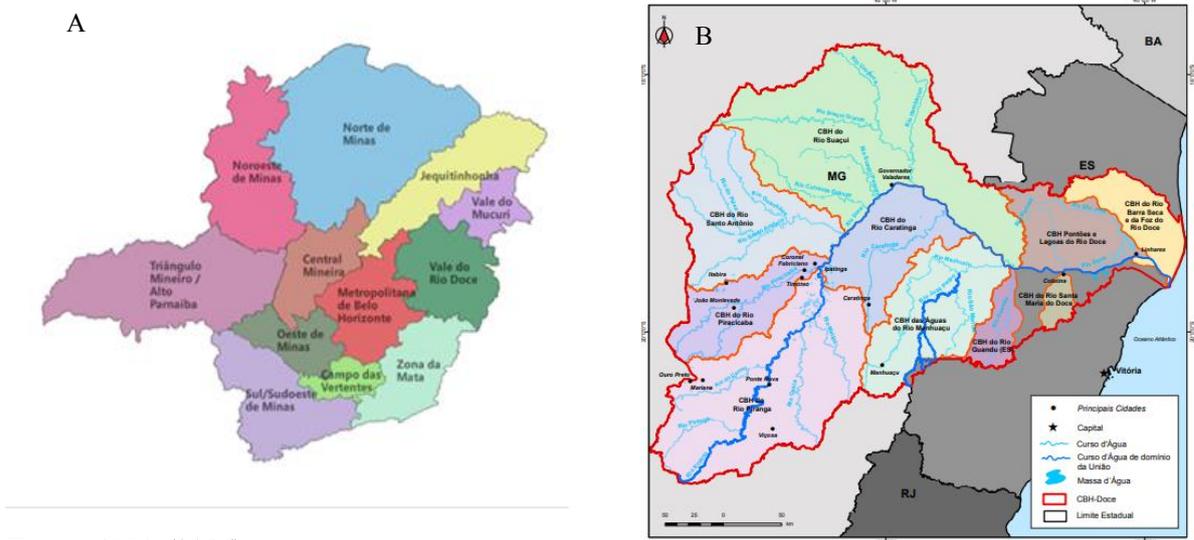
1.1 A MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS

O estado de Minas Gerais (Figura 1A) é marcado por uma ocupação heterogênea, relacionada especialmente à exploração agrícola e à mineração. A mineração é histórica em Minas Gerais, sendo responsável pelo processo inicial de ocupação e urbanização de vilas e cidades do estado, causando, em contrapartida, degradação ambiental pela natureza da atividade. No início no século XVII, utilizando mão de obra escrava, a atividade de mineração era realizada em pequena escala, com elevado resultado econômico. Pela lavagem dos minerais rochosos, a manipulação dos sedimentos do fundo dos rios já produzia resíduos de lama, que eram carregados pelo leito dos rios, mas sem grandes impactos à época (SOUZA; REIS, 2006). Entretanto, com o passar do tempo e com o aumento da produtividade e retorno econômico, a atividade se desenvolveu, utilizando novas técnicas de extração dos minerais de interesse, o que aumentou a produção, mas conseqüentemente, seus impactos ao meio ambiente. De acordo com Schaefer *et al.* (2015):

[...] Minerar é gerar passivos, o que é incontornável, e cercado de riscos. Sedimentos decorrentes da atividade minerária já se acumulavam nos rios e montanhas de Minas desde o final dos seiscentos, generalizando nos setecentos. Foi o Rio do Carmo, em suas nascentes em Mariana, o primeiro grande garimpo de ouro do Brasil. Parece um destino recorrente e previsível que tenha sido na primeira bacia explorada que tenha ocorrido o maior desastre conhecido. Não é invenção moderna. (SCHAEFER *et al.*, 2015, p. 107).

O Rio do Carmo, que apresenta como um dos tributários o Rio Gualaxo do Norte, é um dos principais afluentes do Rio Doce, fazendo parte da sua Bacia Hidrográfica, que apresenta extensão territorial de cerca de 83.400 km², dos quais 86% pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante ao Estado do Espírito Santo (EUCLYDES, 2007). A Bacia do Rio Doce (Figura 1B) abriga o maior complexo siderúrgico da América Latina, incluindo a Companhia Vale (Vale S.A.) (EUCLYDES, 2007). A Vale S.A. é uma mineradora multinacional brasileira, que, em conjunto com a multinacional anglo-australiana de mineração BHP Billiton, é proprietária da Samarco S.A., empresa de mineração brasileira com unidades operacionais localizadas na bacia do Doce em Minas Gerais (extração e beneficiamento) e no Espírito Santo (porto de exportação). Devido às atividades industriais e de extração do minério de ferro, a Samarco abriga diversas barragens utilizadas para deposição de rejeitos (ANA, 2016).

Figura 1 – Bacia Hidrográfica do Rio Doce. A) O Estado de Minas Gerais evidenciando as diferentes macrorregiões. Em verde-escuro, a região do Vale do Rio Doce, onde se encontram as nascentes do Rio do Doce. B) A Bacia Hidrográfica do Rio Doce, localizada nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo.



Fonte: ANA (2016).

1.2 O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO FUNDÃO

O território de Mariana, em Minas Gerais, abriga o Complexo Industrial de Germano, localizado na Bacia do Rio Gualaxo do Norte, afluente do Rio do Carmo, que é um importante tributário do Rio Doce (Figura 2). No complexo, são realizadas operações de extração do minério de ferro sob controle da empresa Samarco (MPF, 2022).

No dia 5 de novembro de 2015, a barragem do Fundão, integrante do Complexo Industrial de Germano, localizada no subdistrito de Bento Rodrigues, colapsou causando o maior desastre socioambiental do país no setor da mineração.

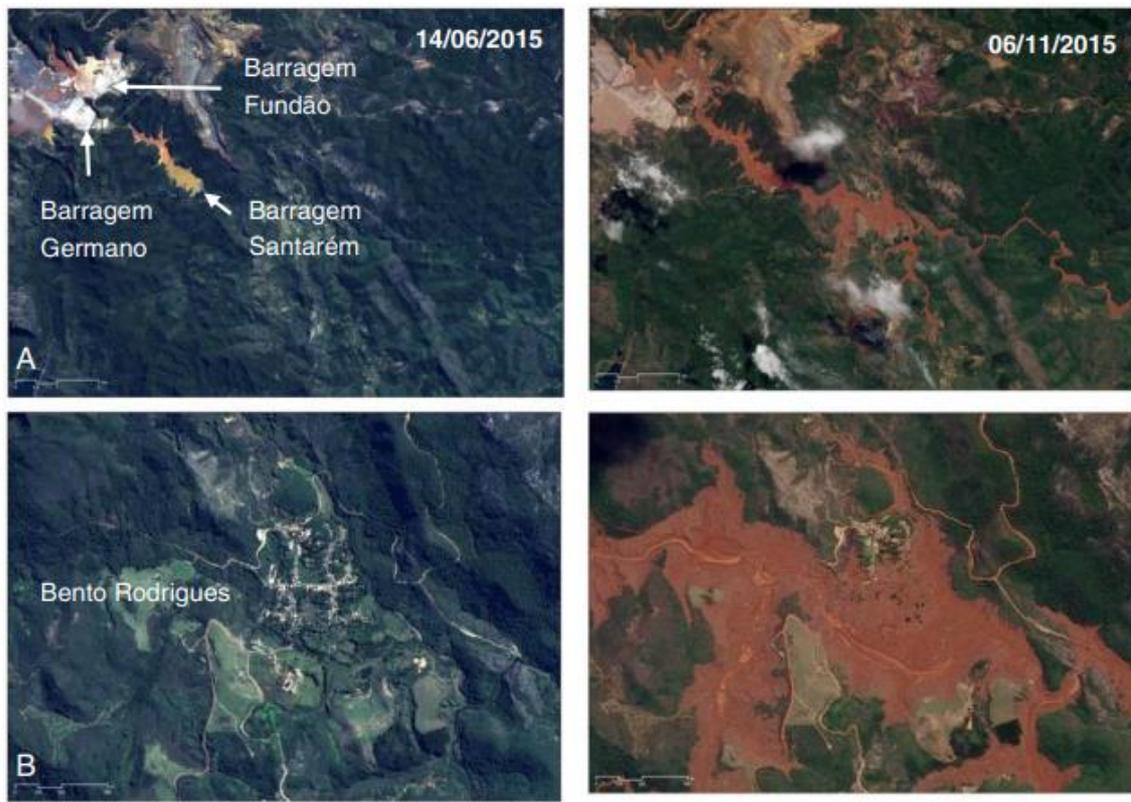
Figura 2 – O Mapa da destruição Causada pelo rompimento da barragem do Fundão.



Fonte: ANA (2016).

Um volume de aproximados 55 milhões de m³ de rejeitos, estocados no reservatório do Fundão, causou o galgamento da barragem de Santarém, resultando na formação de uma avalanche de rejeitos e água, percorrendo, no total, 663 km de destruição ao longo do Rio Doce (MPF, 2022; PINTO-COELHO, 2015). Inicialmente, a onda de lama atingiu o subdistrito de Bento Rodrigues, em Mariana, destruindo-o parcialmente pela força da lama, condição evidenciada na Figura 3. O caminho da destruição, ilustrado pelas Figuras 2 e 3, seguiu pelo Córrego Santarém até o Rio Gualaxo do Norte, encontrando o Rio do Carmo e, posteriormente, o Rio Doce, desaguando, após 16 dias do colapso, no Oceano Atlântico, espalhando lama por uma extensão superior a 10 km no litoral do Espírito Santo (FELIPPE *et al.*, 2016). Após cerca de 89 km do local de rompimento, conforme descrito por Pinto-Coelho (2015) “(...) a lama e os detritos vegetais foram parcialmente retidos pela barragem da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (UHE Candonga), em Santa Cruz do Escalvado, MG, local onde, aproximadamente, 10 milhões de m³ de rejeitos da barragem de Fundão ficaram retidos”.

Figura 3 – Imagens de satélite das barragens da Samarco (A) e do povoado de Bento Rodrigues (B).



Fonte: ANA (2016).

1.3 DANOS SOCIOAMBIENTAIS E RECUPERAÇÃO FLORESTAL

O mar de lama ceifou 19 vidas e desalojou diversas famílias, acarretando problemas sociais e de saúde para a população atingida, além de ocasionar impactos sobre a água e corpos hídricos (turbidez elevada, impactos ecotoxicológicos em diversas nascentes, destruição de calhas e assoreamento), sobre o solo e sua vegetação (erosão, compactação, contaminação, queda da fertilidade, soterramento da vegetação, destruição de matas ciliares), sobre a biodiversidade (ictiofauna, herpetofauna, avifauna e mastofauna). O rompimento de Fundão também afetou áreas de preservação permanente e Parques Estaduais e Nacionais (SILVA *et al.*, 2022; MPF, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

A Bacia do Rio Doce, tem 98% (8.3400 km²) da sua área inserida no bioma da Mata Atlântica (Fernandes *et al.*, 2016). O bioma da Mata Atlântica, por sua rica biodiversidade é uma prioridade da conservação global. Com o desastre, cerca de 1.580 ha de cobertura vegetal foram atingidos, correspondendo a aproximadamente 510 ha de Mata Atlântica e 375 ha de cobertura florestal ciliar, ou seja, a Mata Atlântica ao longo do curso do rio (SEDRU, 2016).

Desde o rompimento até a foz do Rio Doce, ambientes foram literalmente varridos e soterrados pela lama (Schaefer et al., 2015).

Devido à magnitude do desastre e à complexidade das interações ecológicas afetadas, a proporção dos danos socioambientais causados ainda é incalculável, principalmente em longo prazo. A maior preocupação diz respeito às características químicas e físicas dos rejeitos da barragem do Fundão e sua interação prolongada com os solos, corpos hídricos e a vida humana.

Objetivando pautar as ações de mitigação ambiental bem como conhecer seu potencial tóxico, relatórios e trabalhos realizados após o desastre analisaram o rejeito depositado entre a barragem do Fundão e a UHE Candonga, trecho pelo qual a passagem da lama foi mais violenta. De modo geral, o rejeito da barragem de Fundão se apresentou homogêneo quanto à constituição química, física e granulométrica. O material, considerado estéril para a recuperação vegetal, apresenta baixos teores de nutrientes e matéria orgânica, textura franco-arenosa, composta por partículas classificadas como areia fina e silte, que representam 90% da fração de terra fina (< 2mm) e o restante composto pela fração de argila, limitando a capacidade de troca de cátions desse material.

Devido à diminuição dos espaços porosos, essa composição granulométrica favorece a compactação do solo e o adensamento das partículas, prejudicando o desenvolvimento de raízes e a percolação da água (EMBRAPA, 2015; PINTO-COELHO, 2015; MILANEZ *et al.*, 2015; SCHAEFER *et al.*, 2015). Rico em óxidos de ferro e silício, constatou-se também no rejeito, a presença de metais como Arsênio (As), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Chumbo (Pb), Manganês (Mn), Cromo (Cr), Cobalto (Co) e Níquel (Ni), que, entretanto, não atingiram concentrações potencialmente tóxicas (EMBRAPA, 2015). Autores também trabalham com a hipótese de que o impacto da onda de lama revolveu o fundo dos rios, colocando novamente em suspensão sedimentos que, considerando o histórico de uso e relatos na literatura, já continham metais pesados (IBAMA, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Considerando a devastação ambiental ocasionada no solo e na vegetação, o trecho entre a barragem do Fundão e a UHE Candonga foi o mais afetado. A vegetação nativa, as regiões dos tabuleiros, as matas ciliares com árvores centenárias, os cultivos agrícolas da população ribeirinha, bem como a faixa fértil dos solos foram literalmente varridos e/ou soterrados pela lama. O processo natural de sucessão ecológica nesse ecossistema foi brutalmente interrompido e dificilmente se restabelecerá sem a interferência antrópica visando mitigar os efeitos do desastre (EMBRAPA, 2015; IBAMA, 2020; PINTO-COELHO, 2015).

Após o rompimento da barragem de Fundão, por meio da assinatura de um Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC), o Ministério Público Federal determinou à

Samarco a tomada de ações visando, além de outras medidas, a reparação dos danos ambientais e morais coletivos causados aos Estados por conta do rompimento das barragens de Fundão e de Santarém, prevendo, também, que a recuperação deveria ser realizada por uma organização autônoma dedicada às atividades de reparação e compensação dos impactos (MPF, 2022). Sendo assim, foi criada a Fundação Renova, responsável por conduzir as ações de restauração socioambiental de toda a área impactada. Todavia, de acordo com as informações apresentadas no Relatório Quadrimestral de Monitoramento Consolidado, entregue ao MPF em julho de 2019, pela Ramboll Group S.A, corporação responsável pelo monitoramento independente das ações de reparação, os processos estabelecidos e conduzidos pela Fundação Renova para a Restauração Florestal foram considerados inconclusos e insatisfatórios (RAMBOLL, 2019).

Para aumentar as chances de reabilitação gradual dos ecossistemas degradados e dos seus processos ecológicos, a recomposição e a restauração florestal exigem o emprego de técnicas adequadas de manejo vegetal, de avaliação das condições do local e do objetivo final do projeto. Nesse contexto, são necessárias ações que possam contribuir para recuperar e conservar as áreas remanescentes de mata ciliar e a recuperação das áreas degradadas, entre outras, visando à preservação dos recursos naturais. Sob o ponto de vista ecológico, uma das etapas fundamentais para o sucesso do manejo da recuperação é a identificação de espécies nativas capazes de se estabelecer e desenvolver em áreas degradadas (CORRÊA, 1998; CORRÊA; CARDOSO, 1998).

Além de aportarem nutrientes e matéria orgânica melhorando a fertilidade e a agregação das partículas do solo, as espécies arbóreas reduzem o intemperismo e a erosão ao recobrir o solo com material vegetal (SOUZA, 2012). Nesse sentido, métodos de recuperação de áreas degradadas comumente utilizam-se do plantio de espécies arbóreas, como forma de recuperação e cobertura rápida de áreas impactadas (VIEIRA; REIS, 2003).

1.4 A ESPÉCIE ARBÓREA

Estudos envolvendo a avaliação do desenvolvimento de espécies arbóreas para a recomposição florestal de uma determinada área podem auxiliar em projetos de recuperação das áreas afetadas por rejeitos de mineração. Nesse seguimento, Silva *et al.* (2016) concluíram que *Myroxylon peruiferum* L.f. destaca-se entre as leguminosas arbóreas pela altura e diâmetro médio dos caules, bem como pela rápida cobertura do solo pela copa, se mostrando potencialmente favorável para a restauração de áreas degradadas por mineração de bauxita. Schwarcz *et al.* (2018), avaliando a diversidade genética e a estrutura populacional de espécies arbóreas em remanescentes naturais e áreas de restauração florestal, constataram que *M.*

peruiferum foi eficaz na conservação da biodiversidade, uma vez que manteve semelhante os níveis de diversidade genética entre as populações restauradas e aquelas de remanescentes naturais.

De acordo com o Sistema de Classificação de Cronquist, *Myroxylon peruiferum* L.f pertence à família Fabaceae (Leguminosae: Papilionoideae), sendo popularmente conhecida por Cabreúva, Cabreúva-vermelha, bálsamo, pau-de-incenso, pau-vermelho. As árvores dessa espécie são decíduas, perdendo uma notável parte da sua folhagem na estação seca. Podem atingir dimensões até 35 m de altura e 150 cm de diâmetro do tronco, apresentando casca moderadamente espessa e lisa. As folhas são compostas pinadas, apresentando 9-13 folíolos glabros, de 5-10 cm de comprimento. As inflorescências são corimbiformes, terminais ou axilares e pendentes. As flores são quase sésseis, com pétalas amarelo-brancas, florescendo durante os meses de julho-setembro. Os frutos são secos, indeiscentes, alados, monospermos, glandulosos, amarelados a marrons na maturação. As sementes são elipsoides a reniformes, achatadas, sulcadas-enrugadas, medindo de 10-13x7-8,5 mm (CARVALHO, 2006; LORENZI, 2008).

A madeira é de alta qualidade, com resistência ao apodrecimento, e de grande versatilidade, sendo amplamente empregada na construção civil. De seu tronco é exsudado a oleoresina (bálsamo), com propriedades medicinais e historicamente utilizada pelos povos indígenas da América Central e América do Sul no tratamento de distúrbios do sistema respiratório, reumatismo, feridas, cefaleia e abscessos (CARTAXO; SOUZA; ALBUQUERQUE, 2010; CUSTÓDIO; VEIGA-JUNIOR, 2012; LIMA; MANSANO, 2011). A espécie apresenta ocorrência natural no Brasil, no Bioma Mata Atlântica, comportando-se como espécie secundária e de clímax e como espécie subcaducifólia em sucessão ecológica (CARVALHO, 2006).

Diante do exposto, como parte da iniciativa para contribuir com informações sobre uma espécie nativa possivelmente capaz de se estabelecer e se desenvolver nas áreas afetadas pelo maior desastre socioambiental no setor de mineração brasileiro, o presente estudo foi realizado (dividido em dois capítulos), com objetivos de analisar as respostas de plantas de Cabreúva (*Myroxylon peruiferum* L.f.) cultivadas por 40 meses sobre diferentes concentrações de rejeitos de minério de ferro provenientes do rompimento da barragem de Fundão. No capítulo 1, analisamos as respostas ecofisiológicas e bioquímicas da espécie aos 29 e 40 meses de cultivo e, no capítulo 2, verificou-se a acumulação de elementos minerais nos tecidos das raízes, caules e folhas de plântulas de Cabreúva, assim como as condições físico-químicas e de fertilidade dos diferentes substratos utilizados antes e após o cultivo da espécie.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana/MG.** Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil—Informe 2015. Brasília - DF, 50p., 2016.
- CARTAXO, S. L.; SOUZA, M. M.; ALBUQUERQUE, U. P. Medicinal plants with bioprospecting potential used in semi-arid northeastern Brazil. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 131, n. 2, p. 326-342, 2010.
- CARVALHO, P. E. R. Cabreúva-vermelha: *Myroxylon peruiferum*. In: FLORESTAS, E. (ed.). **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.
- CORRÊA, R. S. Degradação e recuperação de áreas no Distrito Federal. In: CORRÊA, R. S. e MELO FILHO, B. (eds.). **Ecologia e recuperação de áreas degradadas no Cerrado**. Brasília: Paralelo 15, 1998.
- CORRÊA, R. S.; CARDOSO, E. S. Espécies testadas na revegetação de áreas degradadas. In: CORRÊA, R. S. e MELO FILHO, B. (eds.). **Ecologia e recuperação de áreas degradadas no Cerrado**. Brasília: Paralelo 15, 1998.
- CUSTÓDIO, D. L.; VEIGA-JUNIOR, V. F. True and common balsams. **Brazilian Journal of Pharmacognosy**, v. 22, n. 6, p. 1372-1383, 2012.
- EMBRAPA. **Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG: Apoio ao plano de recuperação agropecuária.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2015.
- EUCLYDES, H. P. **Atualização dos estudos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Doce.** Atlas Digital das Águas de Minas, 2007. Disponível em http://www.atlasdasaguas.ufv.br/doce/resumo_doce.html. Acesso em fev. 2022.
- FELIPPE, M.; COSTA, A.; JÚNIOR, R.; MATOS, R.; JÚNIOR, A. P. M. Acabou-se o que era Doce: notas geográficas sobre a construção de um desastre ambiental. In: MILANEZ, B. e LOSEKANN, C. (eds.). **Desastre no vale do rio Doce - antecedentes, impactos e ações sobre a destruição**. Folio Digital, 2016.
- FERNANDES, G.W., GOULART, F.F., RANIERI, B.D., COELHO, M.S., DALES, K., BOESCHE, N., BUSTAMANTE, M., CARVALHO, F.A., CARVALHO, D.C., DIRZO, R., FERNANDES, S., GALETTI, P.M., MILLAN, V.E.G., MIELKE, C., RAMIREZ, J.L., NEVES, A., ROGASS, C., RIBEIRO, S.P., SCARIOT, A., & SOARES-FILHO, B., (2016). Deep into the mud: ecological and socioeconomic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, v. 14, p. 35– 45.
- IBAMA. **Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG.** Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2020. Disponível em <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2020/rompimento-da-barragem-de-fundao-documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg>. Acesso em jan. 2022.

LIMA, J. R.; MANSANO, V. F. A família Leguminosae na Serra de Baturité, Ceará, uma área de Floresta Atlântica no semiárido brasileiro. **Rodriguésia**, v. 62, n. 3, p. 563-613, 2011.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008.

MILANEZ, B., SANTOS, R. S. P., WANDERLEY, L. J. M., MANSUR, M. S., PINTO, R. G., GONÇALVES, R. J. A. F., & COELHO, T. P. (2015). PoEMAS: Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG). **Mimeo**. Disponível em <https://www.ufjf.br/poemas/files/2014/07/PoEMAS-2015-Antes-fosse-mais-leve-a-carga-vers%C3%A3o-final.pdf>. Acesso em jan 2020.

MPF. **Caso Samarco**. Ministério Público Federal, 2022. Disponível em <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/apresentacao>. Acesso em abr. 2022.

OLIVEIRA, L. L. F.; SANTOS, H. B.; THOMÉ, R. G.; CHEQUER, F. M. D. Efeitos tóxicos à saúde humana e ao ambiente causados pelo derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão. **Journal of Health and Biological Sciences**, v. 9, n. 1, p 1-17, 2021.

PINTO-COELHO, R. M. Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, v. 24, n. 1-2, p. 16-43, 2015.

RAMBOLL. **Relatório de Monitoramento Quadrimestral – Compilado de Dossiês de Questões Críticas Relatório Quadrimestral de Monitoramento Consolidado**. Ramboll Group A/S, 489 pp., 2019.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E.; SOUZA, C. M.; NETO, J. D.; FERNANDES FILHO, E. I.; DELPUPO, C. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, v. 24, n. 1/2, p. 104-135, 2015.

SCHWARCZ, K. D.; SILVESTRE, E. A.; DE CAMPOS, J. B.; SUJII, P. S.; GRANDO, C.; MACRINI, C. M. T.; SOUZA, A. P.; PINHEIRO, J. B.; BRANCALION, P. H. S.; RODRIGUES, R. R.; ZUCCHI, M. I. Shelter from the storm: Restored populations of the neotropical tree *Myroxylon peruiferum* are as genetically diverse as those from conserved remnants. **Forest Ecology and Management**, 410, p. 95-103, 2018.

SILVA, K. A.; MARTINS, V. S.; NETO, A. M.; DEMOLINARI, R. A.; LOPES, A. T. Restauração florestal de uma mina de bauxita: Avaliação do desenvolvimento das espécies arbóreas plantadas. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 309-319, 2016.

SILVA, F. L.; CUNHA-SANTINO, M. B.; FUSHITA, A. T.; MININEL, V. A. Relações entre saúde e ambiente: potenciais impactos decorrentes do rompimento de barragens de rejeitos – uma revisão da literatura nos casos de Mariana e Brumadinho, MG. **Desenvolvimento e Meio Ambiente UFPR**, v. 59, p. 94-109, 2022.

SOUZA, M. G. O. S. **Crescimento de espécies florestais em povoamentos puros e sua influência sobre atributos edáficos em Trajano de Moraes, RJ.** 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado em Produção vegetal). Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, RJ, 2012.

SOUZA, T. M. F.; REIS, L. Universidade Federal de Minas Gerais. **Técnicas mineratórias e escravidão nas Minas Gerais dos séculos XVIII e XIX: Uma análise comparativa introdutória,** 2006. Disponível em http://www.cedeplar.ufmg.br/seminarios/seminario_diamantina/2006/D06A018.pdf. Acesso em jan 2020.

VIEIRA, N. K.; REIS, A. O papel do banco de sementes na restauração de áreas degradadas. *In: Seminário Nacional – Degradação e Recuperação Ambiental - SOBRADE,* 2003. Disponível em <http://www.lpv.esalq.usp.br/sites/default/files/9%20-%20Referencia%20regeneracao%20de%20areas%20degradadas.pdf>. Acesso em fev 2020.

2 CAPÍTULO I

Manuscrito formatado para submissão na revista Integrated Environmental Assessment and Management

(Qualis A2; FI = 3.084)

Análises ecofisiológicas e bioquímicas de *Myroxylon peruiferum* L.f submetidas à rejeitos de minério de ferro oriundos do rompimento da barragem do Fundão

Maria de Paula Pimenta¹, Paulo Henrique Pereira Peixoto^{1,2}

1 - Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza: 2 -

Laboratório de Fisiologia Vegetal, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Juiz de Fora, 36036–900, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil

Autor de correspondência: Pimenta, M. P.

E-mail: mariappiment@gmail.com

RESUMO

Estudos envolvendo o emprego de espécies arbóreas nativas para a recuperação das áreas afetadas por rejeitos de mineração são necessários para a recuperação dos ambientes impactados pelo derramamento de 55 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro da Barragem do Fundão, ocorrido em 2015, no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil. O uso de espécies arbóreas em metodologias de recuperação de áreas degradadas visa à melhoria da fertilidade e estrutura física dos solos. Além disso, as respostas ecofisiológicas das plantas podem ser empregadas para analisar os efeitos de variações ambientais, naturais ou antrópicas sobre o seu comportamento, contribuindo para as tomadas de decisões e escolha de espécies mais adequadas para a utilização nas áreas afetadas pelo desastre. Nesse sentido, avaliamos algumas respostas ecofisiológicas, bioquímicas e morfológicas, entre elas: trocas gasosas, pigmentos fotossintéticos e teores de carboidratos solúveis totais e de amido em plantas da Cabreúva (*Myroxylon peruiferum* L.f), submetidas a cinco tratamentos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro e substratos férteis. Após 40 meses de cultivo, constatou-se que o tratamento com rejeitos puros afetou o desenvolvimento da Cabreúva com a diminuição da altura e diâmetro de caule das plantas, assim como o número e a espessura dos folíolos. A taxa fotossintética, a eficiência instantânea de carboxilação da Rubisco e a taxa de transporte de elétrons foram reduzidas após 21 meses de cultivo sobre rejeitos puros e recuperadas passados 29 meses. O cultivo sobre rejeitos puros alterou a relação Chl *a* / Chl *b* e resultou no aumento do teor de antocianinas nas plantas. Já os teores de amido não foram afetados pelos tratamentos, enquanto os de carboidratos solúveis totais apresentaram maior média sobre rejeitos puros.

Palavras-chave: Ecofisiologia vegetal, recuperação, barragem de rejeitos, cultivo, Cabreúva.

INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo a avaliação do desenvolvimento de espécies arbóreas para a recomposição florestal de uma determinada área podem auxiliar projetos de recuperação de áreas afetadas por rejeitos de mineração, como o ocorrido em 2015, com o rompimento da barragem do Fundão, no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil. O derramamento de aproximadamente de 55 milhões de m³ de rejeitos causou a perda de mais de 1200 hectares de vegetação no decorrer dos primeiros quilômetros do ponto de rompimento (Junior, 2018), pode ser considerado o maior desastre socioambiental do setor da mineração brasileira, tornando a recuperação desse ambiente impactado obrigatória e necessária.

A utilização de espécies arbóreas em estratégias de recuperação de áreas degradadas visa o aporte de nutrientes e matéria orgânica, contribuindo para a melhoria da fertilidade e composição física dos solos, reduzindo o intemperismo e o carreamento de partículas pelas chuvas (Vieira and Reis, 2003; Souza, 2012). Segundo Barbosa (2000), o insucesso em projetos de recuperação envolvendo reflorestamento com espécies arbóreas nativas se dá devido à falta de conhecimento biológico das espécies e do seu comportamento no ambiente de estudo.

Myroxylon peruiferum L.f. é uma espécie arbórea, com ocorrência natural no Brasil, no Bioma Mata Atlântica, comportando-se como espécie secundária e de clímax, e como espécie subcaducifólia em sucessão ecológica (Carvalho, 2006; Lorenzi, 2008). Conhecida popularmente como Cabreúva, destacou-se, entre leguminosas arbóreas, como potencialmente favorável para a restauração de áreas degradadas por mineração de bauxita (Silva et al., 2016; Lorenzi, 2008), indicando potencial para utilização em plantios em áreas impactadas por rejeitos de mineração de ferro.

Estudos das respostas ecofisiológicas podem ser empregados para se compreender os efeitos de variações ambientais, naturais ou antrópicas sobre o comportamento das espécies trabalhadas (Oliveira, 2007). Em condições adversas, as plantas conseguem modular diferentes

respostas morfofisiológicas de defesa, de modo a superar tais estresses, visando à retomada do metabolismo normal (Soares and Machado, 2007). Dessa maneira, o entendimento dessas respostas em espécies arbóreas, como a Cabreúva, poderá contribuir para a redução dos efeitos prejudiciais dos rejeitos de minérios de ferro nesse ambiente fortemente afetado.

O processo fotoquímico natural, de transformação de energia solar em energia química, para a utilização pelas plantas em seu desenvolvimento e manutenção da vida dos organismos pode ser avaliado pela análise do desempenho das trocas gasosas entre o mesófilo foliar e a atmosfera (Capelin et al., 2017), assim como pela avaliação de outros fatores diretamente associados, como o conteúdo de pigmentos fotossintéticos e a produção de fotoassimilados. Alterações nesses processos podem indicar condições desfavoráveis (de estresse) para as plantas e possíveis limitações podem ser desencadeadas por diversos processos metabólicos e fotoquímicos de resposta ao ambiente (Sharkey et al., 2007). Adicionalmente, a análise do crescimento das plantas é uma ferramenta complementar para o entendimento dos possíveis ajustes ocasionados por alterações morfofisiológicas em função das variáveis ambientais (Ferreira et al., 2006).

Este estudo foi proposto no intuito de se avaliar as respostas ecofisiológicas e bioquímicas de *M. peruiiferum*, em cultivo sobre diferentes concentrações de rejeitos de minério de ferro provenientes do rompimento da barragem de Fundão, visando contribuir para as tomadas de decisão e escolha de espécies mais adequadas para a recuperação das áreas afetadas por esse evento catastrófico na bacia do Rio Doce.

MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo, os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação com 50% de sombreamento (Sombrite[®]), localizada na Estação Experimental pertencente ao Instituto de Ciências Biológicas e ao Departamento de Botânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, *campus* de Juiz de Fora, MG (21° 46 'S, 43°22' W, 939,96 m de altitude).

Material vegetal

Sementes de *M. peruiferum*, obtidas comercialmente (Sementes Caiçara Ltda.), foram germinadas em tubetes (2,6 x 12 cm) contendo o substrato Carolina Soil®, composto por turfa de *Sphagnum*, vermiculita expandida, calcário dolomítico, gesso agrícola e vestígios de fertilizante NPK. Sessenta dias após a semeadura realizou-se o transplântio de 25 mudas uniformes, com altura aproximada de 15 cm, para vasos de 25 L, contendo uma mistura de substrato fértil e de rejeitos de minério de ferro da barragem do Fundão (Samarco S.A.), em diferentes proporções. Os vasos foram dispostos em bancadas, submetidos a irrigação diária por aspersão, mantidos em capacidade de campo em casa de vegetação.

Tratamentos

O substrato fértil utilizado constituiu-se de uma mistura de solo tipo latossolo (solo superficial com 20 cm de profundidade) e areia (1,5: 1 v/v). A este material foram adicionados o fertilizante químico, Forth Frutas®, composto por 12% N, 5% P₂O₅, 15% K₂O, 1% Ca, 1% Mg, 5% S, 0,2% Zn, 0,2% Fe, 0,05% Cu, 0,06% B, 0,08% Mn e 0,005% Mo (1 g fertilizante/L substrato), e um corretor de acidez, o AgroSilício®, composto por 36% CaO e 9% MgO (2 g corretor de acidez / L substrato).

As amostras de rejeitos foram coletadas em abril de 2017, um ano e cinco meses após o rompimento da barragem de minério, sendo provenientes de dragagens realizadas no fundo do reservatório da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (UHE), localizada a aproximados 77 km do local do colapso da barragem. O material foi transportado e armazenado por dois meses, em área protegida de chuvas na UFJF antes do preparo dos substratos e do transplântio das mudas.

Os diferentes tratamentos foram estabelecidos conforme a Tabela 1, a partir de proporções variáveis (por volume) de substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de mineração de Fundão.

Avaliações morfológicas

Avaliações morfológicas alométricas foram realizadas após 26 e 40 meses de desenvolvimento das plantas nos vasos, após o período de senescência anual das folhas da espécie. As medições ocorreram no ramo mais desenvolvido de cada planta, dos cinco tratamentos, nos quais se selecionou uma folha do segundo ou terceiro nó, a partir do ápice superior, com folíolos totalmente expandidos e em boas condições morfológicas e fitossanitárias (sem ataque de predadores ou deformações visíveis). A espessura (mm) dos folíolos, a altura das plantas (base até o meristema apical) e o diâmetro dos caules (medido na base do caule - 1 a 2 cm acima do solo) foram obtidos, respectivamente, com o auxílio de fita métrica e paquímetro digital. Na avaliação realizada após 40 meses do plantio, mensurou-se também a área foliar total (cm²). Para isso, utilizou-se o software Image Processing and Analysis In Java (IMAGEJ, 2014).

Trocas gasosas

As trocas gasosas foram mensuradas nos meses de abril e dezembro, após 21 e 29 meses de cultivo das plantas nos diferentes substratos, respectivamente. A taxa de fotossíntese líquida (A - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s - $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração intercelular de CO₂ (C_i - $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E - $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a taxa de transporte de elétrons (ETR - $\mu\text{mols elétrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram determinadas empregando-se um analisador portátil de gás a infravermelho LI-6400/XT (Li-Cor, Biosciences, Lincoln, NE, USA). Por cálculos de razão, foi possível encontrar as concentrações interna e externa de CO₂ (C_a), eficiência instantânea do uso de água (A/E - $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$), eficiência intrínseca do uso de água (A/g_s) e a

eficiência instantânea de carboxilação da Rubisco (A/C_i). A câmera foliar LI-6400-40 (Li-Cor) foi ajustada para trabalhar com uma taxa de fluxo de ar de $300 \mu\text{mol s}^{-1}$, concentração ambiente de CO_2 em $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, a uma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, sob irradiância de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. As medições foram realizadas no período da manhã, em uma folha do segundo ou terceiro nó, a partir do ápice superior, com folíolos totalmente expandidos e em bom estado fitossanitário, em cinco plantas dos cinco tratamentos testados.

Análises de pigmentos fotossintéticos e do teor de antocianinas

O conteúdo de pigmentos fotossintéticos e o teor de antocianinas foliares foram avaliados passados 29 meses de cultivo das plantas nos vasos. Para as análises laboratoriais dos teores de antocianina e de pigmentos fotossintéticos, folíolos completamente expandidos de folhas do segundo ou terceiro nó, a partir do ápice superior, foram coletados e armazenados em envelopes de alumínio, seguido de congelamento sob N_2 líquido, sendo imediatamente armazenados em freezers (-18°C) no Laboratório de Fisiologia Vegetal da UFJF. Imediatamente após a transferência para condições de laboratório, discos foliares de $0,5 \text{ cm}^2$ foram extraídos com o auxílio de um furador de rolhas. Antes da extração dos pigmentos, os discos foliares tiveram sua massa aferida para um conjunto de 20 discos. A concentração de antocianinas foi determinada segundo Mancinelli (1990), com modificações. Após a aferição das massas, os discos foram mantidos submersos em 5 mL de metanol-HCl 1% (99:1, v/v) por 24h, sob refrigeração. O extrato de pigmentos obtido foi filtrado e teve seu volume final completado para 10 mL com metanol-HCl 1%. Alíquotas foram submetidas à leitura em espectrofotômetro, a 530 nm (leitura específica de antocianinas) e 657 nm (visando eliminar a interferência dos pigmentos da fotossíntese). A equação $A_{530} - 0,25 A_{657}$ foi utilizada para a obtenção da concentração de antocianina, estimada segundo Giusti and Wrolstad (2001), baseando-se no conteúdo do pigmento cianidina-3-glicosídeo, que possui peso molecular de $449,2 \text{ g mol}^{-1}$ e

coeficiente de absorvidade molar de $26.900 \text{ L cm}^{-1} \text{ mg}^{-1}$. Os valores foram expressos com base na massa foliar ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ de matéria fresca).

As concentrações de clorofila a (Chl *a*), clorofila b (Chl *b*) e carotenoides totais (Carot) foram determinadas segundo Hiscox and Israelstam (1979). Os discos foliares foram pesados em conjunto de 20 discos e submergidos em tubos rosqueáveis contendo 7 mL de dimetilsulfóxido (DMSO), nos quais os pigmentos foram extraídos para o fluido por incubação a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 30 min. O extrato líquido foi transferido para um tubo de ensaio e teve seu volume completado para 10 mL com DMSO. Uma amostra de 2,5 mL do extrato líquido dos pigmentos foi transferida para uma cubeta e lida em espectrofotômetro em semiescuridão a 480 nm, 649 nm e 665 nm. Os conteúdos de clorofilas (a e b) e carotenóides foram calculados seguindo a equação de Wellburn (1994). Os valores foram expressos com base na massa foliar (mg g^{-1} de matéria fresca). Os teores de clorofilas totais (Chl [a+b]) e a relação clorofila a/clorofila b (Chl *a*/ Chl *b*) foram calculados após os resultados das análises laboratoriais.

Teores de carboidratos solúveis totais e amido

Teores de carboidratos solúveis totais (CST) e de amido foram determinados por espectrofotometria, utilizando o método proposto por Dubois et al. (1956) e modificado por Shimizu (2009), após 29 meses de cultivo das plantas em vasos. Para a determinação foram utilizadas 2 folhas adultas e em bom estado fitossanitário de 5 plantas de cada tratamento. As folhas, coletadas e armazenadas em caixa de isopor após imersão em N_2 líquido, foram transferidas imediatamente para o Laboratório de Fisiologia Vegetal da UFJF para a determinação do peso de massa fresca, seguido do armazenamento do material em ultra freezer a -80°C até o momento da análise. Amostras de 0,05 g de massa fresca foliar foram homogeneizadas em 5 mL de etanol 80% e incubadas a 90°C por 60 min. Após centrifugação a 3.500 rpm, por 10 min, a temperatura ambiente, o volume final dos sobrenadantes foi

determinado, e de cada amostra, retirou-se alíquotas de 60 μL , adicionada a 940 μL de água destilada e 5 mL de antrona 0,2% (p/v; preparada em H_2SO_4 concentrado). A mistura foi agitada em vórtex e incubada a 100°C, por 15 min e, após resfriamento, a absorvância foi obtida a 620 nm. Uma curva padrão de glicose foi preparada e os resultados calculados expressos mg de glicose g^{-1} de matéria fresca.

O amido foi extraído dos pellets obtidos após a extração dos CST pela adição de 5 mL de ácido perclórico (HClO_4) 30% (v/v). O material foi agitado em vórtex e incubado à temperatura ambiente por 30 min, seguido de centrifugação (3.500 rpm, por 5 min, a temperatura ambiente). Alíquotas de 60 μL foram retiradas de cada amostra e a estas foram adicionados 940 μL de água destilada e 5 mL de antrona 0,2% (em H_2SO_4). Após agitação, incubação a 100°C por 15 min e resfriamento, a absorvância das amostras foi lida a 620 nm. Uma curva padrão de glicose foi preparada e os resultados calculados expressos mg de glicose g^{-1} de matéria fresca.

Delineamento e análises estatísticas

Os experimentos foram dispostos em delineamento experimental de blocos casualizados. Para as análises realizadas no presente estudo, os experimentos foram montados com cinco vasos por tratamento (repetições) e em cada vaso uma planta, totalizando vinte e cinco unidades experimentais.

Os dados de cada avaliação foram analisados utilizando-se o modelo de Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Para atender os pressupostos da ANOVA, os dados que não atenderam aos princípios da normalidade foram transformados pelo modelo de Box-Cox (Box and Cox, 1964) e submetidos às análises. Os testes foram realizados com o auxílio do Software MINITAB® (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliações morfológicas

Após 26 meses de cultivo as plantas de Cabreúva apresentaram fenótipos cada vez menos desenvolvidos em resposta ao aumento da concentração de rejeitos no substrato em comparação ao grupo controle (Figura 1).

A altura, o diâmetro do caule e tamanho dos folíolos também se apresentaram menores conforme o aumento dos níveis de rejeitos nos substratos de cultivo. Aos 26 meses, uma maior quantidade de folhas compostas foi observada nas plantas do tratamento com 25% de rejeitos (Figura 2A), sendo o tratamento com 100% de rejeitos aquele com o menor número de folhas compostas. As plantas dos tratamentos contendo 50 e 75% de rejeitos não diferiram entre si em relação a esses parâmetros. Comportamento semelhante aconteceu em relação ao número de folíolos (Figura 2B), fator que apresentou maiores médias nos tratamentos com 25% e 50% de rejeitos, que diferiram da menor média observada no tratamento com 100% de rejeitos. Para esse parâmetro, os tratamentos com 0% e 75% de rejeitos não diferiram em comparação às demais médias (Figura 2). Na análise realizada após 40 meses de cultivo, o número de folhas não diferiu entre os tratamentos avaliados (Figura 2A e 2B).

Em relação à espessura dos folíolos, após 26 meses de cultivo (Figura 2C), não foram observadas diferenças entre as proporções de rejeitos presentes no substrato. Todavia, passados 40 meses, as maiores espessuras de folhas foram observadas nos tratamentos com 50 e 75% de rejeitos, que diferiram significativamente apenas do tratamento com 100% de rejeitos puros, com a menor espessura média.

Devido à ampla variação na altura das plantas, os dados observados foram trabalhados visando atender aos pressupostos de normalidade. Após transformados pelo modelo de Box-

Cox (1984), as suas médias foram comparadas. Nos dois períodos avaliados, observou-se que as plantas do tratamento com 100% de rejeitos apresentaram as menores alturas (Figura 2E), diferindo significativamente dos demais tratamentos, uma clara evidência do comprometimento no desenvolvimento das plantas crescidas na presença de rejeitos de minério de ferro puros. Essa resposta foi corroborada pelos resultados encontrados nos dois períodos avaliados para o diâmetro dos caules, com menor média, também observada, nas plantas do tratamento com 100% de rejeitos (Figura 2D).

Os resultados encontrados, após 40 meses de cultivo, mostram que as plantas de Cabreúva mantiveram similaridade estatística entre os tratamentos com relação ao número de suas folhas compostas, em quantidade por planta, assim como para a área foliar (Figura 2F). Sabendo que a área foliar de uma planta interfere na interceptação da radiação solar e nas trocas de água e energia entre as folhas e o ar adjacente à atmosfera, e que as folhas são o principal órgão envolvido na fotossíntese (Pereira et al., 1997), plantas de *M. Peruiferum*, mesmo com o crescimento comprometido sobre rejeitos puros, apresentando menor altura e diâmetro de caule, demonstraram potencial favorável para adaptação ao ambiente, preservando as estruturas morfológicas diretamente relacionadas ao processo fotossintético.

Ao analisar a área foliar total, após 40 meses de cultivo, não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 2F). No entanto, a área foliar total média de plantas do tratamento com 100% de rejeitos, foi aproximadamente 60% menor que as plantas do grupo controle.

Trocas gasosas

A taxa de assimilação de CO₂ pelas plantas (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), na primeira análise, realizada após 21 meses do transplântio, foi reduzida significativamente nos tratamentos contendo rejeitos de minério de ferro (25, 50 e 75%) e, especialmente no tratamento com 100%

de rejeitos (Figura 3A; tabela suplementar S2). Já na segunda análise, conduzida após 29 meses de cultivo, nenhuma diferença significativa entre os tratamentos foi observada, embora valores mais elevados de fotossíntese (A) tenham sido observados no tratamento controle quando este foi comparado com os demais tratamentos contendo rejeitos de minério de ferro.

Independentemente da concentração de rejeitos utilizada, a taxa transpiratória (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e a condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), parâmetros relacionados ao índice de abertura dos estômatos (Long and Woolhouse, 1996), não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos nos dois períodos analisados (Figura 3B, 3C; tabela suplementar S2). Considerando que a absorção de água pelas raízes, seu transporte pelo xilema até as paredes celulares do mesofilo e, por fim, sua evaporação pelos espaços intercelulares da folha até a saída da planta pelos estômatos é controlada por gradientes de potenciais hídricos (Taiz and Zeiger, 2013), os valores de condutância estomática podem sofrer variações em resposta a condições ambientais desfavoráveis, reduzindo a abertura estomática e, conseqüentemente, a transpiração e a fotossíntese (Inman-Bamber and Smith, 2005). Assim sendo, nossos resultados indicam que a queda na taxa fotossintética não se deu em função de limitações estomáticas, mas, possivelmente, em resposta a limitações associadas ao aparato fotossintético e/ou à bioquímica da fotossíntese da espécie estudada.

As concentrações intercelulares de CO_2 são influenciadas pelo processo de fotossíntese na planta. O CO_2 penetra nas folhas para o interior da câmara subestomática através da abertura estomática, com destino aos centros de carboxilação, onde, por meio da atividade da enzima Rubisco, se inicia o processo químico da fotossíntese. Como a difusão interna de CO_2 é rápida, as limitações ao desempenho fotossintético no interior das folhas são impostas mais por outros fatores do que pelo suprimento de CO_2 (Taiz and Zeiger, 2013). Corroborando esta afirmativa, a concentração intercelular de CO_2 (C_i), observada nos dois períodos de avaliação das plântulas de *M. peruiferum* (Figura 3D), confirmou que o desempenho deste parâmetro não foi

influenciado pelo aporte de rejeitos de minério de ferro no substrato. O mesmo comportamento foi observado para a razão entre a concentração interna e externa de CO₂ (C_i/C_a), nos períodos avaliados (Figura 4A; tabela suplementar S2), que se mantiveram estáveis entre os tratamentos. Os valores estáveis e menores que 1 da relação C_i/C_a indicam que as plantas de *M. peruiferum* mantiveram a incorporação de CO₂ positiva e a transformação do carbono em biomassa para sua utilização pelo aparato fotossintético.

A taxa de transporte de elétrons (ETR) na fotossíntese nas plantas é resultante da absorção da luz pelas clorofilas, que ao excitar os elétrons desses pigmentos, promove a transferência da energia para os centros de reação dos fotossistemas II e I (Young and Frank, 1996). Qualquer alteração nesse fluxo pode afetar o processo de fixação de CO₂ e, conseqüentemente, a produção de energia disponível para a planta. Esse processo foi avaliado na análise realizada após 21 meses de desenvolvimento da Cabreúva, na qual, foi observado que plantas cultivadas sobre rejeitos de minério de ferro puros apresentaram diminuição significativa na ETR em comparação às plantas do grupo controle (Figura 4B; tabela suplementar S2). Comportamento similar foi observado para a eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) da Rubisco, para a qual a Cabreúva apresentou pior desempenho quando cultivada sobre rejeitos puros, no mesmo período avaliado (Figura 4C; tabela suplementar S2). A difusão de CO₂ é impulsionada pelo gradiente entre a fração molar de CO₂ no ar em relação aos sítios ativos da enzima Rubisco nos cloroplastos. A difusão do CO₂ pelo mesofilo foliar até o cloroplasto é passível de alteração também pela resistência física das paredes celulares (Barros, 2015), além de sofrer interferência da condutância estomática e da concentração intracelular de CO₂ (Machado et al., 2005). Entretanto, a situação observada após 21 meses de cultivo parece resultar de algum fator não estomático ou físico, assim como a uma provável carência de ATP e de NADPH provenientes do funcionamento da cadeia transportadora de elétrons do fotossistema II (Silva et al., 2014).

Após 29 meses de cultivo com a Cabreúva, os resultados das análises mostraram comportamento similar ao observado na primeira avaliação para ETR e A/C_i , com os valores menores sendo observados nas plantas cultivadas sobre rejeitos puros, no entanto, sem qualquer diferença significativa (Figura 4B e 4C; tabela suplementar S2). Esses resultados demonstram que, mesmo as plantas tendo sofrido efeitos prejudiciais no seu metabolismo em resposta ao aumento na concentração de rejeitos no substrato, a capacidade de manutenção e estabilização desses componentes na fotossíntese foi mantida (Figura 4).

A eficiência instantânea do uso da água, parâmetro que avalia a relação entre a assimilação de CO_2 e a transpiração da planta (A/E) não foi significativamente alterada pelo aporte de rejeitos no substrato (Figura 4D). Resultados similares foram encontrados para a eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) (Figura 4E; tabela suplementar S2), relação que avalia a relação entre a assimilação de CO_2 e a condutância estomática.

Análises de pigmentos fotossintéticos e do teor de antocianinas

A clorofila (Chl) *a* é o pigmento diretamente envolvido na fotoquímica (o primeiro estágio do processo fotossintético), enquanto os demais pigmentos auxiliam na absorção de luz e na transferência da energia radiante para os centros de reação, sendo assim denominados pigmentos acessórios, como as Chl do tipo *b* e os carotenoides (Taiz and Zeiger, 2013). Na análise realizada nas plantas de *M. Peruiferum* considerando os teores das Chl *a* e Chl *b*, os valores totais (Chl *a* + Chl *b*) e dos carotenóides (Figuras 5 e 6; tabela suplementar S3), foi possível observar que as suas médias não diferiram significativamente. Todavia, os conteúdos dos pigmentos citados, nas plantas cultivadas na presença de 100% de rejeitos, foram 49%, 72%, 54% e 60% maiores, respectivamente, quando comparadas às plantas do grupo controle.

Embora as concentrações desses pigmentos não tenham apresentado diferenças significativas, a abundância relativa entre Chl *a* e Chl *b* sofreu alteração entre os tratamentos

(Figura 5; tabela suplementar S3). Nosso estudo encontrou um declínio na relação de Chl *a*:Chl *b*, iniciando com 3,39:1 no grupo controle, indo para 2,95:1 sobre 100% de rejeitos, o que é resultante do acréscimo desproporcional de 72% no conteúdo de Chl *b*, contrapondo o aumento de 49% de Chl *a* no cultivo sobre 100% de rejeitos em relação ao grupo controle. Esses resultados indicam que os rejeitos de minério de ferro causam desequilíbrio na síntese dos pigmentos fotossintéticos. Uma possível explicação para o acréscimo na concentração de Chl *b* pode ser a regulação negativa da clorofila *b* redutase, enzima responsável pela transformação da Chl *b* em Chl *a*, tal como observado em plantas submetidas ao estresse abiótico causado por salinidade (Diray-Arce et al., 2015; Gomes et al., 2021).

Além dos pigmentos da fotossíntese, o conteúdo de antocianinas (baseado no conteúdo de cianidina-3-glicosídeo), polifenóis da classe dos flavonoides e pertencentes ao grupo dos compostos fenólicos que desempenham a importante função antioxidante nas plantas e proteção das células contra a radiação solar (Silva, 2017), apresentou diferenças significativas com tendência de aumento em resposta ao incremento na concentração de rejeitos nos substratos de cultivo (Figura 6; tabela suplementar S3).

Considerando que os pigmentos cloroplastídicos estão relacionados com a eficiência fotossintética das plantas e, conseqüentemente, ao seu crescimento e adaptabilidade aos diferentes ambientes, a tendência de aumento dos teores médios desses pigmentos na presença de rejeitos puros indica que plantas de Cabreúva apresentam capacidade de ajuste do aparelho fotossintético para aumentar a eficiência na absorção de fótons, o que se alcança pela ampliação da área coberta pelos pigmentos acessórios, que funcionam como coletores de energia luminosa para a fotossíntese, atuando, também como moléculas protetoras contra a formação de espécies reativas de oxigênio danosas ao metabolismo, o que se processa também com a participação das antocianinas. No entanto, o aumento da concentração de rejeitos foi prejudicial para o ajuste da proporção dos pigmentos de clorofilas *a* e *b*.

Teores de carboidratos solúveis totais e amido

Os carboidratos são as moléculas mais importantes produzidas pela fotossíntese. Suas concentrações são reguladas tanto pela taxa fotossintética (Marenco et al., 2001) quanto pelas condições ambientais do meio (Martinazzo et al., 2007; Cuzzuol and Clipel, 2009). Neste estudo, esses compostos foram analisados considerando sua utilização como reserva energética (em forma de amido), assim como pela sua atuação como substratos em processos de geração de energia, na forma de carboidratos solúveis totais (CST), no metabolismo respiratório das plantas.

Embora os conteúdos de CST's nas folhas de plantas cultivadas na presença de 0%, 25%, 50% e 75% de rejeitos não tenham apresentado diferenças significativas extremas (Figura 7; tabela suplementar S4), os teores médios dos tratamentos com aporte de rejeitos foram maiores, quando comparados ao grupo controle. Seguindo essa tendência, os teores mais elevados de CST nos tecidos das folhas das plantas de Cabreúva foram observados na presença de rejeitos puros, que diferiram significativamente dos demais, com valores até 110% maiores do que o observado nas plantas do grupo controle.

Além da geração de energia, os CST's também podem estar relacionados à osmorregulação, aumentando a concentração de osmólitos (açúcares, ácidos orgânicos e íons) no citosol como resposta fisiológica para manter o potencial hídrico e o turgor foliar (Bradford and Hsiao, 1982; Maia et al., 2007; Meyer et al., 2006). As condições físicas dos rejeitos de minério de ferro puro podem causar estresses abióticos, dentre os quais, o déficit hídrico. Esse resultado é consistente com o encontrado por Nascimento et al. (2021), ao constatar uma maior concentração de CST em folhas de *Bauhinia rufa* (Bong.) Steud. cultivadas sobre rejeitos de minério de ferro puros.

Em relação aos teores de amido nos tecidos foliares de plantas cultivadas na presença de rejeitos de mineração de ferro, não foram observadas alterações significativas entre os

tratamentos. Esse resultado indica que o excedente de carboidratos produzidos no metabolismo está sendo usado prioritariamente na osmorregulação e não na alocação de reserva (como substrato respiratório) nas plantas cultivadas em substratos com aporte de rejeitos da barragem de Fundão.

Em resumo podemos assumir que, no presente estudo, a ausência de respostas com padrões característicos e definidos pode ser atribuída ao conhecimento ainda incipiente da ecofisiologia da espécie utilizada nas análises morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, o que demonstra a importância em se realizar o cultivo de plantas de *M. Peruiferum* na presença de rejeitos de mineração de ferro.

A partir do período de 40 meses, no qual as plantas de *M. Peruiferum* foram avaliadas e se desenvolveram sobre diferentes concentrações de rejeitos de minério de ferro, pode-se concluir que, apesar das plantas terem apresentado alterações morfológicas com qualquer proporção de rejeitos aportado no substrato de cultivo, apenas as plantas cultivadas sobre rejeitos puros apresentaram redução significativa no crescimento. No entanto, elas mantiveram a estrutura e a área foliar estável, condições importantes para a manutenção da atividade metabólica da fotossíntese no ambiente de cultivo.

Após 21 meses de cultivo, as plantas de Cabreúva cultivadas sobre o tratamento com 100% de rejeitos apresentaram diminuição significativa na sua taxa fotossintética, condição que pode estar relacionada a alterações no fluxo de transporte de elétrons (ETR), parâmetro que também apresentou redução significativa de desempenho no período avaliado. Após os 29 meses de cultivo, a taxa fotossintética e o fluxo de transporte de elétrons se restabeleceram, não diferindo entre os tratamentos, demonstrando o potencial da espécie em se estabelecer no ambiente impactado com rejeitos, mantendo a estabilidade de sua atividade fotossintética.

O cultivo sobre rejeitos puros, após 29 meses, resultou em aumento nos teores de pigmentos fotossintéticos, com alteração na relação Chl *a*:Chl *b*, em resposta aos rejeitos de minério de ferro. Os teores de amido não diferiram entre os tratamentos, entretanto o teor de carboidratos solúveis totais (CST) aumentou significativamente à medida em que a concentração de rejeitos foi incrementada, indicando possivelmente, prioridade na manutenção metabólica para osmorregulação, e não para alocação de reserva.

As plantas de *M. Peruiferum* após 40 meses de cultivo, apresentaram características promissoras para sua utilização em estudos e projetos de recuperação de áreas atingidas pelo desastre da barragem de minério de ferro do Fundão, em regiões onde realize-se a incorporação de frações de substratos férteis, resultando em estabelecimento da espécie próximo ao observado em condições não estressantes.

CONCLUSÃO

Conclui-se, que o rejeito puro afetou o tamanho das plantas de *M. Peruiferum* com a diminuição da altura e diâmetro de caule, assim como o número e a espessura dos folíolos, após 40 meses de cultivo;

A taxa fotossintética (*A*), a eficiência instantânea de carboxilação da Rubisco (*A/Ci*) e a taxa de transporte de elétrons (*ETR*) foram reduzidas após 21 meses de cultivo sobre rejeitos puros, mas foram recuperadas aos 29 meses, enquanto a transpiração (*E*), condutância estomática (*gs*) e concentração intercelular de CO₂ (*Ci*) mantiveram-se inalteradas;

Os pigmentos cloroplastídicos clorofilas *a* e *b* e carotenoides não foram afetados pelos tratamentos, mas a relação Chl *a* / Chl *b* sofreu alteração no tratamento com rejeitos puros;

O teor de antocianinas aumentou sobre rejeitos puros;

Os teores de amido não foram afetados pelos tratamentos, já os teores de carboidratos solúveis totais (CST) apresentaram maior média sobre rejeitos puros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, L. M. (2000). Considerações Gerais e Modelos de Recuperação de Formações Ciliares. In: Rodrigues, R. R., Leitão, H. F. (Eds.). *Matas Ciliares: Conservação e Recuperação* (pp. 289-312). São Paulo: EDUSP, FAPESP.
- Barros, T. H. S. (2015). *Eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com base em medições de trocas gasosas IRGA: fotossíntese e transpiração*. (Dissertação de mestrado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, São Paulo, Brasil. Retrieved from <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-17092015-163001/pt-br.php>
- Box, G. E., & Cox, D. R. (1964). An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 26(2), 211-243. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>
- Bradford, K. J., & Hsiao, T. C. (1982). Physiological responses to moderate water stress. In: Lange, O. L., Nobel, P. S., Osmond, C. B., & Ziegler, H. (Eds.), *Physiological Plant Ecology II*. Encyclopedia of Plant Physiology (New Series): Springer.
- Capelin, D., Daneluzzi, G. S., Oliveira, R. F., Bressan, D. F., Correa, C. V., Joca, T. C., Alves, M. S., & Broetto, F. (2017). Utilização do IRGA- Analisador de Gases por Infravermelho para avaliação de trocas gasosas em plantas: Check list de preparação. In: *O Estresse das Plantas - Teoria & Prática* (pp.187-194). Cultura Acadêmica.
- Carvalho, P. E. R. (2006). Cabriúva-vermelha: *Myroxylon peruiferum*. In: Florestas, E. (Ed.). *Espécies Arbóreas Brasileiras*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica.
- Cuzzuol, G. R. F., & Clippel, J. K. (2009). Aspectos ecofisiológicos de *Sinningia aghensis* Chautems em condições de campo. *Hoehnea*, 36, 73-81. <https://doi.org/10.1590/S2236-89062009000100002>
- Diray-Arce, J., Clement, M., Gul, B., Khan, M. A., & Nielsen, B. L. (2015). Transcriptome assembly, profiling, and differential gene expression analysis of the halophyte *Suaeda fruticosa* provides insights into salt tolerance. *BMC Genomics*, 16(1), 1-24. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1553-x>
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356. Retrieved from https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ac60111a017?casa_token=OvJxleJQb8YAAAAA:OriVgSOfJek7v2hLAsYwh9Rl_mwOVrSi1bYDFsaev-Sq1OshHoAdZ_7z5K6cEJcnhXrmUqA7eOovfqeX
- Ferreira, C. S., Piedade, M. T. F., & Bonates, L. C. (2006). Germinação de sementes e sobrevivência de plântulas de *Himatanthus sucuuba* (Spruce) Wood. em resposta ao

- alagamento, nas várzeas da Amazônia Central. *Acta Amazônica*, 36(4): 413- 418. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000400003>
- Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, (1), F1-2. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00>
- Gomes do Ó, L. M., Cova, A. M. W., Silva, P. C. C., Gheyi, H. R., Neto, A. D. A., & Ribas, R. F. (2021). Aspectos bioquímicos e fluorescência da clorofila *a* em plantas de mini melancia hidropônica sob estresse salino. *IRRIGA*, 26(2), 221-239. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n2p221-239>
- Hiscox, J. D. & Israelstam, G. F. (1979). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, 57(12), 1332-1334. <https://doi.org/10.1139/b79-163>
- IMAGEJ (2014). *Image Processing and Analysis in Java*.
- Inman-Bamber, N. G., & Smith, D. M. (2005). Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, 92(2-3), 185-202. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>
- Junior, C. A. S., Coutinho, A. D., de Oliveira-Júnior, J. F., Teodoro, P. E., Lima, M., Shakir, M., Gois, G., & Johann, J. A. (2018). Analysis of the impact on vegetation caused by abrupt deforestation via orbital sensor in the environmental disaster of Mariana, Brazil. *Land Use Policy*, 76, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.019>
- Long, S. P., & Woolhouse, H.W. (1978). Responses of net photosynthesis to light and temperature in *Spartina townsendii* a C4 species from a cool temperature climate. *Journal of Experimental Botany*, 29(3), 803-814, 1978.
- Lorenzi, H. (2008). *Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil*. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum.
- Machado, E. C., Schmidt, P. T., Medina, C. L., & Ribeiro, R. V. (2005). Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40, 1161-1170. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005001200002>
- Maia, P. S. P., Oliveira Neto, C. F., Castro, D. S., Lobato, A. K. S., Santos, P. C. M., & Costa, R. C. L. (2007). Conteúdo relativo de água, teor de prolina e carboidratos solúveis totais em folhas de duas cultivares de milho submetidas a estresse hídrico. *Brazilian Journal of Biosciences*, 5, 918-920. Retrieved from <https://www.seer.ufrgs.br/index.php/rbrasbioci/article/view/115301/62598>
- Mancinelli, A. L. (1990). Interaction between light quality and light quantity in the photoregulation of anthocyanin production. *Plant Physiology*, 92(4), 1191-1195. <https://doi.org/10.1104/pp.92.4.1191>
- Marenco, R. A., Gonçalves, J. F. C., & Vieira, G. (2001). Leaf gas exchange and carbohydrates in tropical trees differing in successional status in two light environments in central Amazonia. *Tree Physiology*, 21, 1311-1318. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.18.1311>

- Martinazzo, E. G., Anese, S., Wandscheer, A. C. D., & Pastorini, L. H. (2007). Efeito do sombreamento sobre o crescimento inicial e teor de clorofila foliar de *Eugenia uniflora* Linn (Pitanga)–Família Myrtaceae. *Revista Brasileira de Biociências*, 5(S2), 162-164. Retrieved from <https://seer.ufrgs.br/index.php/rbrasbioci/article/view/115048>
- Meyer, S. T., Roces, F., & Wirth, R. (2006). Selecting the drought stressed: Effects of plant stress on intraspecific and within-plant herbivory patterns of the leaf-cutting ant *Atta Colombica*. *Functional Ecology*, 20(6), 973–981. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2006.01178.x>
- MINITAB® (2019). Minitab® 19 Statistical Software.
- Nascimento, F. S., Toledo, A. M. O., Pimenta, M. P., Resende, C. F., Peixoto, P. H. P., Zimerer, A., & Lopes, J. F. S. (2021). Does mining waste concentration in the soil interfere with leaf selection by *Acromyrmex subterraneus* (Formicidae)? *Biotropica*, 53(2), 487–495. <https://doi.org/10.1111/btp.12892>
- Oliveira, D. M. (2007). *Respostas ecofisiológicas de plântulas de duas espécies arbóreas de diferentes estágios sucessionais da várzea, Amazônia Central* (Dissertação de mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, Brasil. Retrieved from <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/11881>
- Pereira, A. R., Villa Nova, N. A., & Sedyama, G. C. (1997). *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ.
- Sharkey, T. D., Bernacchi, C. J., Farquhar, G. D., & Singaas, E. L. (2007). Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves. *Plant, Cell & Environment*, 30(9), 1035-1040. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01710.x>
- Shimizu, E. S. C. (2009). *Aspectos fisiológicos e bioquímicos relacionados à quebra de dormência física em sementes de paricá [Schizolobium parahyba var. amazonicum (Huber ex Ducker) Barneby]* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará, Brasil. Retrieved from http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=150731
- Silva, E. A. (2017). *Genética da Distribuição Quantitativa de Antocianina em Plantas de População Segregante de Alface* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de São João Del-Rei, Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. Retrieved from https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgca/Dissertacao%20Eduardo%20Alves_28_08_2017.pdf
- Silva, L. D. A., Brito, M. E., Sá, F. V. D. S., Moreira, R. C., Soares Filho, W. D. S., & Fernandes, P. D. (2014). Mecanismos fisiológicos em híbridos de citros sob estresse salino em cultivo hidropônico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 1-7. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18nsupps1-s7>
- Silva, K. D. A., Martins, S. V., Miranda Neto, A., Demolinari, R. D. A., & Lopes, A. T. (2016). Restauração florestal de uma mina de bauxita: avaliação do desenvolvimento das espécies arbóreas plantadas. *Floresta e Ambiente*, 23, 309-319. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.142515>

- Soares, A. M. S., & Machado, O. L. T. (2007). Defesa de plantas: sinalização química e espécies reativas de oxigênio. *Revista Trópica–Ciências Agrárias e Biológicas*, 1(1), 10. Retrieved from <https://bityli.com/6NEd7>
- Souza, M. G. O. S. (2012). *Crescimento de espécies florestais em povoamentos puros e sua influência sobre atributos edáficos em Trajano de Moraes, RJ* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil. Retrieved from <https://uenf.br/posgraduacao/producao-vegetal/wp-content/uploads/sites/10/2014/08/Mar%C3%ADlia-Grasiela.pdf>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2013). *Fisiologia Vegetal* (5a ed.). Porto Alegre: Artmed, 2013.
- Vieira, N. K., & Reis, A. (2003). O papel do banco de sementes na restauração de áreas degradadas. In: *Seminário Nacional – Degradação e Recuperação Ambiental*, SOBRADE: Florianópolis. Retrieved from <http://www.lpv.esalq.usp.br/sites/default/files/9%20-%20Referencia%20regeneracao%20de%20areas%20degradadas.pdf>
- Wellburn, A. R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, 144(3), 307-313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
- Young, A. J., & Frank, H. A. (1996). Energy transfer reactions involving carotenoids: quenching of chlorophyll fluorescence. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 36(1), 3-15. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(96\)07397-6](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(96)07397-6)

Tabela 1. Constituição dos tratamentos contendo diferentes proporções de substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão.

Tratamentos (%)	Constituição substrato	
	Substrato fértil: rejeito de mineração (v:v)	
0 (controle)	100:0	
25	75:25	
50	50:50	
75	25:75	
100	0:100	

Tratamento 0%: substrato fértil e nenhuma adição de rejeito puro; Tratamento 25%: proporção de 75% de substrato fértil para 25% de rejeito puro; Tratamento 50%: 50% de substrato fértil e 50% de rejeito puro; Tratamento 75%: 25% de substrato fértil para 75% de rejeito puro; Tratamento 100%: exclusivamente de rejeito de minério de ferro puro.



Figura 1. Fenótipo de plantas de Cabreúva após 29 meses de cultivo nos diferentes tratamentos (13 de dezembro de 2019) na presença de 0, 25, 50, 75 e 100% de rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão.

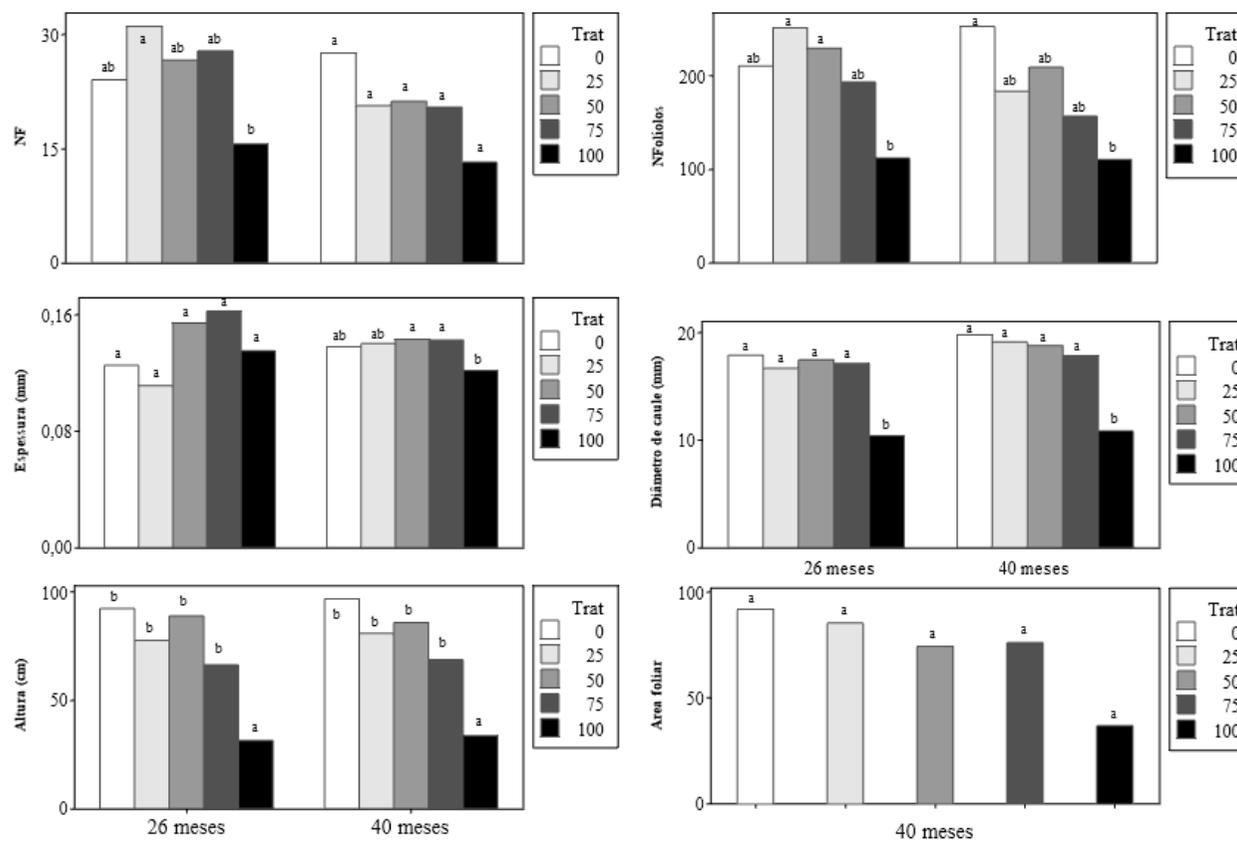


Figura 2. Painel com parâmetros alométricos médios analisados em plântulas de *M. peruiferum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 26 e 40 meses de cultivo. NF: Número de folhas compostas; NFolíolos: Número de folíolos; Espessura do folíolo (mm); Diâmetro de caule (mm); Altura (cm) e Área foliar total (cm²). Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

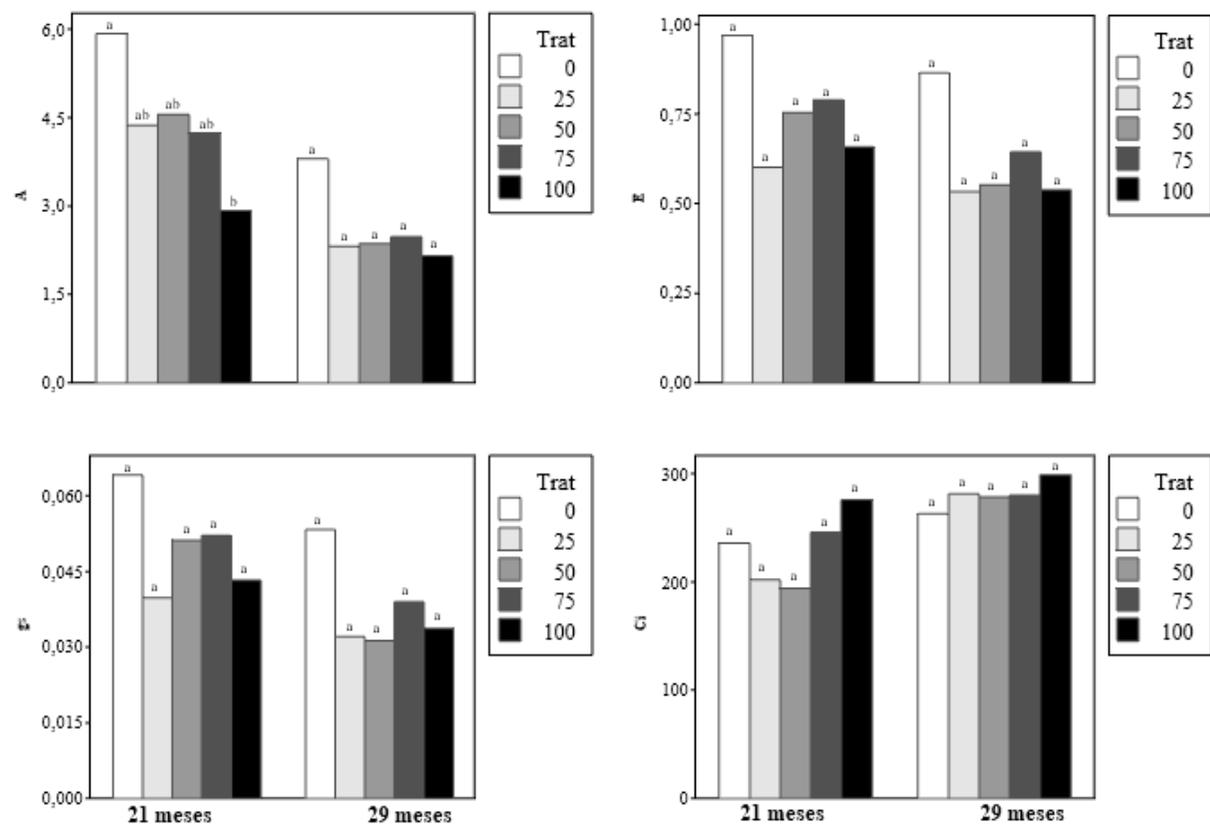


Figura 3. Painel com parâmetros médios analisados em plântulas de *M. peruiferum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 21 e 29 meses de cultivo. A: Taxa de fotossíntese líquida; E: Transpiração; gs: Condutância Estomática; Ci: Concentração intercelular de CO₂. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

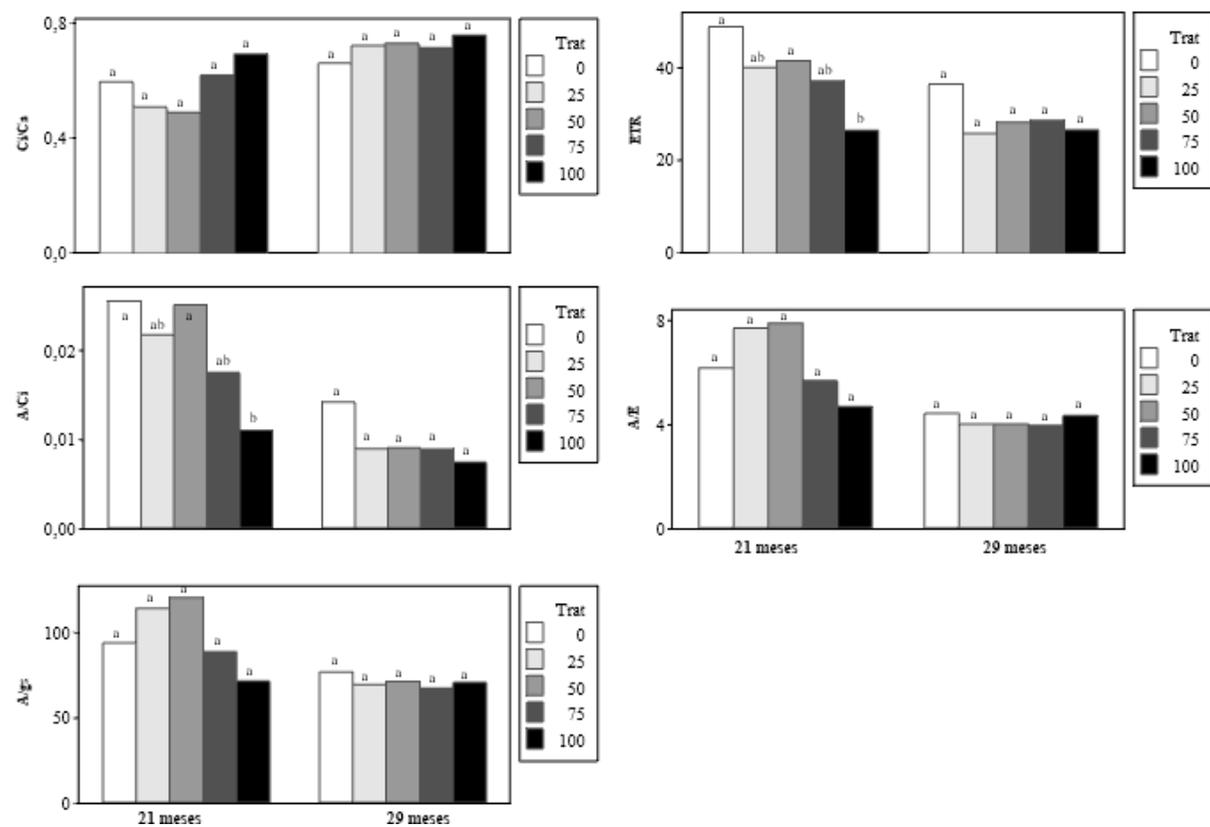


Figura 4. Painel com parâmetros médios analisados em plântulas de *M. peruvianum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 21 e 29 meses de cultivo. Ci: Razão entre a concentração interna e externa de CO₂; ETR: Taxa de transporte de elétrons; A/Ci: Eficiência instantânea de carboxilação; A/E: Eficiência instantânea do uso da água; A/g: Eficiência intrínseca do uso da água. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

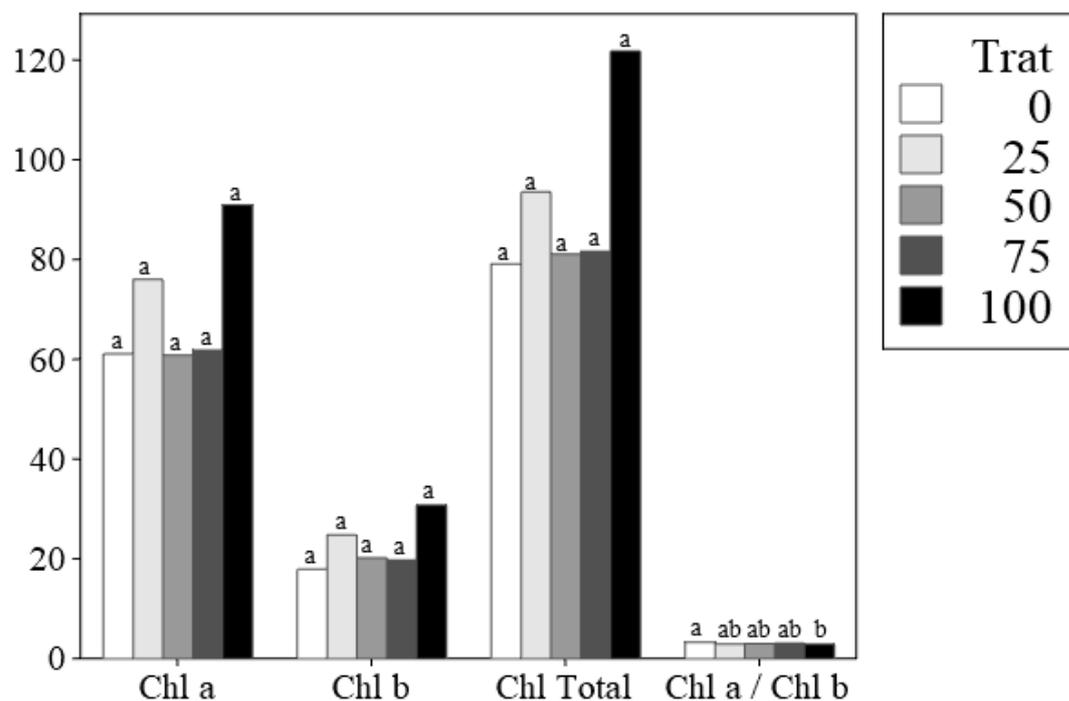


Figura 5. Teores médios de clorofila a (μg de Chl a/g de matéria fresca), clorofila b (μg de Chl b/g de matéria fresca), clorofilas totais e a razão entre clorofila a e b (chl a/chl b), analisados em plântulas de *M. peruvianum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 29 meses de cultivo. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

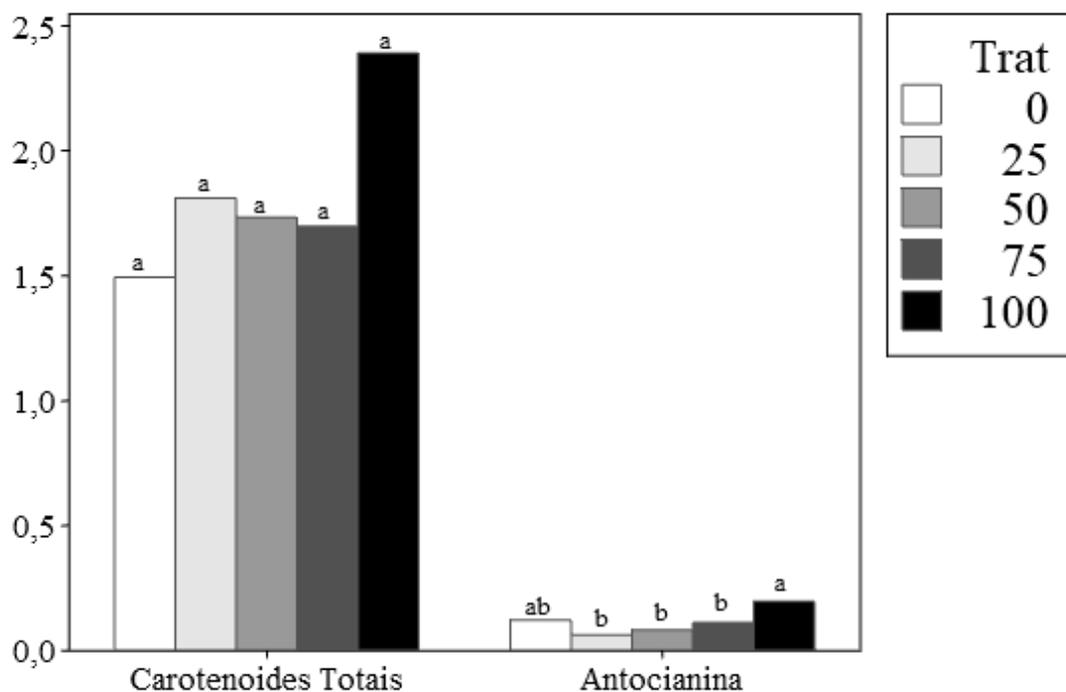


Figura 6. Teores médios de carotenoides totais (μg de carotenoides totais/g de matéria fresca) e pigmento antocianina (em cianidina-3-glicosídeo/L do extrato), analisados em plântulas de *M. peruvianum*, sob diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, após 29 meses de cultivo. Os teores de carotenoides totais foram divididos por 10 para a representação gráfica. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

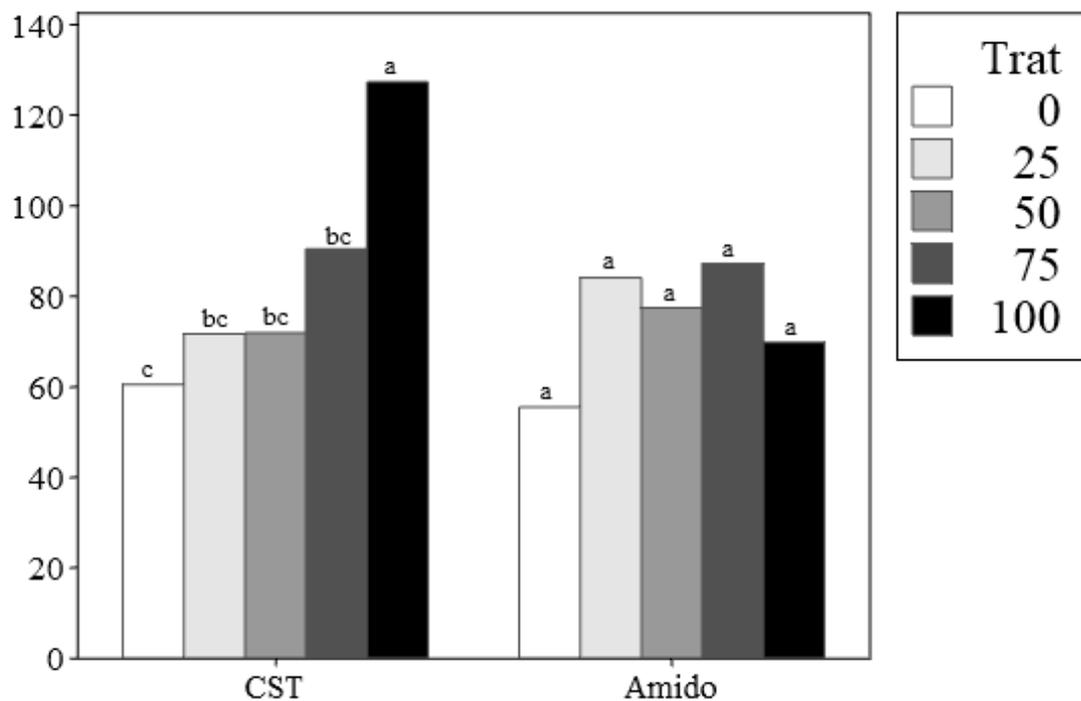


Figura 7. Teores médios de carboidratos solúveis totais (CST; mg de CST/g de matéria fresca) e amido (mg de amido/g de matéria fresca), em plântulas de *M.peruiferum* submetidas a proporções crescentes de rejeitos de minério de ferro, após 29 meses de cultivo. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

MATERIAL SUPLEMENTAR

S1. Medidas alométricas em plantas de *M. peruriferum* submetidas a diferentes proporções de um substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão, em duas épocas de avaliação.

Rejeito (%)	Nº folhas	Nº folíolos	Espessura <i>mm</i>	Diâmetro	Altura <i>cm</i>	Altura ¹	Área foliar
				Caule <i>mm</i>			total <i>cm</i> ²
26 meses							
0	24ab	209.8ab	0.12a	17.94a	92.5	0.105b	-
25	31a	250.4a	0.11a	16.73a	77.8	0.116b	-
50	26.6ab	228.6a	0.15a	17.53a	89	0.111b	-
75	27.8ab	193.0ab	0.16a	17.19a	66.5	0.125b	-
100	15.6b	112.0b	0.13a	10.46b	31.5	0.179a	-
40 meses							
0	27.50a	252.00a	0.138ab	19.83a	97	0.103b	91.7a
25	20.60a	182.8ab	0.140ab	19.19a	81.1	0.117b	85.22a
50	21.20a	208.6ab	0.142a	18.83a	86.1	0.116b	74.33a
75	20.40a	156.4ab	0.142a	17.91a	68.9	0.124b	76.0a
100	13.20a	110.2b	0.121b	10.88b	33.8	0.173a	37.03a

Medidas Paramétricas: Nº folhas, número de folhas; Nº folíolos, número de folíolos. As médias dos dados originais foram apresentadas sem qualquer teste. Os números sobrescritos na altura refere-se à normalização por Box-Cox dos dados originais no seguinte parâmetro de transformação: 1 Box Cox $\lambda = -0.5$. Médias, nas colunas, seguidas de uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey e médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes, a 5% de probabilidade.

S2. Parâmetros de trocas gasosas (fotossíntese) em plantas de *M. peruriferum* submetidas a diferentes proporções de um substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão, em duas épocas de avaliação.

Rejeito (%)	A	E	g _s	ETR	Ci	Ci/Ca	A/Ci	A/E	A/g _s
21 meses									
0	5.91a	0.966a	0.064a	49.14a	235.9a	0.596a	0.026a	6.20a	93.71a
25	4.36ab	0.600a	0.04a	40.32ab	202.2a	0.509a	0.022ab	7.75a	114.21a
50	4.55ab	0.752a	0.051a	41.74a	194.1a	0.489a	0.025a	7.94a	120.4a
75	4.24ab	0.787a	0.052a	37.42ab	245.7a	0.619a	0.017ab	5.72a	88.5a
100	2.92b	0.656a	0.043a	26.72b	275.7a	0.693a	0.011b	4.70a	71.5a
29 meses									
0	3.79a	0.863a	0.053a	36.72a	262.7a	0.661a	0.014a	4.45a	76.63a
25	2.31a	0.532a	0.032a	26.08a	281.1a	0.722a	0.009a	4.03a	69.4a
50	2.36a	0.552a	0.031a	28.51a	278.3a	0.73a	0.009a	4.03a	71.12a
75	2.47a	0.642a	0.039a	28.90a	279.8a	0.714a	0.009a	3.98a	67.25a
100	2.16a	0.537a	0.034a	26.79a	298.7a	0.758a	0.007a	4.37a	70.5a

Parâmetros: A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), taxa de fotossíntese líquida; E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), transpiração; g_s ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), condutância estomática; ETR ($\mu\text{mols elétrons m}^{-2}\text{s}^{-1}$), taxa de transporte de elétrons; Ci ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), concentração intercelular de CO₂; Ci/Ca, razão da concentração interna / externa de CO₂; A/Ci, eficiência instantânea de carboxilação da Rubisco; A/E ($\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$), eficiência instantânea do uso de água; A/g_s, eficiência intrínseca do uso de água. Médias, nas colunas, seguidas de uma mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey e médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes, a 5% de probabilidade.

S3. Teores de pigmentos fotossintéticos e de antocianinas em plantas de *M. peruriferum* submetidas a diferentes proporções de um substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão, em duas épocas de avaliação.

Rejeito (%)	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl totais	Chl <i>a</i> / Chl <i>b</i>	Carotenoides totais	Pigmento de
						antocianina cianidina-3-glicosídeo
	μg/g MF					mg/L
0	61.2a	18.00a	79.2a	3.39a	14.92a	0.1211ab
25	73.3a	20.38a	93.7a	3.59a	18.08a	0.0614b
50	60.9a	20.25a	81.1a	3.01ab	17.30a	0.0818b
75	61.95a	19.78a	81.7a	3.16ab	16.96a	0.1115b
100	91.1a	30.88a	121.9a	2.95b	23.88a	0.1962a

Médias, nas colunas, seguidas de uma mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey e médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes, a 5% de probabilidade.

S4. Teores de carboidratos solúveis totais e amido em plantas de *M. peruriferum* submetidas a diferentes proporções de um substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão, em duas épocas de avaliação.

Rejeito (%)	CST	Amido
	mg/g MF	
0	60,52c	55,51a
25	71,73bc	84,2a
50	71,89bc	77,46a
75	90,4bc	87,3a
100	127,44a	69,8a

Teor em miligrama de Carboidratos Solúveis Total (CST) e Amido por grama de matéria fresca de amostras de plântulas de *Myxylon Peruiferum* L.f. Médias, nas colunas, seguidas de uma mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey e médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes, a 5% de probabilidade.

3 CAPÍTULO II

Manuscrito formatado para submissão na revista Integrated Environmental Assessment and Management

(Qualis A2; FI = 2.20)

Análise nutricional de *Myroxylon peruiferum* L.f submetida a rejeitos oriundos do rompimento de uma barragem de rejeito de minério de ferro

Maria de Paula Pimenta¹, Paulo Henrique Pereira Peixoto^{1,2}

1 - Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza: 2 -

Laboratório de Fisiologia Vegetal, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade

Federal de Juiz de Fora, 36036–900, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil

Autor de correspondência: Pimenta, M. P.

E-mail: mariappiment@gmail.com

RESUMO

Em 2015, uma barragem de rejeitos de minério de ferro, localizada no Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, rompeu causando o maior desastre socioambiental no setor da mineração do país. As áreas atingidas apresentam fatores limitantes ao restabelecimento da vegetação, como a compactação do solo e o adensamento das partículas. No intuito de reconstituir os ecossistemas degradados e seus processos ecológicos, além de auxiliar na compreensão das interações entre os rejeitos, os solos e as vegetações originais, avaliações relacionadas ao cultivo e nutrição de espécies arbóreas nativas sobre as áreas afetadas são fundamentais. Assim, como objetivo, avaliamos as condições físico-químicas de diferentes substratos preparados a partir de frações de rejeitos de minério de ferro e de substratos férteis antes e após o cultivo de Cabreúva (*Myroxylon peruiferum* L.f) e, a acumulação de elementos minerais nos tecidos (raízes, caules e folhas) de plantas dessa espécie cultivadas sobre os diferentes substratos. Constatou-se que a baixa fertilidade e baixo teor de matéria orgânica, além das características físicas/estruturais do solo, são limitantes ao estabelecimento vegetal. Em resposta ao incremento na proporção de rejeitos, os níveis dos macronutrientes K, Ca e Mg não variaram, independentemente da parte da planta analisada, já os teores de N e P mantiveram-se inalterados entre os tratamentos nos tecidos das folhas da espécie. Verificou-se o acúmulo do micronutriente Cu em tecidos das raízes e os teores de Fe e Mn, como resultado dos altos níveis nos substratos contendo rejeitos, foram também encontrados em excesso na planta, com acúmulos consideráveis nos tecidos das raízes, ao nível de 75% de rejeitos e, nos tecidos dos caules, sobre rejeitos puros. O aporte de solos/substratos férteis e de matéria orgânica nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro, é essencial para o estabelecimento da Cabreúva.

Palavras-chave: Cabreúva, lama, estabelecimento vegetal, contaminação.

INTRODUÇÃO

Em 5 de novembro de 2015, a barragem de rejeitos de minério de ferro do Fundão, integrante do Complexo Industrial de Germano (Samarco S.A.), localizada na região do Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, rompeu, causando o maior desastre socioambiental no setor da mineração do país. O grande volume liberado (aproximadamente 50 milhões de m³ de rejeitos) resultou na formação de uma avalanche de lama, árvores e água, que percorreu cerca de 660 km, causando destruição ao longo de uma das mais importantes bacias hidrográficas do país, a bacia do Rio Doce (MPF, 2022; Pinto-Coelho, 2015). Devido à extensão do desastre e da complexidade das interações ecológicas afetadas, a proporção dos danos socioambientais causados é incalculável, tanto em curto quanto em longo prazo. Cerca de 1.580 ha de cobertura vegetal foram atingidos, correspondendo a aproximadamente 510 ha de Mata Atlântica e 375 ha de cobertura florestal ciliar ao longo do trecho (SEDRU, 2016). Desde o rompimento até a foz do Rio Doce, ambientes foram literalmente varridos e soterrados pela lama (Schaefer et al., 2015).

Como resultado dos baixos teores de nutrientes, de matéria orgânica e da textura franco-arenosa, composta em 90% por partículas finas (classificadas como areia fina e silte) e o restante composto pela fração de argila (o que limita a capacidade de troca de cátions desse material), os rejeitos da barragem são considerados estéreis para o desenvolvimento vegetal (EMBRAPA, 2015). Além disso, devido à diminuição dos espaços porosos, essa composição granulométrica favorece a compactação do solo e o adensamento das partículas, prejudicando o crescimento das raízes e a percolação da água (EMBRAPA, 2015; Pinto-Coelho, 2015; Milanez et al., 2015; Schaefer et al., 2015).

Rico em óxidos de ferro e silício, constatou-se também no rejeito, a presença de metais pesados como Arsênio (As), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Zinco (Zn), Manganês (Mn) e Cobalto (Co), somado à hipótese de que o impacto da onda de lama revolveu o fundo dos rios, colocando novamente em suspensão sedimentos que, pelo histórico de uso e relatos na literatura, já continham metais pesados (IBAMA, 2020; Oliveira et al., 2021). Segundo assumido em estudos locais e pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (EMBRAPA, 2015; CONAMA, 2009), esses elementos não atingiram concentrações potencialmente tóxicas nos rejeitos, entretanto, são metais que podem manifestar seu potencial poluente diretamente nos organismos em contato ao solo, com efeitos de bioacumulação ao longo da cadeia alimentar até o homem, além da disponibilidade às plantas em níveis tóxicos (Chang et al., 1984; Silvério, 2003). Nas plantas, concentrações elevadas desses metais podem provocar fitotoxidez, com inibição de seu crescimento típico, levando-as precocemente ao estágio de senescência (Coutinho and Barbosa, 2007).

Estudos demonstram que além da combinação das características físicas e químicas dos rejeitos, que afetam espécies vegetais pelo comprometimento no desenvolvimento das raízes e por seu baixo aporte mineral (Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020; Matos et al., 2020; Esteves et al., 2020), aumentos nos teores de Fe, Mn, Cu e Cr nos tecidos vegetais também foram constatados, condições que podem causar alterações morfológicas e fisiológicas deletérias (Araújo et al., 2022; Coelho et al., 2020; Matos et al., 2020; Esteves et al., 2020).

Além de auxiliar na compreensão das interações entre os rejeitos de minério com os solos e com as plantas, avaliações envolvendo espécies vegetais cultivadas sobre rejeitos de minério de ferro são fundamentais para aumentar as chances de reconstrução gradual dos ecossistemas degradados e de seus processos ecológicos. A utilização de

plantas em ambientes contaminados ou degradados promove a reabilitação da estrutura e da ecologia do solo, aumentando a porosidade, a quantidade de matéria orgânica e a infiltração da água, além de reduzir a erosão (Marques et al., 2011). A utilização de espécies arbóreas nativas apresenta, ainda, potencial de sequestro de carbono da atmosfera (Caires et al., 2011). Embora estudos relacionados a espécies vegetais sobre rejeitos de minério de ferro já tenham sido conduzidos (Matos et al., 2020), a observação do comportamento de espécies arbóreas ainda é incipiente.

Popularmente conhecida como Cabreúva, *Myroxylon peruiferum* L.f é uma espécie arbórea nativa da Mata Atlântica. Em estudos voltados para a restauração florestal, essa espécie destacou-se positivamente para a recomposição de matas ciliares e recuperação de áreas degradadas pelo seu notável desenvolvimento vegetativo (Barroso et al., 2018; Botelho et al., 1996; Silva et al., 2016). Espécimes de Cabreúva também apresentaram potencial fitorremediador para cultivos em áreas com excesso de cobre no solo, apresentando bioacumulação do elemento nas suas raízes e crescimento não alterado pelo metal (Marques et al., 2018). A espécie se mostrou eficaz na conservação da biodiversidade genética e na estrutura populacional de espécies arbóreas em remanescentes naturais e em áreas de restauração florestal (Schwarcz et al., 2018). Considerando o comportamento de espécies secundárias tardias e climácicas (como *M. peruiferum*), a espécie se mostrou interessante para o reflorestamento em áreas de solos com baixos teores de P, uma vez que em ensaios com adubação fosfatada, seu metabolismo e crescimento inicial foram pouco influenciados pela reduzida disponibilidade desse nutriente (Santos et al., 2008), sendo um importante indicativo de sua adaptação a solos pouco férteis (Resende et al., 1999). Avaliações relacionadas a elementos minerais faltantes em plântulas de *M. peruiferum* corroboram essa ideia, uma

vez que a espécie não apresentou alterações nas respostas de seu crescimento sob condições faltantes de diferentes nutrientes essenciais (Carlos et al., 2009).

Considerando a necessidade e a importância de se compreender os impactos e as interações dos rejeitos de minério de ferro sobre o desenvolvimento de espécies arbóreas e, visando contribuir para as tomadas de decisão e escolha de espécies mais adequadas e promissoras para a recuperação das áreas afetadas por esse evento catastrófico na bacia hidrográfica do Rio Doce, este estudo teve os seguintes objetivos: avaliar as condições físico-químicas e de fertilidade de diferentes substratos preparados a partir de frações de rejeitos de minério de ferro e de substratos férteis, antes e após o cultivo de *Myroxylon peruiferum* L.f; e analisar a acumulação de elementos minerais essenciais nos tecidos das raízes, caules e folhas dessa espécie, cultivadas na presença dos diferentes substratos.

MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo, os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação com 50% de sombreamento (Sombrite®), localizada na Estação Experimental pertencente ao Instituto de Ciências Biológicas e ao Departamento de Botânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, *campus* de Juiz de Fora, MG (21° 46 'S, 43°22'W, 939,96 m de altitude).

Material vegetal

Sementes de *M. peruiferum*, obtidas comercialmente (Sementes Caiçara Ltda.), foram germinadas em tubetes (2,6 x 12 cm) contendo o substrato Carolina Soil®, composto por turfa de *Sphagnum*, vermiculita expandida, calcário dolomítico, gesso agrícola e vestígios de fertilizante NPK. Sessenta dias após a semeadura das sementes realizou-se o transplântio de 25 mudas uniformes, com altura aproximada de 15 cm, para vasos de 25 L, contendo uma mistura de substrato fértil e de rejeitos de minério de ferro

da barragem do Fundão (Samarco S.A.) em diferentes proporções. Os vasos foram dispostos em bancadas, submetidos a irrigação diária por aspersão, até alcançar a capacidade de campo, em casa de vegetação.

Tratamentos

Os diferentes tratamentos foram preparados conforme a Tabela 1, a partir de proporções variáveis (por volume) de substrato fértil e rejeito de minérios de ferro da barragem de mineração de Fundão.

O substrato fértil utilizado constituiu-se de uma mistura de solo tipo latossolo (solo superficial com 20 cm de profundidade) e areia (1,5: 1 v/v). A este material foram adicionados o fertilizante químico, Forth Frutas®, composto por 12% N, 5% P₂O₅, 15% K₂O, 1% Ca, 1% Mg, 5% S, 0,2% Zn, 0,2% Fe, 0,05 % Cu, 0,06% B, 0,08% Mn e 0,005% Mo (1 g fertilizante / L substrato), e um corretor de acidez, o AgroSilício®, composto por 36% CaO e 9% MgO (2 g corretor de acidez / L substrato).

Amostras de rejeitos foram coletadas em abril de 2017, um ano e cinco meses após do rompimento da barragem de minério, sendo provenientes de dragagens realizadas no fundo do reservatório da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (UHE), localizada a aproximados 77 Km do local do colapso da barragem. O material foi transportado e armazenado em área protegida de chuvas na UFJF por dois meses antes do preparo dos substratos e do transplântio das mudas.

Fertilidade dos substratos

Para as análises de pré-cultivo, amostras aleatórias dos rejeitos foram coletadas, embaladas, encaminhadas e submetidas às análises de fertilidade (rotina), tamanho de partículas e presença de metais pesados no Laboratório de Análises de Solos da

Universidade Federal de Viçosa (Viçosa, MG). Nas análises foram determinados os valores de pH em água (KCl e CaCl - Relação 1:2,5), acidez potencial (H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0), soma de bases trocáveis (SB), a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC), fósforo remanescente (P-rem). Teores totais de matéria orgânica (MO = C. Org x 1,724 -Walkley-Black), teores dos elementos biodisponíveis (extração pelo método Mehlich-1): fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn) e cobre (Cu). Elementos como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) foram extraídos por KCl a 1 mol/L. O teor de nitrogênio (N) foi encontrado por digestão sulfúrica (Destilação por Kjeldhal). Os resultados das análises dos diferentes substratos em pré-plantio são apresentados na Tabela 2 (Peixoto et al., submetido).

Aproximadamente 40 meses após o estabelecimento das plantas nos vasos contendo as diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, para as análises pós-cultivo dos substratos, coletou-se três amostras dos substratos, a uma profundidade de até 20 cm, de cada um dos cinco tratamentos (0, 25, 50, 75 e 100% de rejeitos) para a realização de análises químicas no Laboratório de Análise de Solos, Tecidos Vegetais e Fertilizantes do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, segundo metodologias específicas (conforme detalhado para pré-cultivo).

Teores de elementos nas plantas

Os teores de macro e micronutrientes e de sódio (Na) nas diferentes partes das plantas foram determinados ao final do experimento (40 meses após o transplantio nos diferentes substratos), pela análise de três amostras oriundas de cada um dos cinco tratamentos (0, 25, 50, 75 e 100% de rejeito), em cada parte da planta. Para a análise dos tecidos, coletou-se uma folha de cada planta, do segundo ou terceiro nó a partir do ápice superior, que apresentasse folíolos totalmente expandidos e em boas condições

morfológicas e fitossanitárias. Para a análise dos caules, utilizou-se o terço médio de cada amostra, e para a análise das raízes, coletou-se a raiz principal dos espécimes.

As amostras dos tecidos foram coletadas, lavadas (raízes) e secas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por 72h, até alcançar massa constante. Após secagem, foram encaminhadas para análises no Laboratório de Análise de Solos, Tecidos Vegetais e Fertilizantes do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, conforme metodologias específicas. Foram determinados os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn) e sódio (Na) nos diferentes tecidos.

Conteúdo total de elementos e fator de translocação

A média do conteúdo total de elementos (elem) foi obtida a partir da soma das concentrações de cada repetição de cada parte da planta (raiz, caule e folha), em cada elemento estudado ($[total\ elem_x] = \frac{elem_x n_1 + elem_x n_2 + elem_x n_3}{3}$; $[elem_x n] = [elem_x n\ raiz] + [elem_x n\ caule] + [elem_x n\ folha]$). Calculou-se o fator de translocação (TF) pela divisão da concentração dos elementos na parte aérea (caules + folhas) pelos elementos presentes nas raízes ($[elem_{parte\ aérea}] \div [elem_{raízes}]$), segundo Bose and Bhattacharyya (2008).

Delineamento e análises estatísticas

Os experimentos foram dispostos em delineamento experimental de blocos casualizados. Para as análises realizadas no presente estudo, três vasos (repetições) foram observados em cada um dos cinco tratamentos e, em cada vaso, uma planta, totalizando quinze unidades experimentais (n = 15).

Os dados referentes à análise de rotina dos substratos em pós cultivo e dos teores de macro e micronutrientes e de sódio (Na) nas diferentes partes das plantas cultivadas

nos diferentes tratamentos foram analisados utilizando-se o modelo de Análise de Variância (ANOVA) seguida pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de confiança. Visando à obtenção de distribuição normal, os dados que não atenderam aos princípios da normalidade foram transformados pelo modelo de Box-Cox (Box and Cox, 1964), sendo posteriormente submetidos às análises. Os testes foram realizados com o auxílio do Software MINITAB® (2019).

As comparações das médias das variáveis dos substratos em pré e pós-cultivo foram realizadas pelo Teste t de Student pareado, ao nível de 5% de confiança. Nos casos de não atendimento dos pressupostos da ANOVA, utilizou-se o Teste t de Welch. A comparação dos teores de nutrientes nos tecidos (raízes, caules e folhas) em resposta aos tratamentos, foi realizada por ANOVA com dois fatores, ao nível de 5% de confiança. Quando os pressupostos não foram atendidos, os dados foram transformados utilizando log₁₀. Para essas análises e gráficos, utilizou-se os pacotes “car” (Fox & Weisberg, 2019) e “ggpubr” (Kassambara, 2020), por meio do software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022). Também foi utilizado o Software MINITAB® (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fertilidade dos substratos

As análises realizadas nos diferentes substratos, após 40 meses de cultivo com plântulas de *M. peruiiferum*, evidenciaram interferência negativa do aumento na proporção de rejeitos de minério de ferro sobre a fertilidade dos substratos de cultivo (Material Suplementar S1). Embora o desenvolvimento radicular não tenha sido comprometido pelo volume do vaso, a Cabreúva, por apresentar crescimento lento e ciclo longo, característico de espécies climáticas tardias, não alcançou seu ciclo reprodutivo durante o tempo avaliado, permanecendo em fase vegetativa durante o experimento.

O aumento da proporção de rejeitos de minério de ferro resultou em decréscimos nos valores médios nos pHs dos substratos (Figura 1A), com diferenças significativas (Material Suplementar S1) entre o grupo controle (0% de rejeito) e o substrato contendo 100% de rejeitos. Apesar de terem ocorrido reduções nos valores dos pHs em resposta ao aumento na proporção de rejeitos nos substratos, todos os tratamentos apresentaram valores de pHs próximos à neutralidade, na faixa considerada adequada para o desenvolvimento vegetal (Ribeiro et al., 1999). Comparando-se com os resultados da análise realizada antes da montagem dos experimentos, foi possível observar que o cultivo dos substratos com plantas de *M. peruiferum* promoveu uma ligeira elevação dos pHs dos mesmos nos tratamentos controle e 25% (Figura 5A). Embora a elevação não tenha sido significativa, os dados indicaram essa tendência nos demais tratamentos. Aumentos no pH podem influenciar na separação de grupos funcionais (carboxila, fenólica, alcoólica e carbonila) presentes nos colóides do solo, aumentando, assim, a possibilidade de adsorção à íons catiônicos essenciais, disponibilizando, conseqüentemente, mais nutrientes na solução do solo. Ao contrário, em pHs baixos (acidez elevada), os íons H^+ competem com os cátions essenciais no complexo coloidal de troca catiônica, reduzindo a fertilidade (Andrade et al., 2018; Ronquim, 2010).

A acidez potencial ($H + Al$) (Figura 1B) dos diferentes substratos apresentou valores médios muito baixos em todos os tratamentos analisados. Tal resultado pode ser atribuído à ausência de Al^{3+} nos substratos, tanto no solo fértil como nos rejeitos de minério de ferro puros da barragem de Fundão (Material Suplementar S1), condição que pode favorecer o estabelecimento das plantas no ambiente. A Cabreúva, após cultivo por 40 meses nos diferentes substratos, promoveu a redução nos valores de acidez potencial em todos os tratamentos, com diminuição significativa no grupo controle e a 25% de rejeitos de minério de ferro (Figura 5B).

A análise realizada em pós-cultivo, relacionada à composição dos macronutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas (N, P, K, Ca e Mg) nos substratos, mostrou um padrão de resposta bastante similar para os diferentes elementos (Figura 2). Os conteúdos médios desses nutrientes nos diferentes substratos reduziram na medida em que a proporção de rejeitos foi aumentada, alcançando os valores mais baixos no tratamento contendo 100% de rejeitos de minério de ferro, seguindo os mesmos padrões das análises realizadas em pré-cultivo (Tabela 2), demonstrando que os rejeitos de minério de ferro da barragem do Fundão não contribuíram para o aporte desses nutrientes para o substrato de cultivo. Uma tendência de diminuição de seus teores médios foi observada ao se comparar os teores de P, K, Ca e Mg nos substratos estudados, antes e após o cultivo com Cabreúva (Tabela 2 e Figura 2). Nos períodos analisados, reduções significativas nos conteúdos de Ca e Mg ocorreram somente nos materiais provenientes do tratamento controle (Figura 5E e 5F). Por sua vez, os teores de P apresentaram diferenças de conteúdo entre as amostras oriundas de pré- e pós-cultivo nos tratamentos controle, 25%, 50% e 75% (Figura 5C). Em todos os tratamentos, os conteúdos de K também diferiram significativamente entre os dois momentos avaliados (Figura 5D).

Mesmo sendo uma espécie tardia, de clímax, com crescimento lento e com baixa demanda inicial por nutrientes, os baixos níveis de macronutrientes essenciais encontrados após os 40 meses de cultivo indicam que o crescimento das plantas de Cabreúva pode ter sido influenciado pela lei do fator limitante (Lei do Mínimo de Liebig), segundo a qual a limitação do crescimento do vegetal ocorre por influência do elemento essencial cuja concentração é inferior a um valor mínimo, abaixo do qual as sínteses metabólicas são comprometidas (Danger et al., 2008).

Além de ser uma fonte de nutrientes para o meio de cultivo a partir da mineralização, a matéria orgânica (MO) do solo atua como um condicionador biofísico,

contribuindo para o aumento da porosidade, para a redução da densidade do solo e para a abundância de microrganismos benéficos (Ronquim, 2010; Andrade et al., 2018). O cultivo pode contribuir para o aumento desse importante componente, no entanto, análises realizadas após o plantio da Cabreúva demonstraram que os teores de matéria orgânica (Figura 3C) reduziram em resposta ao aumento na proporção de rejeitos de minério de ferro, alcançando percentuais mínimos nos tratamentos com 75 e 100% de rejeitos. Embora sem apresentar diferenças significativas, aumentos nos teores de MO foram observados apenas no tratamento controle (Figura 5I). O mesmo comportamento foi observado em relação aos valores da capacidade de troca catiônica ($CTC = T$) (Figura 3B) e da soma de bases (SB) nos substratos de cultivo (Figura 3A), que também apresentaram redução em resposta ao acréscimo de rejeitos de minério no substrato. Após o cultivo da planta, as médias de CTC, SB e MO apresentaram reduções significativas em relação aos dois períodos avaliados. Nas plantas dos controles, a CTC e a SB (Figuras 5G, 5H) diferiram significativamente entre os dois períodos avaliados, com médias menores sendo observadas após o cultivo nos cinco substratos. Para o conteúdo de MO (Figura 5I), as médias após o cultivo, foram significativamente menores nos tratamentos que continham 25% e 50% de rejeitos. Reduções nesses importantes parâmetros dos substratos refletem em diminuições nos teores de cátions essenciais permutáveis retidos à superfície dos colóides, com consequente queda na fertilidade dos substratos e na incapacidade desses materiais em atuarem como fontes de nutrientes para as plantas. Os resultados encontrados no presente estudo mostraram que o cultivo nos substratos contendo rejeitos de minério de ferro, mesmo na concentração mais baixa, promoveu maior extração do que incorporação de nutrientes ao substrato.

Em contraste ao observado para os demais parâmetros avaliados nas análises de nutrientes e de fertilidade dos substratos em condições de pós-cultivo, a concentração de

fósforo remanescente (P-rem) aumentou significativamente em resposta ao incremento na concentração de rejeitos de minério de ferro nos substratos de cultivo (Figura 3D). Quando os dois períodos analisados foram confrontados, observamos uma tendência de diminuição nas médias de P-Rem após o cultivo com *M. peruiiferum* em todos os tratamentos. Todavia, essa redução foi significativa ($p < 0,05$) somente nos substratos do grupo controle e na presença de 50 e 75% de rejeitos de minério de ferro (Figura 5J). Apesar da redução observada nas condições de pós-cultivo, os níveis de P-Rem ainda ficaram consideravelmente altos para o desenvolvimento vegetal (Ribeiro et al., 1999). A avaliação do conteúdo de P-rem permite estimar, indiretamente, a disponibilidade de P para as plantas, o que é feito a partir da quantificação do fósforo (P) em solução e do quanto foi adsorvido às frações do solo (Wadt and Silva, 2011). A capacidade de adsorção de um solo/substrato depende do conteúdo de matéria orgânica, da textura e da mineralogia da fração argila (Novais and Smyth, 1999). Os conteúdos reduzidos de argila e de matéria orgânica, observados em resposta ao aumento na proporção de rejeitos de minério nos substratos de cultivo (Tabela 1 e Figura 3D), resultaram em valores de P-rem mais elevados e, conseqüentemente, em menores disponibilidades de P, o que combinado com os baixos teores desse elemento nos tratamentos contendo proporções elevadas de rejeitos, evidenciou que os substratos, nessas condições, funcionaram mais como drenos de P do que como fontes desse elemento para as plantas.

O conteúdo dos metais cobre (Cu) e zinco (Zn) encontrados nos substratos após o cultivo são apresentados nas Figuras 4A e 4B. O Cu apresentou tendência inicial de aumento em seu conteúdo quando materiais provenientes do tratamento controle foram comparados com amostras oriundas do tratamento com 25% de rejeito. Todavia, embora as médias não tenham diferido entre si e os níveis desse elemento tenham se mantido em valores adequados, considerando as necessidades de desenvolvimento vegetal (Ribeiro et

al., 1999), a partir de 25% de rejeito observaram-se decréscimos no conteúdo desse elemento em resposta ao aumento na concentração de rejeitos nos substratos de cultivo. Em relação ao Zn, os resultados mostraram que, embora os teores desse elemento tenham se mantido estáveis quando o grupo controle foi comparado com materiais contendo 25% de rejeito, os teores de Zn reduziram em resposta ao aumento na concentração de rejeitos de minério de ferro nos substratos, alcançando os valores mais baixos na presença de rejeitos puros.

O conteúdo de manganês (Mn) nos substratos apresentou comportamento semelhante ao observado para o Cu, com um incremento de cerca de 100% nos teores desse elemento quando amostras do tratamento controle foram comparadas com materiais contendo 25% de rejeito. Todavia, a partir desta concentração, observaram-se decréscimos nos níveis desse elemento em resposta ao aumento na proporção de rejeitos de minério de ferro nos substratos. Esse resultado indica elevada capacidade de extração do Mn dos substratos de cultivo pelas plantas de *M. peruiiferum*, uma vez que, na presença de rejeitos de minério puros, o conteúdo de Mn alcançou valores menores que no tratamento controle.

Em contraste ao observado para os demais micronutrientes analisados nos substratos em pós-cultivo, os conteúdos de ferro (Fe) aumentaram significativamente em resposta ao incremento na proporção de rejeitos de minério de ferro nos substratos, com valores cada vez mais elevados, especialmente na presença de rejeitos de minério de ferro puros (Figura 4D).

Os conteúdos médios dos metais Cu, Zn e Fe biodisponíveis nos rejeitos, quando comparados nos dois períodos analisados, não apresentaram alterações significativas após 40 meses de cultivo com *M. peruiiferum* (Figuras 5K, 5L e 5N). O Mn, seguiu o mesmo

comportamento que o Fe, embora uma tendência de aumento nos valores médios tenha sido observada no material em pós-cultivo, com acréscimos significativos nos tratamentos controle e com 25% de rejeitos (Figura 5M). Devido a processos naturais de oxirredução no ambiente (Queiroz et al, 2018 e 2021), esse comportamento pode ser resultante do aumento na disponibilidade de Fe e, principalmente, do Mn presentes nos substratos de cultivo, uma vez que as plantas mantiveram a absorção desses elementos.

A maioria dos resultados das análises relacionadas aos parâmetros físico-químicos dos substratos realizados após 40 meses de cultivo de *M. peruiiferum*, evidenciaram efeitos negativos do incremento na proporção de rejeitos de minério de ferro nos substratos. Aumentos no aporte de rejeitos nos substratos resultaram em queda nos teores trocáveis de macro- (N, P, K, Ca, Mg) e micronutrientes (Zn e Cu), nos teores de matéria orgânica, na capacidade de troca catiônica ($CTC = T$) e na soma de bases trocáveis (SB), com os menores valores sendo observados principalmente nas amostras de rejeitos puros. Ao observarmos os resultados das análises dos substratos em pré- e pós-cultivo, percebe-se que o cultivo dos substratos após 40 meses com plantas de Cabreúva, não promoveu melhorias significativas nas condições físico-químicas dos substratos que pudessem se sobrepujar aos efeitos deletérios do aporte de rejeitos.

A baixa disponibilidade de nutrientes e os teores elevados de Mn, e principalmente, de Fe nos substratos de cultivo estão relacionados aos componentes minerais presentes nos resíduos da mineração de ferro, em especial à hematita (Hatje et al., 2017; Davila et al., 2019, Coelho et al., 2020), condição corroborada pelos resultados das análises realizadas no presente estudo. As características prejudiciais atribuídas aos conteúdos excessivos de Mn e Fe nos substratos contendo proporções mais elevadas de rejeitos se somam à estrutura física do rejeito, cuja classificação textural franco-arenosa, devido ao incremento na proporção de silte e areia fina, e à redução na quantidade de

argila, afeta diretamente a porosidade e a densidade de suas partículas (EMBRAPA, 2015; Cruz et al., 2020). Ao se analisar os aspectos de qualidade do solo para o cultivo vegetal, o aspecto físico-estrutural é muito importante, sendo um fator limitante, em potencial, nos programas de revegetação de áreas impactadas (Prado et al., 2019; Coelho et al., 2020), conforme observado no presente estudo nos substratos ricos em rejeitos de minério de ferro antes do cultivo com *M. peruiferum* (Tabela 2). Embora Cruz et al. (2020) tenham argumentado que o principal limitante ao desenvolvimento das plantas seja a baixa fertilidade dos rejeitos de minério de ferro, conforme ressaltado por Andrade et al. (2018), nós também anuímos que os teores elevados de areia fina e de silte, em contraposição aos baixos teores de argila e matéria orgânica nos rejeitos, em adição aos valores elevados de densidade de partículas e do solo resultam em expressivo adensamento e compactação dos Tecnosolos formados nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão. Esse novo solo, constituído por quantidades significativas de materiais criados ou fortemente alterados decorrentes da atividade antrópica, especialmente da mineração (Rossiter, 2007), pode prejudicar fisicamente o crescimento e desenvolvimento das raízes, bem como a percolação de água no perfil do solo e, conseqüentemente, a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Os resultados do presente estudo indicam que a melhoria das condições físicas do rejeito (alcançada com o aumento de frações estruturais de maior tamanho e com a incorporação de matéria orgânica) é condição fundamental para o sucesso na recuperação das áreas degradadas pelo rompimento da barragem de rejeitos de Fundão

Composição mineral de tecidos das raízes, caules e folhas de *Myroxylon peruiferum* L.f

Os níveis de nitrogênio (N) e fósforo (P) (Figura 6) reduziram significativamente nas raízes e nos caules da Cabreúva em resposta ao incremento na proporção de rejeitos

de minério de ferro nos substratos. Todavia, de maneira singular, nas folhas, que correspondem aos órgãos fonte de fotoassimilados e de maior atividade metabólica, os níveis dos principais macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg), avaliados no presente estudo, não variaram entre os tratamentos (Figura 6). Quando os conteúdos dos elementos essenciais, nas diferentes partes das plantas, foram comparados em relação aos tratamentos, observaram-se maiores acúmulos dos mesmos nas folhas (Figura 8A; 8B; 8C; 8D; 8E; Material Suplementar S2). Tal resultado indica elevada eficiência na partição dos nutrientes, uma vez que o fluxo e acúmulo desses elementos nas folhas da Cabreúva foi priorizado, condição que favorece à manutenção da atividade metabólica das plantas mesmo quando cultivadas em substratos nutricionalmente pobres, contendo proporções elevadas de rejeitos de minério de ferro. Esses resultados reforçam a importância da Cabreúva como espécie com elevado potencial para uso em áreas degradadas e pobres em nutrientes minerais (Carlos et al., 2009; Resende et al., 1999), especialmente nas áreas impactadas pelo rompimento da barragem de minério de ferro de Fundão.

Em comparação com as plantas do tratamento controle, amostras oriundas de tecidos das raízes apresentaram redução significativa nos conteúdos de N (Figura 6). Nessa parte das plantas, os níveis mais baixos desse macronutriente foram observados na presença de rejeito de minério puro. Os níveis de P variaram em relação ao controle apenas nos tecidos dos caules (Figura 6), com reduções significativas no seu conteúdo a partir da proporção de 25% de rejeitos e, especialmente, na concentração de 75% de rejeitos, que, por sua vez, não diferiu dos valores encontrados na presença de rejeitos puros.

Em relação aos demais macronutrientes analisados, observou-se que, independentemente da parte da planta analisada, os níveis de K, Ca e Mg não variaram em relação ao controle em resposta ao incremento na proporção de rejeitos de minério de

ferro nos substratos de cultivo (Figura 6), fato que reforça o potencial de uso da Cabreúva na recuperação das áreas impactadas pelo rompimento da barragem de minério de ferro de Fundão, nas margens do Rio Gualaxo.

Mesmo que os níveis de Zn nos tecidos das raízes, caules e folhas não tenham variado significativamente nos diferentes tratamentos em comparação aos controles (Figura 7), os teores desses elementos mostraram tendências de redução em resposta ao aumento na concentração de rejeitos nos substratos de cultivo. Tal como observado por Soares (2001), mesmo na parte aérea, onde a variação no conteúdo de Zn foi menor em resposta aos diferentes tratamentos, os níveis encontrados nos tecidos sugerem mais a deficiência desse micronutriente no metabolismo do que uma possível fitotoxidez para plantas de *M. Peruiferum*, caso elas sejam estabelecidas em áreas afetadas por rejeitos da barragem de minério de ferro de Fundão. A partir da comparação das concentrações de Zn nos tecidos das plantas nos diferentes tratamentos, observou-se que a distribuição desse elemento na parte aérea (caules e folhas) foi significativamente maior do que nos tecidos das raízes (Figura 8H). Esse resultado indica uma maior alocação desse metal na parte aérea das plantas, independentemente da concentração de rejeitos no substrato de cultivo (Material Suplementar S3).

O cobre (Cu) foi o único micronutriente que apresentou reduções significativas em seu conteúdo nos tecidos foliares da Cabreúva em resposta ao aumento na proporção de rejeitos de minério de ferro no substrato de cultivo, com acúmulos menores nos tecidos nas plantas cultivadas na presença de rejeitos puros (Figura 7). Essa resposta pode ser devida aos baixos teores de Cu nos substratos contendo rejeitos, somados à distribuição desse metal nos tecidos da planta, cujo maior acúmulo ocorreu nas raízes, seguido do acúmulo nas folhas e, por fim, nos caules (Figura 8F), mostrando a tendência de *M. Peruiferum* em bioacumular o Cu nas suas raízes (Marques et al., 2018).

No presente estudo, o ferro (Fe) foi o micronutriente que apresentou aumentos mais expressivos na sua concentração nos tecidos das raízes e dos caules das plantas em resposta ao incremento na proporção de rejeitos de minério de ferro nos substratos de cultivo. Nas raízes, os conteúdos acumulados de Fe foram mais elevados do que no grupo controle a partir da proporção de 25% de rejeitos de minério de ferro, atingindo o maior valor ao nível de 75% de rejeitos, seguido, todavia, de um decréscimo na presença de rejeitos puros (Figura 7, Material Suplementar S2). Um expressivo acúmulo de Fe ocorreu nos caules das plantas crescidas na presença de rejeitos puros. A partir da comparação das concentrações de Fe nos tecidos das plantas nos diferentes tratamentos, constatou-se que esse metal se concentrou principalmente nas raízes das plantas, independentemente da proporção de rejeitos de minério de ferro nos substratos de cultivo (Figura 8G). Uma tendência de diminuição do acúmulo de Fe nas raízes e um respectivo aumento desse elemento nos caules das plantas foram observados nos materiais provenientes de plantas cultivadas na presença de rejeitos de minério puros, resultado que evidencia uma elevada taxa de translocação para a parte aérea desse elemento nas plantas cultivadas na presença de rejeitos puros (Material Suplementar S3). No entanto, esses resultados mostram que, quando cultivadas sobre rejeitos de minério puros, as plantas de *M. peruiiferum* ainda priorizam o acúmulo desse metal em tecidos das raízes, seguido dos caules, uma estratégia que minimiza o transporte e acúmulo de concentrações elevadas de Fe nas folhas, órgão de maior atividade metabólica das plantas, onde a sua fitotoxidez poderia se manifestar mais fortemente. Trata-se, provavelmente, de uma estratégia de tolerância dessa espécie aos danos potenciais causados pelo excesso de Fe nos seus tecidos metabolicamente mais ativos.

Embora o Fe seja um elemento essencial para o ciclo de vida das plantas, quando em excesso, pode afetar negativamente o desempenho das atividades fisiológicas nos

tecidos vegetais, alterando o metabolismo de carbono, a atividade de enzimas, a respiração e a eficiência fotossintética, além de promover o estresse oxidativo devido à geração de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Onyango et al., 2019; Xing et al., 2010).

Por sua vez, os níveis de Mn acumulados nos tecidos das diferentes partes das plantas aumentaram em resposta ao incremento na proporção de rejeitos nos substratos de cultivo. Em comparação às plantas do grupo controle, os maiores acúmulos de Mn nas plantas crescidas sobre rejeitos de minério puros ocorreram nas folhas e nos caules das plantas, com acréscimos próximos a 550% e 360%, respectivamente (Material Suplementar S2). No entanto, nos tecidos foliares, as diferenças entre os tratamentos não foram significativas ($p > 0,05$), o que provavelmente ocorreu devido à variação elevada nos dados nas repetições. Nas raízes, o Mn apresentou maior acúmulo no tratamento com 75% de rejeitos. Nos caules, o acúmulo desse elemento foi significativamente maior sobre rejeitos puros (tratamento com 100% de rejeitos) (Figura 7). A partir da comparação das concentrações de Mn nos tecidos das plantas nos diferentes tratamentos, observou-se uma tendência de maior acúmulo desse metal em tecidos específicos, dependendo do nível de rejeitos nos substratos (Figura 8I). Até o nível de 75% de rejeitos, o Mn acumulou-se principalmente nas raízes, fato corroborado pelas menores taxas de translocação do elemento para a parte aérea, nesses tratamentos. Todavia, no tratamento contendo rejeitos puros, observou-se uma tendência de maior acúmulo desse metal nos caules das plantas, fato que contribuiu para a maior taxa de translocação do Mn para a parte aérea nesse tratamento (Material Suplementar S3).

O Mn participa de diversos processos fisiológicos, incluindo a fotossíntese, mas sempre em pequenas quantidades. Em concentrações elevadas, esse micronutriente pode se tornar tóxico (Millaleo et al., 2010). Embora os níveis de concentração em que o Mn cause a fitotoxidez para espécies arbóreas ainda não tenham sido claramente

estabelecidos, Zemunik et al. (2018) relataram que leguminosas podem ser mais sensíveis ao Mn do que outras espécies arbóreas cultivadas sob condições de excesso de Mn (a partir de 460 mg de Mn kg⁻¹ solo). Essa concentração, todavia, é consideravelmente superior às encontradas mesmo nos rejeitos de minério puros da barragem de Fundão (Material Suplementar S1). Em adição, os níveis de Mn observados nas folhas de Cabreúva, foram inferiores aos níveis críticos de toxicidade estabelecidos para folhas de outras espécies mais estudadas, como, por exemplo, soja, milho, algodão e girassol (El-Jaoual and Cox, 1998). Considerando a tendência de acúmulo de Mn na parte aérea (Millaleo et al., 2010), plantas de *M. peruiiferum* apresentam potencial para o desenvolvimento nas áreas afetadas pelos rejeitos da barragem de Fundão ao acumular Mn principalmente nos tecidos das raízes e caules (Figuras 7 e 8I).

Todavia, embora as plantas de *M. peruiiferum* demonstrem potencial para uso como espécie fitoextratora (ou fitoacumuladora) de Fe e Mn, por conseguirem absorver, transportar e armazenar esses metais na sua parte aérea (Menegaes, 2015), características desejáveis para o desenvolvimento de plantas em áreas afetadas pelo rompimento de barragens de rejeitos de minério de ferro, seu cultivo nessas condições pode afetar negativamente o metabolismo das plantas e, conseqüentemente, o sucesso de seu estabelecimento nesses ambientes.

De modo similar ao observado por Coelho et al. (2020) ao analisar uma gramínea forrageira cultivada sob amostras do rejeito da barragem de rejeitos de minério de ferro da barragem do Fundão, a concentração dos micronutrientes nos tecidos de *M. peruiiferum* (planta inteira) seguiu a tendência de acúmulo Fe>Mn>Zn>Cu (Material Suplementar S3) em todos os tratamentos avaliados, indicando que, o cultivo na presença de rejeitos não promoveu alterações no padrão característico de acúmulo desses elementos nas plantas, corroborando a hipótese de que fatores abióticos não interferem diretamente nessa ordem

de acúmulo (Wang et al., 2018). Por sua vez, quando comparadas ao grupo controle, a Cabreúva cultivada na presença de rejeitos puros apresentou alterações quantitativas na concentração dos micronutrientes na planta inteira, com maior acúmulo de Fe e Mn, especialmente na presença de 75% de rejeitos (Material Suplementar S3).

Devido a utilização do hidróxido de sódio (NaOH) no processo de tratamento do minério de ferro (Milanez et al., 2015), o sódio (Na) também foi analisado no presente estudo. Apesar de não ser considerado um nutriente essencial ao desenvolvimento vegetal, o Na pode ser considerado benéfico, por sua contribuição para o aumento da produtividade de algumas espécies vegetais (Korndorfer, 2006). No presente estudo, a Cabreúva demonstrou-se indiferente em relação ao acúmulo desse elemento. Nenhuma diferença foi observada nos tecidos das raízes, caules e folhas em termos de acúmulo de Na entre os tratamentos (Material Suplementar S2).

A composição físico-química dos rejeitos de minérios de ferro observada no presente estudo foi semelhante à encontrada em outros trabalhos realizados com materiais provenientes da barragem do Fundão (Silva et al., 2016; Zago et al., 2019; Esteves et al., 2020). Em contraste ao observado no presente estudo, Andrade et al. (2018) encontraram níveis elevados de Cu nas análises dos rejeitos, embora, abaixo dos níveis críticos recomendados pela Regulamentação Brasileira (CONAMA, 2009). Esses resultados corroboram com as observações de que a baixa fertilidade, o baixo teor de matéria orgânica e, principalmente, as características físicas e estruturais do Tecnosolo proveniente da barragem se apresentam como potencial limitante ao estabelecimento vegetal nas áreas afetadas.

As quantidades elevadas de Mn e Fe biodisponíveis, encontradas especialmente na presença de proporções mais elevadas de rejeitos nos substratos de cultivo, conforme

relatado por Coelho et al. (2020), apontam para o potencial tóxico desses elementos para o metabolismo das plantas cultivadas nos locais afetados pelo desastre da barragem de Fundão. Como resultado dos níveis elevados nos substratos de cultivo, conteúdos também elevados de Fe e Mn foram encontrados em amostras vegetais em diversos estudos (Coelho et al., 2020; Andrade et al., 2018; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020), situação que desperta a atenção para possíveis efeitos fitotóxicos e deletérios em longo prazo, uma vez que processos naturais e contínuos de oxirredução no ambiente (causados pelo aumento na umidade do ambiente e queda no pH), geralmente levam ao aumento na disponibilidade e na bioacumulação de Fe e Mn, o que pode resultar em uma contaminação crônica (Queiroz et al., 2018 e 2021). Nesse sentido, as análises dos tecidos vegetais de *M. peruiiferum* cultivada em diferentes concentrações de rejeitos, mostraram uma elevada eficácia dessa espécie em se estabelecer nos ambientes atingidos pela lama, considerando o acúmulo desses elementos em suas raízes e caules, evitando, conseqüentemente, o alcance de níveis possivelmente tóxicos às folhas.

As análises realizadas considerando as diferentes proporções de rejeito nos substratos de cultivo não encontraram concentrações elevadas de metais reconhecidamente tóxicos, como cobre (Cu), níquel (Ni), cromo (Cr), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) (Tabela 2), evidenciando não haver restrição ao estabelecimento das plantas no ambiente em relação a esses metais pesados. No entanto, as plantas de *M. peruiiferum* foram influenciadas negativamente pelo aumento na proporção de rejeitos de mineração, o que pode ser devido às características físicas do Tecnosolo formado, o que comprometeu o desenvolvimento radicular e a exploração de um maior volume de substrato pelas raízes. Mesmo sob baixa disponibilidade no substrato, como uma espécie secundária tardia, os níveis de nutrientes essenciais permaneceram estáveis nas folhas de *M. peruiiferum*. Além disso, por absorver e acumular esses elementos em níveis elevados

em seus tecidos, essa leguminosa arbórea apresentou características que potencializam o seu uso como fitoextratora de Fe e Mn. Apesar de apresentar características positivas para a sua utilização direta em processos de revegetação em áreas impactadas por rejeitos de minério de ferro, o aporte de solos/substratos férteis e de matéria orgânica nas áreas afetadas, reduzindo, conseqüentemente, a compactação do solo na região de crescimento das raízes e aumentando a fertilidade, em longo prazo, se mostra essencial para um bom estabelecimento dessa espécie nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro de Fundão.

CONCLUSÃO

Conclui-se, portanto, que os rejeitos de minério de ferro interferem negativamente na fertilidade dos substratos e, que o seu cultivo, após 40 meses, com plantas de Cabreúva, não promoveu melhorias significativas nas condições físico-químicas;

Aumentos no aporte de rejeitos nos substratos resultaram em incremento nos conteúdos de ferro (Fe) e manganês (Mg) e em queda nos teores trocáveis de macro- (N, P, K, Ca, Mg) e micronutrientes (Zn e Cu), nos teores de matéria orgânica (MO), na capacidade de troca catiônica ($CTC = T$) e na soma de bases trocáveis (SB), com os menores valores sendo observados nos rejeitos puros;

A baixa fertilidade, o reduzido teor de matéria orgânica e, principalmente, as características físicas e estruturais do Tecnossolo formado se apresentam como potencial limitante ao estabelecimento vegetal nas áreas afetadas;

Independentemente da parte da planta analisada (raízes, caules e folhas), os níveis dos macronutrientes K, Ca e Mg não variaram em resposta ao incremento na proporção

de rejeitos de minério de ferro, já os teores de N e P mantiveram-se inalterados entre os tratamentos nas folhas da Cabreúva;

O acúmulo de Cu ocorreu predominantemente nos tecidos das raízes, seguido das folhas e, por fim, dos caules da Cabreúva;

Acúmulos de Fe e Mn ocorreram em tecidos específicos, dependendo do nível de rejeitos nos substratos. Até o nível de 75% de rejeitos, esses metais acumularam-se nos tecidos das raízes mas, na presença de 100% de rejeitos, nos tecidos dos caules da Cabreúva;

A concentração dos micronutrientes nos tecidos da Cabreúva (planta inteira) seguiu a tendência de acúmulo Fe>Mn>Zn>Cu em todos os tratamentos avaliados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG; projeto CRA - APQ-01187-16, Chamada 04/2016 - Tecnologias para a Recuperação da Bacia do Rio Doce) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A primeira autora recebeu bolsa de estudos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Agradecemos também ao Instituto de Ciências Biológicas e ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza, da Universidade Federal de Juiz de Fora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. (2018). Agricultural use of Samarco's spilled mud assessed by rice cultivation: A promising residue use? *Chemosphere*, 193, 892-902. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.099>
- Araújo, B. D., Maia, R., Arantes-Garcia, L., Oki, Y., Negreiros, D., Assis, I. R. de, & Fernandes, G. W. (2022). Aftershocks of the Samarco disaster: diminished growth and increased metal content of *Raphanus sativus* cultivated in soil with mining tailings. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 44(1), e59175. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v44i1.59175>
- Barroso, D. G., Souza, M. G. O. D. S., Oliveira, T. P. D. F. D., & Siqueira, D. P. (2018). Growth of atlantic forest trees and their influence on topsoil fertility in the southeastern Brazil. *Cerne*, 24, 352-359. <https://doi.org/10.1590/01047760201824042605>
- Bose, S., & Bhattacharyya, A. K. (2008). Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge. *Chemosphere*, 70(7), 1264-1272. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.062>
- Botelho, S. A., Davide, A. C., & Faria, J. M. R. (1996). Desenvolvimento inicial de seis espécies florestais nativas em dois sítios, na região sul de Minas Gerais. *Cerne*, 2(1), 43-52. <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/18332>
- Box, G. E., & Cox, D. R. (1964). An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 26(2), 211-243. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>
- Caires, S. M., Fontes, M. P. F., Fernandes, R. B. A., Neves, J. C. L., Fontes, R. L. F. (2011). Desenvolvimento de mudas de cedro-rosa em solo contaminado com cobre: tolerância e potencial para fins de fitoestabilização do solo. *Revista Árvore*, 35-6. 1181-1188. <https://www.scielo.br/j/rarv/a/c4hFnn5Yc34pmqkJMMFz3wM/?lang=pt&format=pdf>
- Carlos, L.; Venturin, N.; Costa Filho, F. P.; Macedo, R. L. G., Higashikawa, E.M., Garcia, M.B., & Sá Farias, E. (2009). *Teores de nutrientes em mudas de óleo-bálsamo* [Conference paper]. XVIII Congresso de Pós-Graduação da Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil, https://www.researchgate.net/profile/Mauro-Garcia-3/publication/235941038_TEORES_DE_NUTRIENTES_EM_MUDAS_DE_OLEO-BALSAMO/links/09e4151489502c6065000000/TEORES-DE-NUTRIENTES-EM-MUDAS-DE-OLEO-BALSAMO.pdf
- Chang, A. C., Page, A. L., Warneke, J. E., Grgurevic, E. (1984). Sequential extraction on soil heavy metals following a sludge application. *Journal of Environmental Quality*, v.13, 33-38. <https://doi.org/10.2134/jeq1984.00472425001300010006x>

- Coelho, D. G., Marinato, C. S., Matos, L. P., Andrade, H. M., da Silva, V. M., Neves, P. H. S., & Oliveira, J. A. (2020). 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*, 16(5), 596-607. <https://doi.org/10.1002/ieam.4253>
- CONAMA (2009). *Resolução n. 420, de 28 de dezembro de 2009*. Dispõe sobre critérios e valores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente.
- Coutinho, H. D., & Barbosa, A. R. (2007). Fitorremediação: considerações gerais e características de utilização. *Revista Silva Lusitana*, 15- 1, 103-117.
- Cruz, F. V. S., Gomes, M. P., Bicalho, E. M., Della Torre, F., & Garcia, Q. S. (2020). Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic Rainforest? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 110021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110021>
- Danger, M., Daufresne, T., Lucas, F., Pissard, S., & Lacroix, G. (2008). Does Liebig's law of the minimum scale up from species to communities? *Oikos*, 117(11), 1741–1751. doi:10.1111/j.1600-0706.2008.16793.x
- Davila, R. B., Fontes, M. P. F., Pacheco, A. A., & da Silva Ferreira, M. (2020). Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil. *Science of the Total Environment*, 709, 136151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136151>
- El-Jaoual, T., & Cox, D. A. (1998). Manganese toxicity in plants. *Journal of Plant Nutrition*, 21(2), 353-386. <https://doi.org/10.1080/01904169809365409>
- EMBRAPA (2015). Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG: Apoio ao plano de recuperação agropecuária.
- Esteves, G. F., Souza, K. R. D., Bressanin, L. A., Andrade, P. C. C., Júnior, V. V., Reis, P. E., & Souza, T. C. (2020). Vermicompost improves maize, millet and sorghum growth in iron mine tailings. *Journal of Environmental Management*, 264, 110468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110468>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An {R} Companion to Applied Regression*. Thousand Oaks CA: Sage.
- Freitas, J.C.E., Resende, C.F., Pimenta, M.P., Frattini, L.M., Reis, P.R.C., Miranda, J.B., 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* (in Press, 2023).
- Hatje, V., Pedreira, R., Rezende, C. E., Schettini, C. A. F., Souza, G. C., Marin, D. C., & Hackspacher, P. C. (2017). The environmental impac

ts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>

IBAMA (2020). *Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Retrieved Jan, 2022, from <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2020/rompimento-da-barragem-de-fundao-documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg>

Kassambara, A. (2020). ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots. R package version 0.4.0.

Korndorfer, G. H. (2006). Elementos benéficos. In: Fernandes, M. S. (Ed.). *Nutrição Mineral de Plantas* (pp. 355-374). Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Marques, D. M., Silva, A. B., Mantovani, J. R., Pereira, D. S., & Souza, T. C. (2018). Growth and physiological responses of tree species (*Hymenaea courbaril* L., *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. and *Myroxylon peruiferum* LF) exposed to different copper concentrations in the soil. *Revista Árvore*, 42. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000200002>

Marques, M., Aguiar, C. R. C., Silva, J. J. L. S. (2011). Desafios, técnicas e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35- 1. 1-11. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100001>

Matos, L. P., Andrade, H. M., Marinato, C. S., Oliveira Prado, I. G., Coelho, D. G., Montoya, S. G., & Oliveira, J. A. (2020). Limitations to use of *Cassia grandis* L. in the revegetation of the areas impacted with mining tailings from Fundão Dam. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(3), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04479-0>

Menegaes, J. F. (2015). *Avaliação do potencial fitorremediador de plantas floríferas em solo contaminado com cobre* (122p.). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS: Centro de Ciências Rurais. <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7612/MENEGAES%2C%20JANINE%20FARIAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Milanez, B., Santos, R. S. P., Wanderley, L. J. M., Mansur, M. S., Pinto, R. G., Gonçalves, R. J. A. F., & Coelho, T. P. (2015). PoEMAS: Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG). *Mimeo*. <https://www.ufjf.br/poemas/files/2014/07/PoEMAS-2015-Antes-fosse-mais-leve-a-carga-vers%C3%A3o-final.pdf>

Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A. G., Mora, M. L., & Alberdi, M. (2010). Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(4), 470-481. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>

MINITAB® (2019). *Minitab® 19 Statistical Software*.

- MPF (2022). *Caso Samarco*. Ministério Público Federal. Retrieved Apr, 2022, from <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/apresentacao>
- Novais, R. D., & Smyth, T. J. (1999). *Fósforo em solo e planta em condições tropicais* (399p.). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG: Departamento de Solos.
- Oliveira, L. L. F., dos Santos, H. B., Thomé, R. G., & Chequer, F. M. D. (2021). Efeitos tóxicos à saúde humana e ao ambiente causados pelo derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão. *Journal of Health & Biological Sciences*, 9(1), 1-17. <http://dx.doi.org/10.12662/2317-3076jhbs.v9i1.3535.p1-17.2021>
- Onyango, D. A., Entila, F., Dida, M. M., Ismail, A. M., & Drame, K. N. (2018). Mechanistic understanding of iron toxicity tolerance in contrasting rice varieties from Africa: 1. Morpho-physiological and biochemical responses. *Functional Plant Biology*, 46(1), 93-105. <https://doi.org/10.1071/FP18129>.
- Pinto-Coelho, R. M. (2015). Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG). *Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG*, 24(1-2). <https://periodicos.ufmg.br/index.php/mhnbj/article/view/6260>
- Prado, I. G. O., da Silva, M. D. C. S., Oliveira Prado, D. G., Kemmelmeier, K., Pedrosa, B. G., da Silva, C. C., & Kasuya, M. C. M. (2019). Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 141, 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.008>
- Queiroz, H. M., Nóbrega, G. N., Ferreira, T. O., Almeida, L. S., Romero, T. B., Santaella, S. T., Bernardino, A. F., & Otero, X. L. (2018). The Samarco mine tailing disaster: A possible time-bomb for heavy metals contamination? *Science of The Total Environment*, 637-638. 498-506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.370>
- Queiroz, H. M., Ying, S. C., Abernathy, M., Barcellos, D., Gabriel, F. A., Otero, X. L., Nóbrega, G. N., Bernardino, A. F., & Ferreira, T. O. (2021). Manganese: The overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse. *Environment International*. 146, 106284. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106284>
- R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Resende, Á. V. D., Furtini Neto, A. E., Muniz, J. A., Curi, N., & Faquin, V. (1999). Initial growth of forest species of different successional groups in response to phosphorus doses. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34, 2071-2081. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001100014>
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., Alvarez, V. V. H. (1999). 5ª Aproximação - Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. *Editora UFV*, 359p. <https://www.editoraufv.com.br/produto/5-aproximacao-recomendacoes-para-o-uso-de-corretivos-e-fertilizantes-em-minas-g/1109073>

- Ronquim, C. C. (2010). Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. *Embrapa, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 8, 26p. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>
- Rossiter, D.G. (2007). Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soil resources. *Journal Soils Sediments* 7, 96–100. <https://doi.org/10.1065/jss2007.02.208>
- Santos, J. Z. L., Resende, Á. V. D., Furtini Neto, A. E., & Corte, E. F. (2008). Crescimento, acúmulo de fósforo e frações fosfatadas em mudas de sete espécies arbóreas nativas. *Revista Árvore*, 32, 799-807. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000500003>
- Schaefer, C. E. G. R., dos Santos, E. E., Souza, C. M., Neto, J. D., Fernandes Filho, E. I., & Delpupo, C. (2015). Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. *Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG*, 24(1-2). <https://periodicos.ufmg.br/index.php/mhnpj/article/view/6263>
- Schwarcz, K. D., Silvestre, E. A., Campos, J. B., Sujii, P. S., Grando, C., Macrini, C. M. T., Souza, A. P., Pinheiro, J. B., Brancalion, P. H. S., Rodrigues, R. R., & Zucchi, M. I. (2018). Shelter from the storm: Restored populations of the neotropical tree *Myroxylon peruiferum* are as genetically diverse as those from conserved remnants. *Forest Ecology and Management*, 410, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.037>
- SEDRO (2016). Secretaria do Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. *Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG*. Governo do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- Silva, K. D. A., Martins, S. V., Miranda Neto, A., Demolinari, R. D. A., & Lopes, A. T. (2016). Restauração florestal de uma mina de bauxita: avaliação do desenvolvimento das espécies arbóreas plantadas. *Floresta e Ambiente*, 23, 309-319. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.142515>
- Silvério, P. F. (2003). *Bases técnico-científicas para a derivação de Valores-Guia de Qualidade de Sedimentos para metais: Experimentos de campo e laboratório* (145p.). Universidade de São Paulo, São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-04042005-234116/publico/Patricia_Silverio_.pdf
- Soares, C. R. F. S., Accioly, A. M. A., Marques, T. C. L. L. S. M., Siqueira, J. O., & Moreira, F. M. S. (2001). Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 13, 302-315. <https://doi.org/10.1590/S0103-31312001000300006>
- Wadt, P. G. S.; & Silva, L. M. (2011). Determinação do fósforo remanescente para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Acre. *Embrapa Acre-*

Comunicado *Técnico* (INFOTECA-E).
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/56659/1/24134.PDF>

- Wang, R., Wang, X., Jiang, Y., Cerdà, A., Yin, J., Liu, H., Feng, X., Shi, Z., Dijkstra, F. A., & Li, M. H. (2018). Soil properties determine the elevational patterns of base cations and micronutrients in the plant–soil system up to the upper limits of trees and shrubs. *Biogeosciences*, *15*(6), 1763-1774. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1763-2018>
- Xing, W., Li, D., & Liu, G. (2010). Antioxidative responses of *Elodea nuttallii* (Planch.) H. St. John to short-term iron exposure. *Plant Physiology and Biochemistry*, *48*(10-11), 873-878. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.006>
- Zago, V. C. P., das Dores, N. C., & Watts, B. A. (2019). Strategy for phytomanagement in an area affected by iron ore dam rupture: A study case in Minas Gerais State, Brazil. *Environmental Pollution*, *249*, 1029-1037. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.060>
- Zemunik, G., Davies, S. J., & Turner, B. L. (2018). Soil drivers of local-scale tree growth in a lowland tropical forest. *Ecology*, *99*(12), 2844-2852. <https://doi.org/10.1002/ecy.2532>

Tabela 1. Constituição dos tratamentos contendo diferentes proporções de substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão.

Tratamentos (%)	Constituição substrato	
	Substrato fértil: rejeito de mineração (v:v)	
0 (controle)	100:0	
25	75:25	
50	50:50	
75	25:75	
100	0:100	

Tratamento 0%: substrato fértil e nenhuma adição de rejeito de minério de ferro puro;
 Tratamento 25%: proporção de 75% de substrato fértil para 25% de rejeito puro;
 Tratamento 50%: 50% de substrato fértil e 50% de rejeito puro; Tratamento 75%: 25%
 de substrato fértil para 75% de rejeito puro; Tratamento 100%: exclusivamente de rejeito
 de minério de ferro puro.

Tabela 2. Resultados referentes às análises de rotina, textura, porosidade e de elementos minerais em substratos preparados com diferentes proporções de um substrato fértil e rejeitos de minério de ferro da barragem de Fundão em condições de pré-plantio.

Parâmetro	Rejeito (%)				
	0	25	50	75	100
pH	6.3 a	6.35a	6.06a	6.35a	6.03a
H+Al(cmol/kg)	2.03 a	1.66a	1.6ab	1.1bc	0.6c
CTC (cmol/kg)	11.27a	9.28a	7.38ab	4.49bc	1.28c
MO (dag/kg)	2.52a	2.46a	1.78b	1.08c	0.29d
Argila (dag/kg)	28.5a	22.50b	16.50c	12.5d	6e
Silte (dag/kg)	6.5e	14d	20.50c	27.5b	38a
Areia (dag/kg)	65a	63.5ab	63b	60c	56d
DP (g/cm ³)	2.65c	2.673c	2.93ab	2.88b	3.1a
DS (g/cm ³)	1.27d	1.38c	1.46b	1.46b	1.53a
Elemento mineral					
N (dag/kg)	0.11a	0.08ab	0.06bc	0.06c	0.03d
P (mg/kg)	31.87a	30.68a	22.59b	16c	8.08d
K (mg/kg)	369.5a	314.1a	246.9ab	114.65bc	22.21c
Ca (cmol/kg)	8.38a	6.88ab	5.52ab	3.43bc	1.02c
Mg (cmol/kg)	1.91a	1.56a	1.20ab	0.72bc	0.16c
Cu (mg/kg)	2.9a	2.85a	2.49a	2.09a	1.51a
Fe (mg/kg)	66b	73.8b	104b	168.9b	337.4a
Mn (mg/kg)	54.82b	85.3b	113.8ab	113.3ab	161.3a
Zn (mg/kg)	21.06a	19.03a	13.84ab	7.51bc	3.11c
Ni (mg/kg)	1.26a	1.57a	2.28a	1.73a	2.02a
Cr (mg/kg)	3.11a	2.95a	2.49ab	1.37bc	0.17c
Cd (µg/kg)	0.81a	0.7a	0.51a	0.36a	0.17a
Pb (mg/kg)	0.58a	0.48a	0.76a	0.76a	0.43a
Na (mg/kg)	24.41a	25.07a	21.12a	11.26b	0c

As médias, nas linhas, seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey (p -valor $\leq 0,05$). H+Al, acidez potencial; CTC, capacidade de troca catiônica; MO, matéria orgânica; DS, densidade do solo; DP, densidade de partículas. Fonte: Resultados obtidos por Freitas et al. (2023, no prelo).

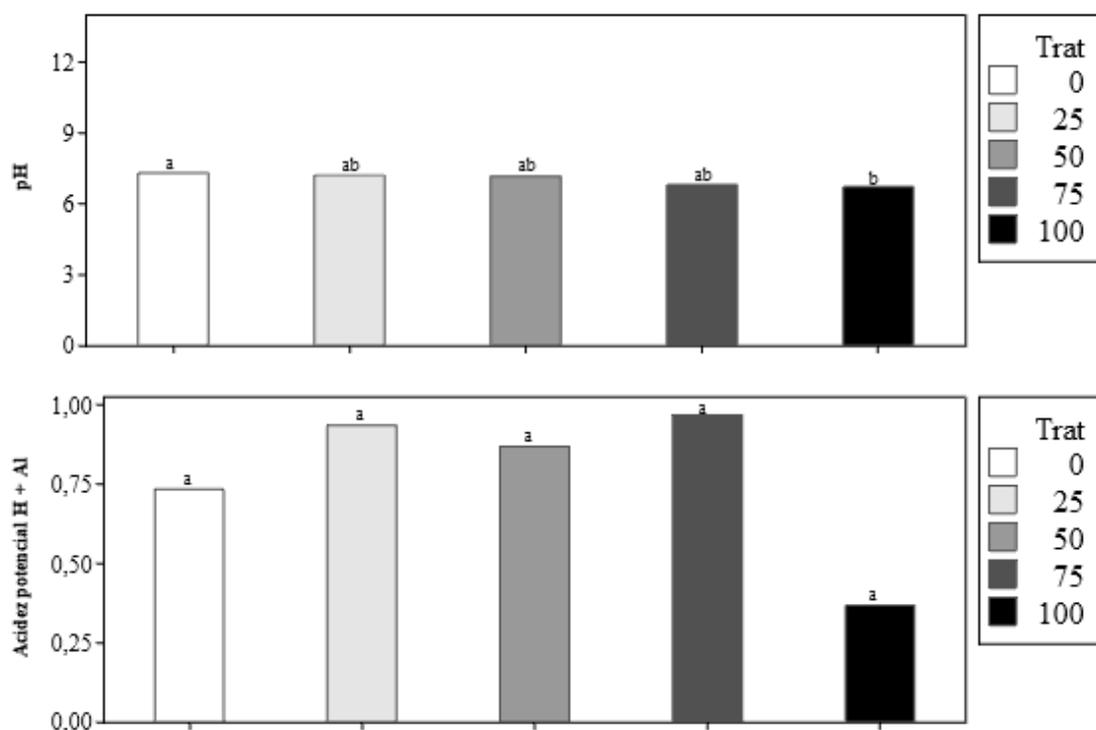


Figura 1. Médias dos valores de pH em H₂O e de Acidez potencial - H+Al (cmol_c/dm³) em substratos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, cultivados por 40 meses com *M. peruiiferum*. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

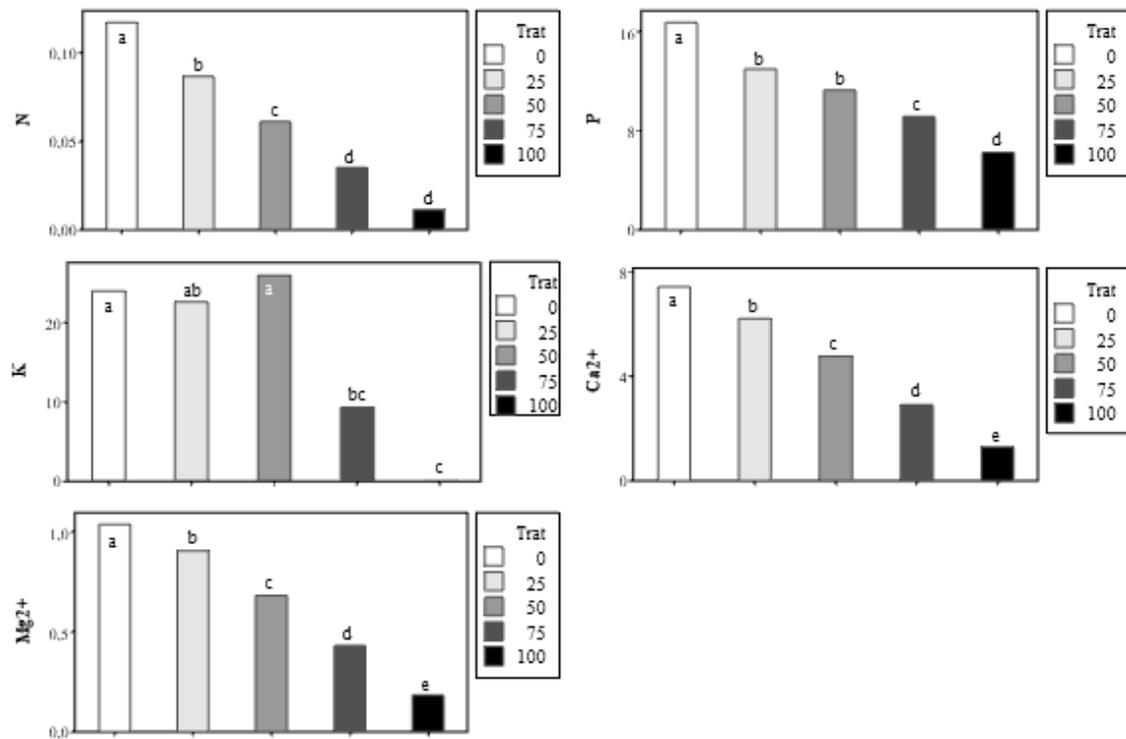


Figura 2. Médias dos teores de nitrogênio (N; dag/Kg), fósforo (P; mg/dm³), potássio (K; mg/dm³), cálcio (Ca²⁺; cmol/dm³) e magnésio (Mg²⁺; mg/dm³) em substratos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, cultivados por 40 meses com *M. peruiiferum*. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

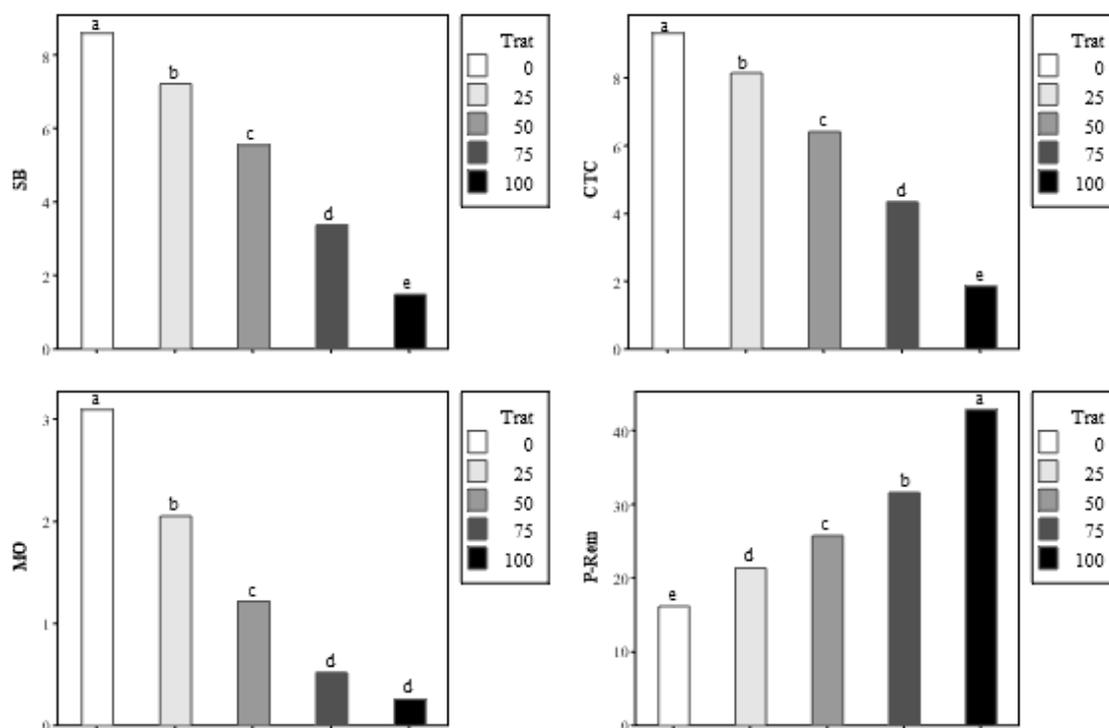


Figura 3. Médias dos teores de matéria orgânica (M.O.; dag/Kg), da capacidade de troca catiônica (CTC; cmolc/dm³), da soma de bases (SB; cmolc/dm³) e do fósforo remanescentes (P-rem; mg/L) em substratos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, cultivados por 40 meses com *M. peruvianum*. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

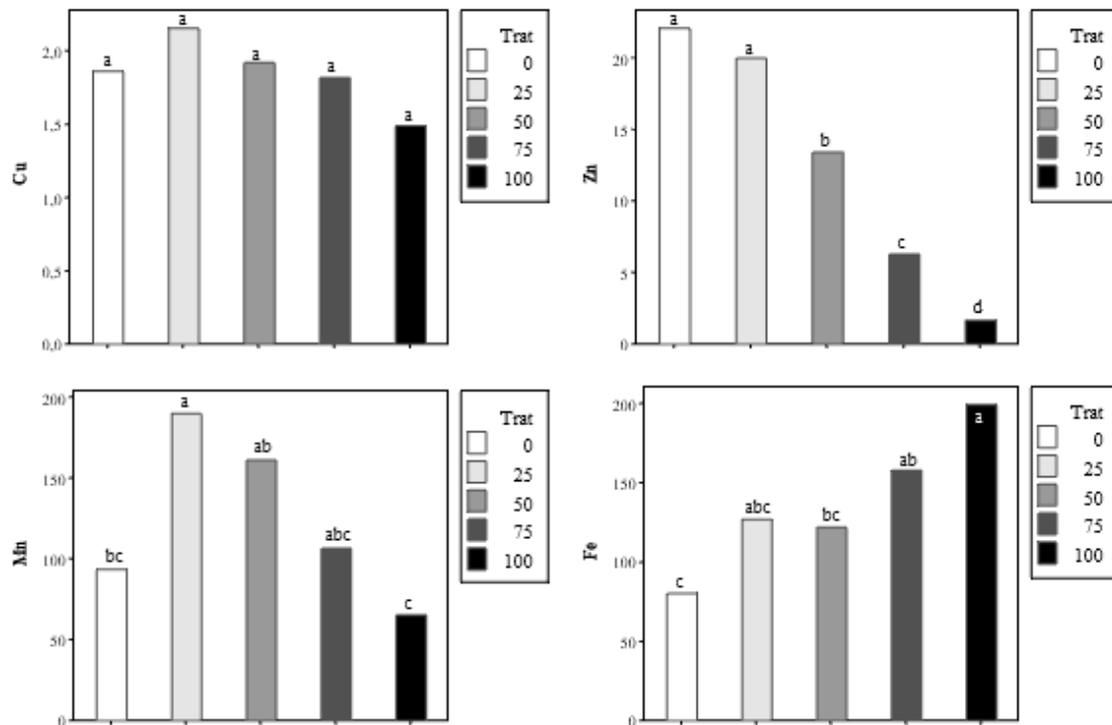
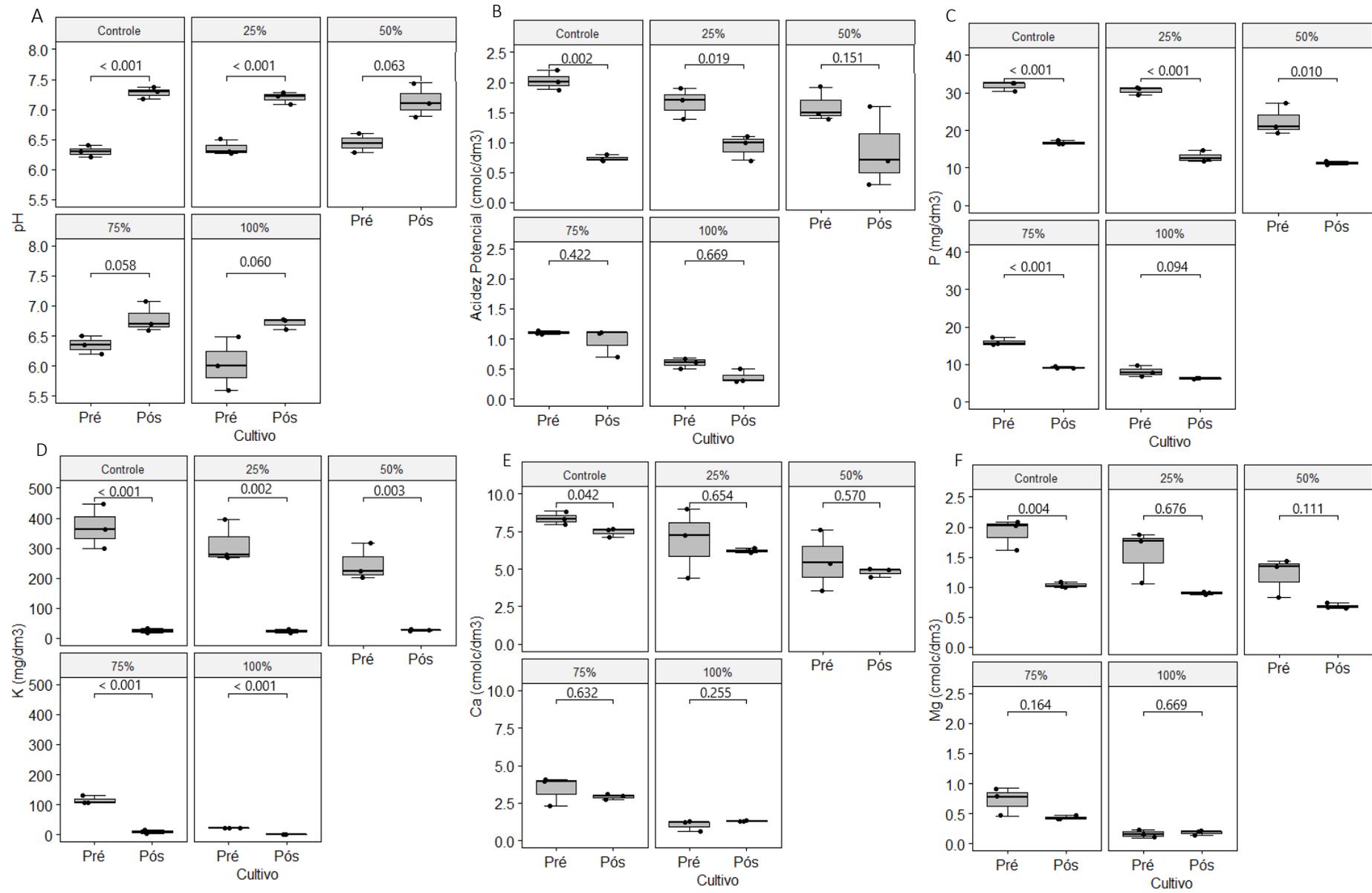
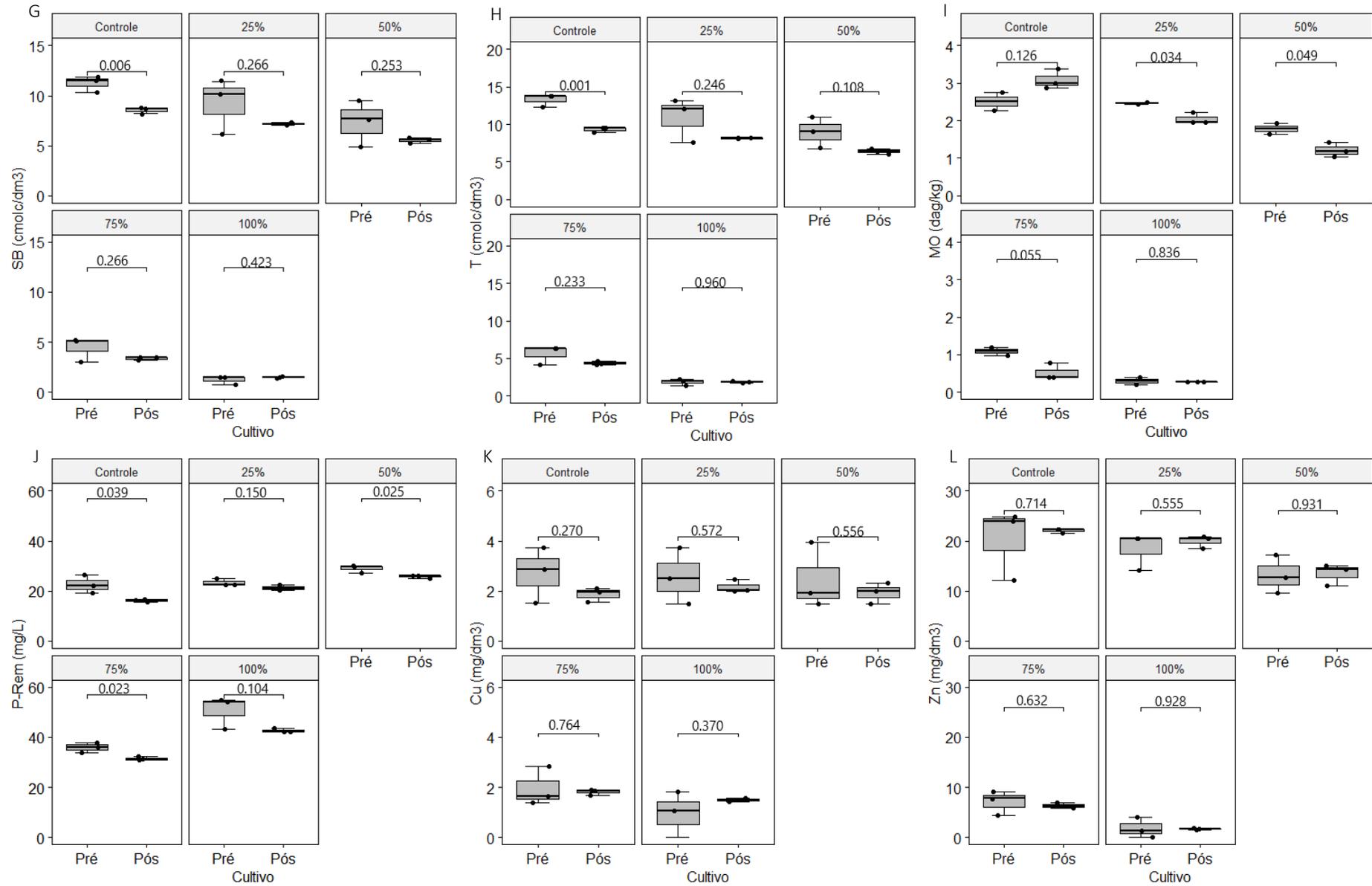


Figura 4. Médias dos teores (em mg/dm³) de cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe) em substratos contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro, cultivados por 40 meses com *M. peruvianum*. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.





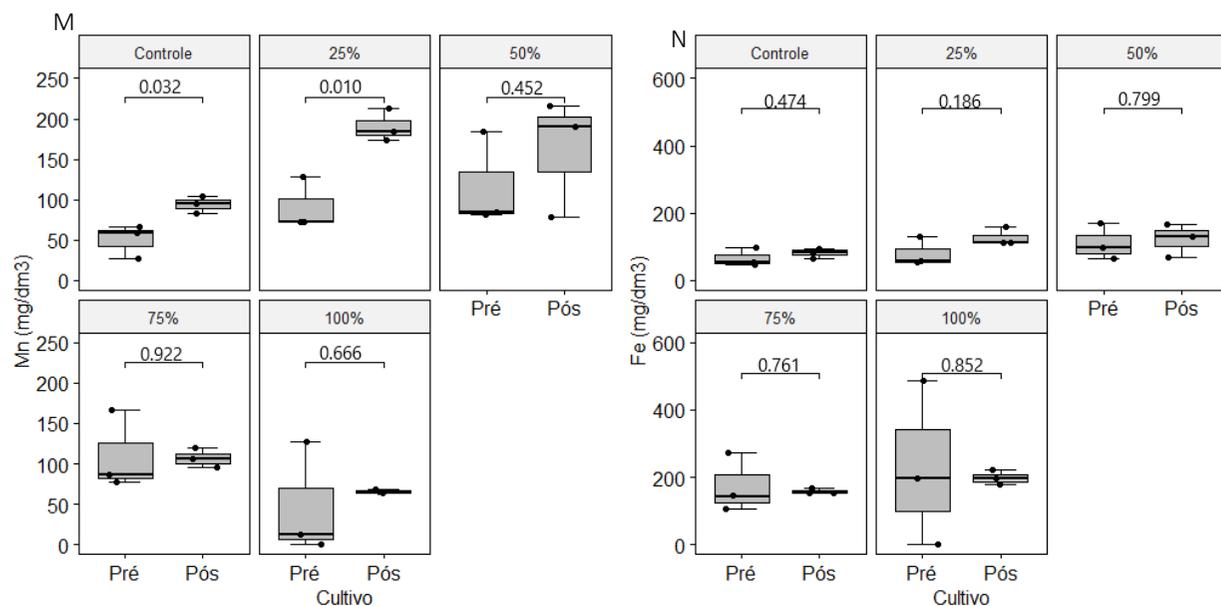


Figura 5. Pannel com *boxplots* das variáveis estudadas nos substratos em pré- e pós-cultivo por 40 meses com *M. periferum* nos diferentes tratamentos (Controle, 25%, 50%, 75% e 100% de rejeitos de minério de ferro). (A: pH; B: Acidez Potencial; C: Fósforo; D: Potássio; E: Cálcio; F: Magnésio; G: Soma de Bases; H: Capacidade de Troca Catiônica; I: Matéria Orgânica; J: Fósforo Remanescente; K: Cobre; L: Zinco; M: Manganês; N: Ferro). Os valores nos *boxplots* representam os níveis de significância e os *whiskers* representam o erro padrão.

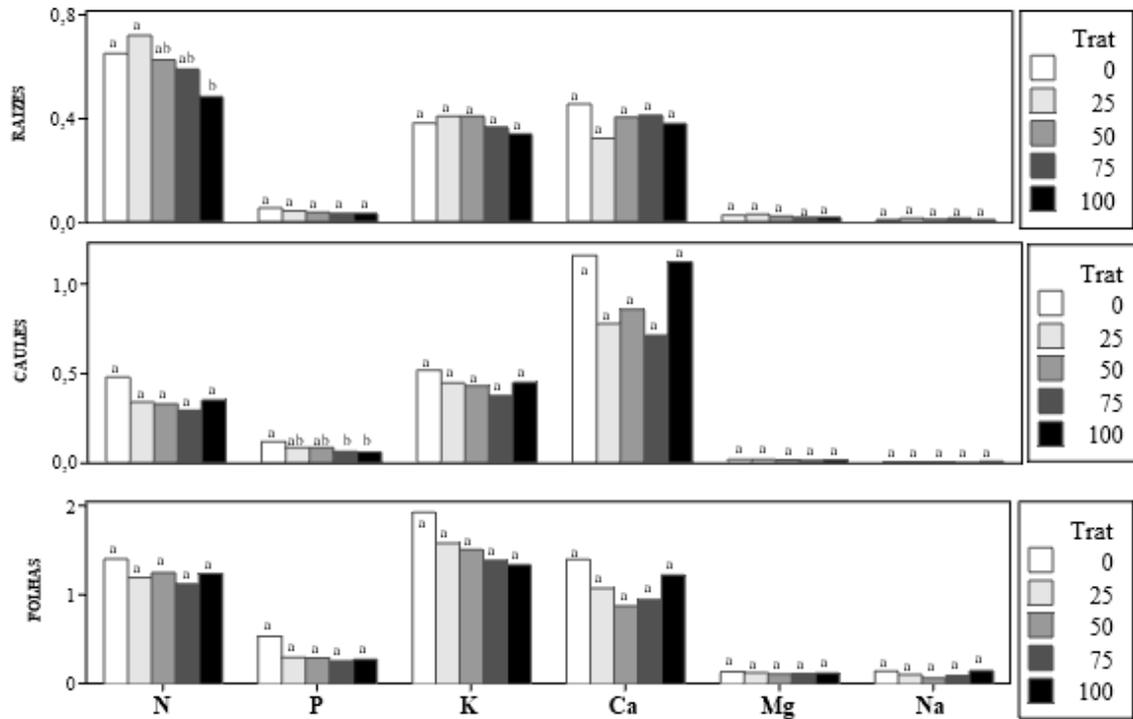


Figura 6. Médias dos teores (em dag Kg⁻¹) de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) em raízes, caules e folhas de plântulas de *M. peruiferum* submetidas a proporções crescentes de rejeitos de minério de ferro, após 40 meses de cultivo. Colunas seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

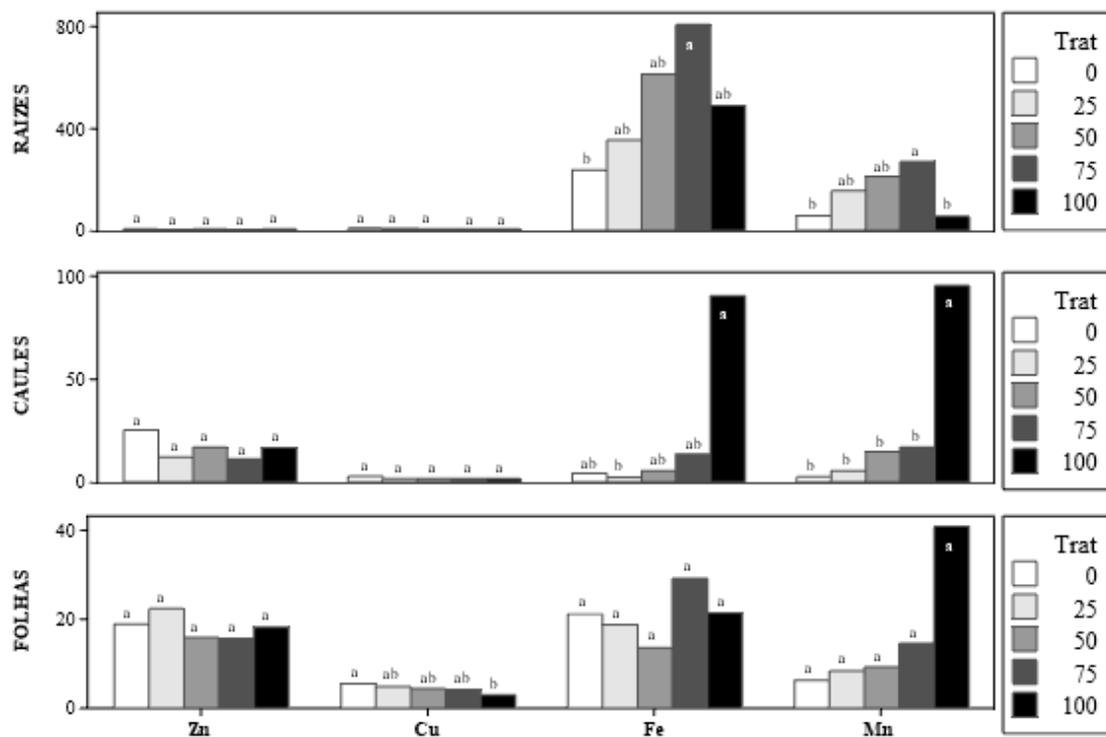
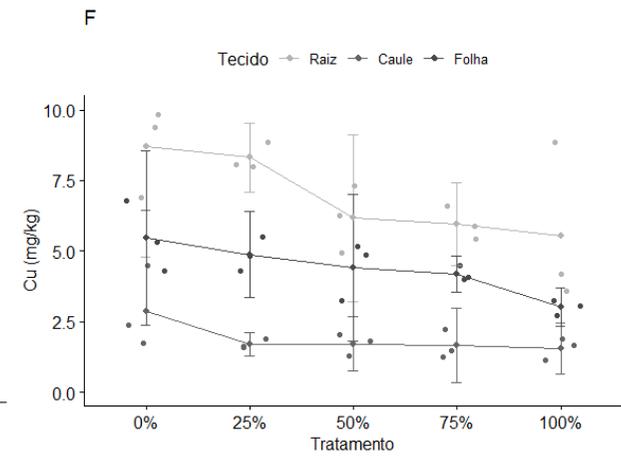
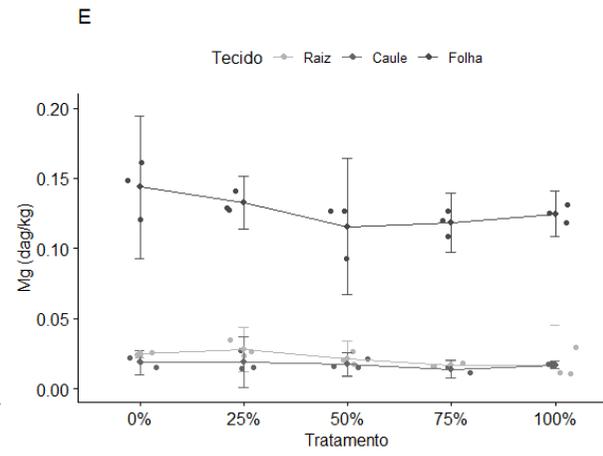
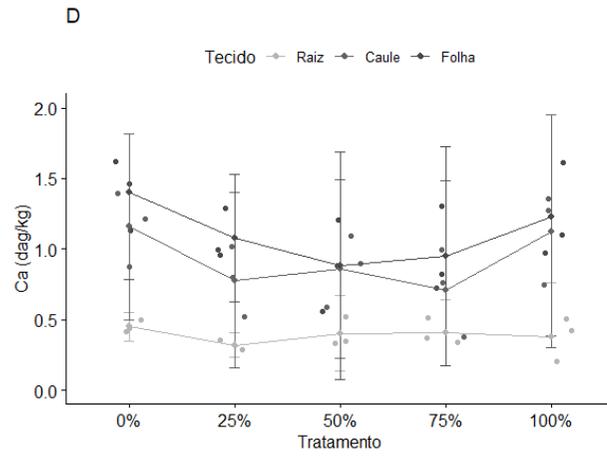
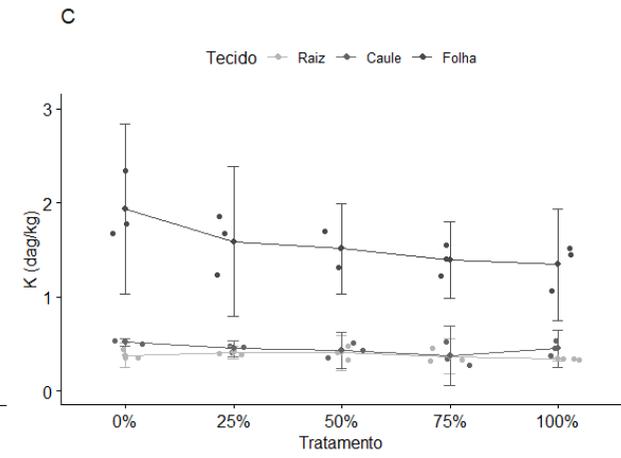
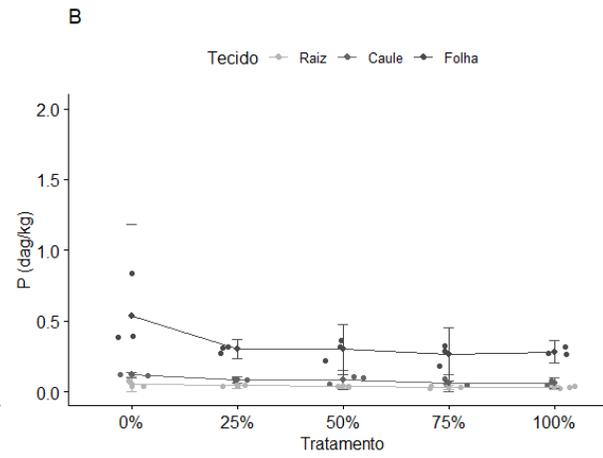
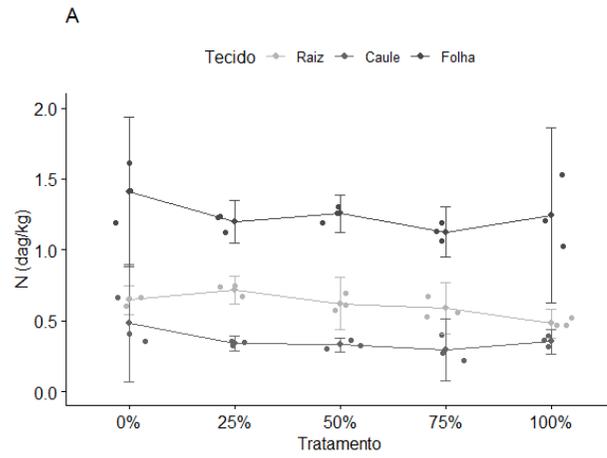


Figura 7. Médias dos teores (em dag Kg⁻¹) de zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn) em raízes, caules e folhas de plântulas de *M. peruiiferum* submetidas a proporções crescentes de rejeitos de minério de ferro, após 40 meses de cultivo. Os teores de ferro foram divididos por 10 para a representação gráfica. Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.



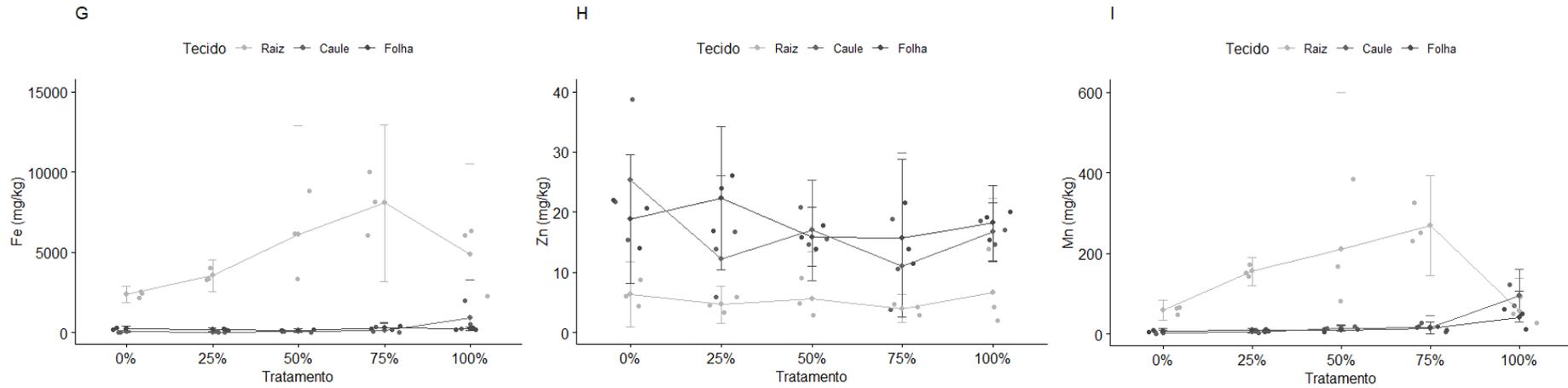


Figura 8. Painel demonstrando as concentrações de cada elemento em tecidos de plantas de *M. peruiiferum* nos diferentes tratamentos (A: Nitrogênio; B: Fósforo; C: Potássio; D: Cálcio; E: Magnésio; F: Cobre; G: Ferro; H: Zinco; I: Manganês). As linhas apresentam a ligação entre as médias dos elementos nos tratamentos (0%, 25%, 50%, 75% e 100% de rejeitos de minério de ferro) em cada parte da planta (raiz, caule e folha) e os *whiskers* representam o intervalo de confiança de 95%.

MATERIAL SUPLEMENTAR

S1. Análise de rotina e elementos minerais analisados em substratos contendo proporções crescentes de rejeito de minério de ferro, após 40 meses de cultivo com plantas de *Myxylon Peruiferum* L.f..

Parâmetro	Rejeito (%)				
	0	25	50	75	100
pH (H ₂ O)	7.28a	7.12ab	7.14ab	6.79ab	6.71b
H+Al(cmol/Kg)	0.73a	0.93a	0.87a	0.97a	0.37a
SB (cmol/Kg)	8.57a	7.20b	5.54c	3.37d	1.49e
CTC (cmol/Kg)	9.30a	8.13b	6.40c	4.34d	1.86e
MO (dag/kg)	3.09a	2.05b	1.21c	0.52d	0.26d
P-Rem (mg/L)	16.17e	21.30d	25.70c	31.47b	42.70a
Elementos					
N (dag/Kg)	0.12a	0.07b	0.06c	0.03d	0.01d
P (mg/Kg)	16.70a	12.97b	11.27b	9.13c	6.23d
K (mg/Kg)	24.00a	22.67ab	26.00a	9.33bc	0.00c
Ca (cmol/Kg)	7.47a	6.24b	4.79c	2.92d	1.31e
Mg (cmol/Kg)	1.03a	0.90b	0.68c	0.43d	0.18e
Al (cmol/Kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu (mg/Kg)	1.86a	2.15a	1.92a	1.81 a	1.49a
Fe (mg/Kg)	80.17c	126.5abc	121.7bc	157.27ab	198.7a
Mn (mg/Kg)	93.80bc	190.2a	161.4ab	106.80abc	65.50c
Zn (mg/Kg)	22.03a	19.93a	13.40b	6.29c	1.67d

H+Al, acidez potencial; SB, soma de bases; CTC, capacidade de troca catiônica; MO, matéria orgânica; P-Rem, fósforo remanescente. Médias, nas linhas, seguidas de uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey e médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes, a 5% de probabilidade.

S2. Composição mineral em amostras de raízes (R), caules (C) e folhas (F) em plantas de *Myroxylon Peruiferum* L.f desenvolvidas por 40 meses em substratos preparados com diferentes proporções de rejeitos de mineração de ferro e um substrato fértil.

Elementos	Tecido	Rejeito (%)					
		0	25	50	75	100	
N	<i>dag Kg⁻¹</i>	R	0.65a	0.72a	0.62ab	0.59ab	0.48b
		C	0.48a	0.34a	0.33a	0.29a	0.35a
		F	1.4a	1.2a	1.26a	1.13a	1.24a
P	<i>dag Kg⁻¹</i>	R	0.052a	0.042a	0.035a	0.032a	0.032a
		C	0.119a	0.084ab	0.085ab	0.062b	0.062b
		F	0.538a	0.300a	0.299a	0.263a	0.283a
K	<i>dag Kg⁻¹</i>	R	0.38a	0.41a	0.41a	0.36a	0.34a
		C	0.518a	0.448a	0.431a	0.375a	0.451a
		F	1.930a	1.586a	1.512a	1.391a	1.341a
Ca	<i>dag Kg⁻¹</i>	R	0.45a	0.32a	0.40a	0.41a	0.38a
		C	1.159a	0.780a	0.859a	0.712a	1.126a
		F	1.405a	1.081a	0.881a	0.950a	1.229a
Mg	<i>dag Kg⁻¹</i>	R	0.025a	0.028a	0.021a	0.017a	0.017a
		C	0.0187a	0.0187a	0.0173a	0.014a	0.017a
		F	0.144a	0.132a	0.116a	0.118a	0.125a
Cu	<i>mg Kg⁻¹</i>	R	8.71a	8.32a	6.17a	5.97a	5.54a
		C	2.872a	1.697a	1.713a	1.657a	1.555a
		F	5.472a	4.877ab	4.420ab	4.178ab	3.010b
Fe	<i>mg Kg⁻¹</i>	R	2372b	3546ab	6113ab	8058a	4880ab
		C ¹	3.61ab	2.77b	3.89ab	4.07ab	6.40a
		C	42.2	23.2	54.8	135	903
		F	210.9a	187.2a	135.4a	290.7a	213.5a
Mn	<i>mg Kg⁻¹</i>	R	58.57b	155.31ab	211.2ab	269.6a	56.3b
		C ²	1.47b	2.29b	3.83b	3.87b	9.70a

		C	2.56	5.46	14.80	16.82	95.2
		F ³	0.42a	0.35a	0.36a	0.28a	0.19a
		F	6.25	8.33	9.26	14.50	40.7
		R ⁴	1.81a	1.50a	1.62a	1.36a	1.59a
Zn	<i>mg Kg⁻¹</i>	R	6.38	4.62	5.63	3.96	1.59
		C	25.26a	12.19a	16.98a	11.08a	16.68a
		F	18.87a	22.34a	15.88a	15.66a	18.18a
		R	0.007a	0.014a	0.009a	0.012a	0.008a
Na	<i>dag Kg⁻¹</i>	C	0.006a	0.004a	0.005a	0.004a	0.008a
		F	0.149a	0.112a	0.069a	0.098a	0.156a

Resultados que não atenderam ao princípio da normalidade foram transformados pelo modelo de Box-Cox e tiveram suas médias comparadas com o teste de Tukey. As médias dos dados originais foram apresentadas sem qualquer teste. Os números sobrescritos nos diferentes tecidos referem-se à normalização por Box-Cox dos dados originais no seguinte parâmetro de transformação: C¹ Box Cox $\lambda = 0$; C² Box Cox $\lambda = 0.5$; F³ Box Cox $\lambda = -0.5$; R⁴ Box Cox $\lambda = 0.5$. Médias, nas linhas, seguidas de uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey e médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes, a 5% de probabilidade.

S3. Teores totais de micronutrientes e fatores de translocação em tecidos de plantas de *Myroxylon Peruiferum* L.f desenvolvidas sob diferentes proporções de rejeitos de mineração de ferro e um substrato fértil, após 40 meses de cultivo.

Índices	Rejeito (%)	Metal			
		Zn	Cu	Fe	Mn
Teor (mg Kg ⁻¹)	total 0	50.51a	17.05a	2625b	67.38b
	25	39.15ab	14.89ab	3756ab	169.1ab
	50	38.48ab	12.30ab	6303ab	235.3ab
	75	30.7b	11.80ab	8483a	300.9a
	100	41.55ab	10.11b	5997ab	192.3ab
TF	0	7.46a	1.02a	0.11ab	0.16b
	25	7.83a	0.79a	0.06ab	0.09b
	50	7.28a	0.99a	0.04b	0.16b
	75	6.96a	0.98a	0.05ab	0.12b
	100	9.46a	0.95a	0.25a	3.00a

TF = fator de translocação; Médias, nas colunas, seguidas de uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey e médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes, a 5% de probabilidade.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a escassez de conhecimentos biológicos, ecofisiológicos e comportamental de espécies arbóreas nativas mais adequadas para se estabelecerem e desenvolverem em áreas afetadas pelo maior desastre socioambiental do setor de mineração no país, essa pesquisa se propôs cultivar a espécie arbórea nativa, popularmente conhecida por Cabreúva (*Myroxylon peruiferum* L.f.), sobre cinco diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro da barragem do Fundão, misturados a solos férteis, pelo período de 40 meses. Buscou-se compreender algumas respostas ecofisiológicas e nutricionais da espécie na presença de proporções crescentes de rejeitos de minério de ferro nos substratos de cultivo.

Pode-se chegar, assim, a conclusão de que o aumento crescente da proporção de rejeitos afeta negativamente o desempenho ecofisiológico e o crescimento da espécie. A Cabreúva, apesar de manter as taxas fotossintéticas e seus teores de fotoassimilados (carboidratos solúveis) estáveis, apresentou tamanho reduzido e alterações nas relações dos principais pigmentos cloroplastídicos (clorofilas a e b) bem como aumento nos teores de antocianinas, quando cultivada sobre rejeitos puros. Constatou-se também que o aporte de rejeitos nos substratos de cultivo resultou na diminuição da fertilidade e da matéria orgânica e no aumento de partículas finas (areia e silte), favorecendo a compactação dos substratos, resultando em comprometimento físico para o desenvolvimento das raízes. Mesmo com a baixa disponibilidade de nutrientes essenciais e altas concentrações de ferro (Fe) e manganês (Mn) nos rejeitos, a espécie apresentou fluxos de translocação indicativos de um possível mecanismo de adaptação ao ambiente, mantendo os níveis dos macronutrientes essenciais estáveis nas folhas, independente do tratamento e os micronutrientes Fe e Mn, concentrados em suas raízes e caules, nos tratamentos com maiores quantidades de rejeitos de minério de ferro. Por fim, nos constatamos que a adição de substratos férteis tem potencial atenuador dos efeitos deletérios dos rejeitos para o estabelecimento da Cabreúva nos ambientes afetados pelo rompimento da barragem do Fundão.

Embora a Cabreúva tenha mantido suas atividades essenciais sobre os rejeitos, pelos 40 meses observados, outras espécies nativas da Mata Atlântica devem ser estudadas, colaborando para a identificação de plantas mitigadoras ou adaptáveis às novas condições, que deverão ser utilizadas para reestabelecer a biodiversidade local após o desastre. Adicionalmente, consideramos fundamental a realização de análises

complementares para o acompanhamento do potencial bioacumulador de metais pesados presentes nos rejeitos.

Os estudos destinados à recuperação ambiental das áreas afetadas pela calamidade do Rio Doce dependem da compreensão do acidente e de seus impactos ambientais, servindo como um alerta oportuno para a necessidade de criação de referências e medidas eficazes para a mitigação e à eliminação de possíveis novos danos graves causados pelo setor da mineração no país.