



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Biológicas
Departamento de Botânica
Programa de Pós Graduação em Biologia Vegetal



Humberto Araújo de Almeida

**POTENCIAL DE USO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ORIUNDO DO
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO (MARIANA, MG) PARA O
CULTIVO DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS**

Belo Horizonte - MG
2020

Humberto Araújo de Almeida

**POTENCIAL DE USO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ORIUNDO DO
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO (MARIANA, MG) PARA O
CULTIVO DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Departamento de Botânica do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biologia Vegetal.

Área de Concentração: Fisiologia Vegetal e Ecologia

Orientadora: Profa. Dra. Queila de Souza Garcia
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte - MG
2020

043

Almeida, Humberto Araújo de.

Potencial de uso do rejeito de minério de ferro oriundo do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG) para o cultivo de espécies agrícolas [manuscrito] / Humberto Araújo de Almeida. - 2020.

55 f. : il. ; 29,5 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Queila de Souza Garcia.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal.

1. Mineração. 2. Resíduos de mineração. 3. Cultivos Agrícolas. 4. Fotossíntese. 5. Plantas forrageiras. 6. Verduras. I. Garcia, Queila de Souza. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. III. Título.

CDU: 581



UFMG

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO - MESTRADO
(Defesa MS nº 182)

HUMBERTO ARAÚJO DE ALMEIDA

Data: 28/10/2020

Entrada: 2018/2

Mat.: 2018711908

CPF: 11435502426

Às 9 horas do dia 28 de outubro de 2020, reuniu-se a Comissão Examinadora de Dissertação indicada pelo Colegiado do Programa para julgar, em exame final, o trabalho intitulado "Potencial de uso do rejeito de minério de ferro oriundo do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG) para o cultivo de espécies agrícolas", requisito final para obtenção do grau de Mestre em Biologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal e Ecologia, pelo discente Humberto Araújo de Almeida. Abriu a sessão, a Presidente da Comissão, professora Queila de Souza Garcia, após dar conhecimento aos presentes do teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a comissão reuniu-se, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações:

Membro da Comissão Examinadora	Instituição	Resultado
Dra. Queila de Souza Garcia (orientadora)	Universidade Federal de Minas Gerais	Aprovado
Dr. Eduardo Gusmão Pereira	Universidade Federal de Viçosa	Aprovado
Dra. Janaina Guernica Silva	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul	Aprovado

Pelas indicações, o candidato foi considerado: Aprovado.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pela Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, a Presidente encerrou a reunião e lavrou-se presente ata, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 28 de outubro de 2020.

Dra. Queila de Souza Garcia (orientadora)	
Dr. Eduardo Gusmão Pereira	
Dra. Janaina Guernica Silva	

PROLOGADO FM REUNIÃO
DE COLEGIADO
EM 03.11.2020

Agradecimentos

Hoje agradeço não só por esse produto que aqui se apresenta, mas, principalmente, por todos os ensinamentos científicos e para a vida que tive o privilégio de adquirir durante a vivência acadêmica na UFMG.

À minha orientadora, Professora Doutora Queila de Souza Garcia por orientar no sentido mais real que essa palavra pode ter. Obrigado por ter me recebido, e sempre estar aberta a desenvolver todos os trabalhos científicos propostos, ao longo desses dois anos de mestrado. Sou muito grato por, durante o período em Belo Horizonte, ter representado parte da minha família, preocupando-se sempre, não apenas com meu bem-estar acadêmico, mas também comigo enquanto ser humano.

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao programa de Pós-graduação em Biologia vegetal, pelos excelentes professores que me ofereceu, bem como pela infraestrutura para execução do trabalho que aqui se apresenta.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa e apoio financeiro (Código de Financiamento 001).

À EMBRAPA Milho e Sorgo, em nome de Décio Karan e Isabela Goulart, por todo o apoio com infraestrutura e logística, para execução dos experimentos referentes ao capítulo 1.

À Janaína Guernica, pelas ideias que representaram o estopim do trabalho.

À Camila Magalhães (Lab. PlantSer), por toda ajuda nos experimentos.

À minha família, base de tudo que sou, por sempre ter me apoiado e contribuído para meu crescimento humano e profissional.

À Maiara, pessoa muito especial em minha vida, que tem me apoiado em todos os momentos, e sempre está ao meu lado em todas as decisões tomadas.

Aos meus amigos paraibanos e belorizontinos, por todo afeto e apoio. Aos meus colegas do programa de pós-graduação, por todos os momentos de aprendizagem e descontração.

Aos meus companheiros de laboratório, Ana, Artur, Aurea, Cleber, Dani Boaneres, Dani Pianetti, Felipe, Fernanda Cruz, Juliana, Leilane, Leticia, Talita e Tiago, por todos os ensinamentos e momentos de descontração no laboratório. E em especial, a Felipe, Talita e Tiago por suas contribuições diretas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Eduardo Gusmão Pereira, Dr^a. Janaína Guernica Silva e Dr^a. Elisa Monteze Bicalho, por terem aceito o convite, bem como pelas importantes contribuições para melhorias no trabalho.

E por fim, a minha maior gratidão, sou feliz em ser filho do Cariri paraibano, terra tão seca, e ao mesmo tempo tão singular, que tanto nos ensina. Sou feliz por ser filho de agricultor, e ter nas minhas mãos as marcas da enxada, a qual me fez ser quem eu sou!

Potencial de uso do rejeito de minério de ferro oriundo do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG) para o cultivo de espécies agrícolas

Resumo Geral

Com o rompimento da barragem de Fundão (Mariana, 2015), um grande aporte de rejeito de minério de ferro foi liberado ao longo da bacia do rio Doce. Algumas publicações têm alertado a respeito de eventuais impactos que esse material poderia causar na atividade agrícola local, sugerindo possíveis prejuízos à produtividade, bem como à acumulação de metais em níveis tóxicos para humanos e animais. Com intuito de esclarecer estes aspectos, este estudo avaliou o cultivo de seis espécies de interesse agrícola, duas graníferas (feijão e milho), duas forrageiras (braquiária e crotalária) e duas hortaliças, sendo uma folhosa (rúcula), e outra com raízes tuberosas (rabanete), no rejeito e em solo. Foram analisadas as características morfo-agronômicas, o desempenho fotossintético e a acumulação de metais. Os substratos foram previamente misturados com areia, numa proporção de 3:1, e fertilizados com NPK. Foi analisada a composição química dos substratos e dos tecidos vegetais (parte aérea de feijão, milho, crotalária, braquiária e rúcula; grãos de feijão e milho; raízes tuberosas de rabanete). Para as plantas de feijão, milho, braquiária e crotalária foi calculado o fator de bioconcentração (FB), para averiguar o potencial fitoextrator dessas espécies. Estimou-se a ingestão diária de metais, através do consumo de hortaliças cultivadas no rejeito, com base na média diária de consumo desses vegetais por um brasileiro adulto. O rejeito apresentou maiores teores de Fe, Mn e Na em relação ao solo controle, pH de 7,2, e ausência de metais tóxicos em sua composição. Feijão, milho, crotalária, rúcula e rabanete cultivadas no rejeito não diferiram em termos de produtividade e, em geral, no desempenho fotossintético, em relação ao solo, comprovando que o principal entrave ao cultivo no rejeito é a baixa fertilidade. A braquiária apresentou menor massa seca quando cultivada no rejeito, o que pode estar relacionado à alta compactação desse substrato, a qual pode ter comprometido a expansão radicular. Com excessão da braquiária, as plantas cultivadas no rejeito apresentaram maiores concentrações de Fe e Mn, o que reflete os elevados teores desses elementos nesse substrato. Atrelado à maior concentração desses metais, outro fator que maior absorção foi a fonte de N utilizada (NH_4^+), que quando absorvido libera íons H^+ reduzindo o pH do rejeito, refletindo em maior disponibilidade de Fe e Mn. Os teores dos elementos detectados nas plantas cultivadas no rejeito estão dentro dos limites permitidos para o consumo humano. Crotalária e milho apresentaram altas concentrações de Fe e Mn, bem como $\text{FB} > 1$ para Mn, Zn e Cu, sendo indicadas como promissoras para fitoextração. Os resultados aqui apresentados, sugerem a viabilidade do cultivo agrícola na região afetada pelo rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão.

Palavras-chave: Acúmulo de metais; Forrageiras; Fotossíntese; Graníferas; Hortaliças; Minério de ferro.

Potential using iron ore tailings from the rupture of the Fundão dam (Mariana, MG) for the cultivation of agricultural species

Abstract

With the collapse of the Fundão dam (Mariana, 2015), a large amount of iron ore tailings was released into the Doce River basin. Some publications have warned of possible impacts that this material could have on local agricultural activity, suggesting possible losses in productivity, as well as the accumulation of metals to levels that could be toxic to humans and animals. In order to clarify these aspects, this study evaluated the cultivation of six species of special interest to agriculture, two grain crops (beans and maize), two forage species (braquiária and crotalária) and two vegetables, a leafy vegetable (arugula), and with tuberous roots (radish), in both tailing and soil. Morpho- agronomic characteristics, photosynthetic performance, and metal accumulation were analyzed. The substrates were previously mixed with sand, considering a ratio of 3: 1, and fertilized with NPK. The chemical composition of substrates and plant tissues (aerial part of beans, maize, crotalária, braquiária, and arugula; grains of the beans and maize; radish tuberous roots) was analyzed. In addition, we calculated the bioconcentration factor (FB) of beans, maize, braquiária, and crotalária plants, to verify the phytoextractor potential of these species. Daily metal intake was estimated through the consumption of vegetables grown in the tailings, based on the average daily consumption of these food items by an adult Brazilian. The tailings presented higher levels of Fe, Mn, and Na in comparison to the control soil, pH of 7.2, and absence of toxic metals in its composition. Beans, maize, crotalária, arugula and radish grown in the tailings did not differ in terms of productivity and, in general, photosynthetic performance was not influenced by the soil, proving that the main obstacle to cultivation in the tailings is low fertility. Braquiária plants showed less dry mass when cultivated in the tailings, which may be related to the high level of compaction found in this substrate, and consequently to the compromise of root expansion. Except for braquiária, Fe and Mn were found in higher concentrations in plants grown in tailings, which reflects the high levels of these elements in this substrate. Associated to the higher concentration of metals, another factor that may have favored its greater absorption was the source of N used (NH_4^+). When absorbed, NH_4^+ releases H^+ ions, reducing the pH of the tailings and increasing the availability of Fe and Mn. The levels of the elements detected in plants grown in the tailings are within acceptable limits for human consumption. Crotalária and maize showed high concentrations of Fe and Mn, as well as $\text{FB} > 1$ for Mn, Zn, and Cu, being indicated as promising for phytoextraction. The results presented here, support the resumption of agricultural activity in the region affected by the tailings of Fundão dam.

Keywords: Accumulation of metals; Forage; Photosynthesis; Grain crops; Vegetables; Iron ore.

Índice de tabelas

Capítulo 1

Table 1. Concentrations of chemical elements in the ore and iron tailings from the Fundão dam and in the control soil. ND - not detected.

Table 2. Pigment content ($\mu\text{g g}^{-1}$) and potential quantum yield of PS II (F_v / F_m) in leaves of two forage species (*braquiária* and *crotalária*) and two grain producers (bean and maize) grown in the iron ore tailings from the Fundão dam and on a control substrate. * indicates difference between treatments ($P < 0.05$).

Table 3. Bioaccumulation factor (FB) of metals in the shoot of bean, maize, *braquiária* and *crotalária* plants, grown in the iron ore tailings from the rupture of the Fundão dam and in control soil. ND - not detected.

Capítulo 2

Tabela 1. Concentração de pigmentos ($\mu\text{g g}^{-1}$) e parâmetros fotoquímicos de plantas de rúcula e rabanete, após quatro semanas de cultivo no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão e em solo. Chl a - clorofila a; Chl b - clorofila b; Chl total - clorofila total; Car - carotenoides; Chl a / chl b - razão clorofila a / clorofila b; Chl/car - razão clorofila total / carotenoides; A - Assimilação líquida de CO_2 ; g_s - condutância estomática; E - transpiração. *indica diferença entre os tratamentos ($P < 0,05$).

Tabela 2. Teores de elementos químicos por kg de massa seca, na porção aérea rúcula e nas raízes tuberosas de rabanete, de plantas no período de colheita (40 dias), cultivadas no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão e em solo. Unidades de medida: N, P, K, Ca, Mg, S e Na (dag kg^{-1}); e Cu, Fe, Zn, Mn, B e Al (mg kg^{-1}) *indica diferença entre os tratamentos ($P < 0,05$)

Tabela 3. Estimativa de ingestão diária de metais (Fe, Mn, Zn, Cu, B e Al) a partir do consumo de rúcula e rabanete cultivados no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, 2015) e em solo ($\text{mg kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$).

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figure 1. Length and dry mass per plant of the shoot of *braquiária* and *crotalária* after 60 days and bean and maize after complete maturation, and dry mass of grains from these last two, grown in tailings from the Fundão dam and in control soil. * indicates difference between treatments ($P < 0.05$).

Figure 2. Concentrations of chemical elements, that significantly different between treatments ($P < 0.05$), for the shoot of *braquiária* and *crotalária*, after 60 days of cultivation, and in the shoot and grains of bean and maize, of plants in the period harvest, grown in iron ore tailings from the Fundão dam (light bars) and in control soil (dark bars). * indicates difference between treatments ($P < 0.05$).

Capítulo 2

Figura 1. Massa seca (g) de rúcula (parte aérea – A; raiz – C) e rabanete (parte aérea – B; raiz – D), de plantas no período de colheita (40 dias), cultivadas no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão e em solo. Barras tracejadas correspondem às partes consumidas por humanos.

SUMÁRIO

Introdução Geral.....	11
Referências.....	14
Capítulo 1: Potential use of Samarco’s iron ore tailings for the cultivation of agricultural species.....	18
Abstract.....	19
Introduction.....	20
Material and methods.....	21
Results and Discussion.....	25
References.....	31
Capítulo 2: Viabilidade do cultivo de hortaliças no rejeito de minério de ferro da Samarco: acumulação de metais e riscos à segurança alimentar.....	35
Resumo.....	36
Introdução.....	37
Material e métodos.....	38
Resultados.....	41
Discussão.....	42
Referências.....	45
Considerações finais.....	54

INTRODUÇÃO GERAL

A mineração é uma das principais atividades antrópicas responsáveis pela exposição dos seres vivos a altas concentrações de metais (Wong, 2003). No Brasil, em 05 de novembro de 2015, ocorreu o maior desastre proveniente da atividade mineradora já registrado no mundo, em termos de volume de rejeito liberado e a extensão geográfica atingida (Carmo et al., 2017). O rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG, liberou cerca de 50 milhões de m³ de rejeito de minério de ferro, que se espalharam pela bacia do Rio Doce, onde parte do resíduo encontra-se atualmente depositada (Miranda e Marques 2016; Segura et al., 2016; Carmo et al., 2017). O desastre ocasionou uma série de prejuízos socioculturais, ao patrimônio biológico natural e à agropecuária local (Meira et al., 2016; Carmo et al., 2017; Aires et al., 2018). O rejeito é extremamente denso, com baixa capacidade de infiltração, pH alcalino, pobre em matéria orgânica e deficiente em muitos nutrientes essenciais (Andrade et al., 2018; Santos et al., 2019; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020). A composição desse material compreende, principalmente, hidróxidos de ferro (geotita e hematita), culinita, quartzo e alguns metais como Mn, Cr, Zn, Ni, Cu, Pb e Co (Hatje et al., 2017; Queiroz et al., 2018; Santos et al., 2019). Dentre os elementos presentes no rejeito, Fe, Mn e Na têm sido detectados em elevadas concentrações (Segura et al., 2016; Santos et al., 2019; Zago et al., 2019; Cruz et al., 2020).

Metais como Fe e Mn, são micronutrientes essenciais para as plantas (Gurevitch et al., 2009), entretanto, em elevadas concentrações, representam uma importante fonte estressora, sendo prejudicial ao estabelecimento e desenvolvimento vegetal (Schutzendubel e Polle 2002; Millaleo et al., 2010; Daghino et al., 2016; Rios et al., 2017). O excesso de Fe e Mn provoca anomalias nos órgãos vegetais (Gupta et al., 2007; Millaleo et al., 2010; Araujo et al., 2015), causa alterações metabólicas, as quais podem interferir diretamente no metabolismo fotossintético (Pereira et al., 2013; Przybysz et al., 2017). Conseqüentemente, em elevadas concentrações, esses elementos afetam a assimilação de carbono, o que culmina na redução da incorporação de biomassa e da produtividade vegetal (Subrahmanyam e Rathore 2000; Adamski et al., 2011; Pereira et al., 2013).

Diversos fatores estão relacionados à biodisponibilidade dos elementos para as plantas, tais como pH, potencial redox, composição do substrato e atividade microbiana (Basta et al., 2005; Martínez-Alcalá e Bernal, 2020). Além de tais fatores, as plantas

possuem distintas respostas quando expostas a elevados teores de metais, de modo que a acumulação desses elementos pode variar com o táxon (Becana et al., 1998; Ashraf et al., 2011; Viehweger, 2014; Ugya et al., 2019). Espécies capazes de acumular grandes concentrações de metais na parte aérea são candidatas à fitoextração, técnica esta que representa uma importante alternativa para remoção do excesso de metais do substrato (Wong 2003; Sarma, 2011). Tal estratégia está associada à captação, translocação e acumulação de metais em partes das plantas que podem ser colhidas (Vamerali et al., 2010; Sarwar et al., 2017). O fator de bioconcentração (FB) está associado à captação, transporte e acumulação de metais, e pode indicar a capacidade e eficiência de algumas espécies vegetais em acumular metais na parte aérea (Zayed e Terry, 1998; Galal et al., 2017), sendo um importante critério para a escolha de plantas com o propósito de fitoextração (Guittonny-Philippe et al. 2014). Algumas espécies agrícolas, apesar de não serem hiperacumuladoras, apresentam características essenciais para a fitoextração, como fácil manejo, rápido crescimento e alocação de biomassa, sendo assim promissoras para a fitorremediação de ambientes com excesso de metais (Marchiol et a., 2004; Vamerali et al., 2010).

Diversas culturas agrícolas, consumidas por seres humanos e/ou animais domésticos, são capazes de acumular elevados teores de metais. Alguns metais são tóxicos aos seres humanos, os quais, mesmo em baixas concentrações, podem causar diversos transtornos de saúde (Hu, 2002; Martin e Griswold 2009). Outros elementos metálicos, como Fe e Mn, são essenciais a seres humanos, entretanto, quando em elevadas concentrações, podem desencadear desequilíbrios no organismo, podendo ocasionar câncer, comprometimento do desenvolvimento cognitivo e motor, diminuição do crescimento e problemas na absorção de outros nutrientes (Tong et al., 2014; Alexeev et al., 2017; Lonnerdal, 2017). O consumo de vegetais provenientes de ambientes contaminados por metais tóxicos, ou com elevadas concentrações de metais essenciais, pode ser uma importante via de exposição dos seres humanos a esses poluentes (Farooq et al., 2008; Gupta et al., 2013; Yadav et al., 2013; Hu et al., 2017; Ugya et al., 2019). Além disso, algumas espécies agrícolas, como as hortaliças, são mais propensas à acumulação de metais, sejam essenciais ou tóxicos, o que pode acarretar na sua inviabilidade para o consumo (Yadav et al., 2013; Al-Hammad e El-Salam 2016; Ugya et al., 2019). Sendo assim, é essencial monitorar a composição química de plantas consumidas por seres humanos e outros animais, produzidas em áreas com altas

concentrações de metais, para que se tenha maior segurança no uso alimentar desses produtos (Al-Hammad e El- Salam 2016).

O rejeito oriundo do rompimento da barragem de Fundão, encontra-se depositado em áreas agricultáveis. Diante disso, algumas publicações têm chamado atenção para o possível comprometimento da atividade agrícola na região afetada, indicando, sobretudo, a inviabilidade do rejeito para o cultivo e os riscos da possível acumulação de metais em níveis potencialmente tóxicos para seres humanos (Silva et al., 2015; Fernandes et al., 2016). Tais alegações têm gerado grande incerteza em relação à retomada da atividade agrícola na região. Estudos realizados com o desenvolvimento de plantas no rejeito, tanto de espécies nativas (Cruz et al., 2020), quanto de interesse agrícola (Zago et al., 2019; Andrade et al., 2018; Coelho et al., 2020; Esteves et al., 2020), não verificaram sinais de toxicidade por metais. Entretanto, em decorrência da baixa fertilidade e reduzida capacidade de infiltração do rejeito, plantas cultivadas nesse substrato têm apresentado baixo crescimento e limitado o acúmulo de biomassa (Andrade et al., 2018; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020). Espécies cultivadas no rejeito acumularam elevados teores de Fe e Mn, tanto nas partes aéreas quanto nas raízes (Andrade et al., 2018; Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020), o que gera insegurança no consumo dos produtos vegetais oriundos do cultivo nesse substrato. Contudo, ainda há uma lacuna na compreensão acerca de possíveis impactos relacionados ao cultivo de importantes espécies de interesse agrícola cultivadas na região afetada pelo rejeito, no que se refere ao acompanhamento de todo o ciclo produtivo e análise de metais acumulados nos diferentes órgãos vegetais consumidos pelos seres humanos e outros animais, e consequentemente a segurança alimentar.

Com o intuito de contribuir para reestruturação da agricultura local, este estudo avaliou a produtividade, fotossíntese e acumulação de metais em seis espécies de interesse agrícola, sendo duas graníferas (feijão e milho), duas forrageiras (braquiária e crotalaria) e duas hortaliças, uma folhosa (rúcula), e outra com raízes tuberosas (rabanete), no rejeito oriundo da barragem de Fundão e em um solo agrícola. Os resultados deste trabalho encontram-se descritos em dois capítulos. Com o capítulo 1, cujo título é *Potential use of Samarco's iron ore tailings for the cultivation of agricultural species*, objetivou-se analisar a produtividade da parte aérea de feijão, milho, braquiária e crotalaria e dos grãos de feijão e milho (medida em biomassa seca), os teores de pigmentos fotossintetizantes, o rendimento quântico máximo do fotossistema II (Fv/Fm), além dos teores de metais na parte aérea e nos grãos. Com base nos teores de metais na

parte aérea de feijão, milho, braquiária e crotalária e nos substratos, foram calculados os fatores de bioacumulação de metais, para determinar o potencial fitoextrator das espécies. O capítulo 2, intitulado *Viabilidade do cultivo de hortaliças no rejeito de minério de ferro da Samarco: acumulação de metais e riscos à segurança alimentar*, aborda o cultivo de rúcula e rabanete no rejeito e em solo controle. Nessas espécies foi feita avaliação da biomassa (produtividade), conteúdo de pigmentos, parâmetros associados à fluorescência da clorofila *a*, trocas gasosas e o conteúdo de metais nas partes tradicionalmente consumidas por humanos. A partir dos teores de metais dessas hortaliças, foi estimada a ingestão média diária de metais em mg kg^{-1} de peso corporal dia^{-1} , com base no consumo médio diário de hortaliças por um brasileiro adulto.

REFERÊNCIAS

- ADAMSKI, Janete M. et al. Excess iron-induced changes in the photosynthetic characteristics of sweet potato. **Journal of plant physiology**, v. 168, n. 17, p. 2056-2062, 2011.
- AIRES, Uilson Ricardo Venâncio et al. Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. **Land Use Policy**, v. 70, p. 63-70, 2018.
- ALEXEEV, Erica E. et al. Effects of iron supplementation on growth, gut microbiota, metabolomics and cognitive development of rat pups. **Plos One**, v. 12, n. 6, p. e0179713, 2017.
- AL-HAMMAD, Bushra Ahmed; ABD EL-SALAM, Magda Magdy. Evaluation of heavy metal pollution in water wells and soil using common leafy green plant indicators in the Al-Kharj region, Saudi Arabia. **Environmental monitoring and assessment**, v. 188, n. 6, p. 324, 2016.
- ANDRADE, Geysa Ferreira et al. Agricultural use of Samarco's spilled mud assessed by rice cultivation: A promising residue use? **Chemosphere**, v. 193, p. 892-902, 2018.
- ARAÚJO, Talita Oliveira et al. Morphoanatomical responses induced by excess iron in roots of two tolerant grass species. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 3, p. 2187-2195, 2015.
- ASHRAF, Muhammad Aqeel; MAAH, M. J.; YUSOFF, Ismail. Heavy metals accumulation in plants growing in ex tin mining catchment. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 8, n. 2, p. 401-416, 2011.
- BASTA, N. T.; RYAN, J. A.; CHANEY, R. L. Trace Element Chemistry in Residual-treated Soil: Of Trace Elements with Common Trace Element Reaction with Iron. **Adsorption Journal of the International Adsorption Society**, v. 34, p. 49-63, 2004.

BECANA, M.; MORAN, J. F.; ITURBE-ORMAETXE, I. Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. **Plant and Soil**, v. 201, n. 1, p. 137-147, 1998.

CARMO, Flávio Fonseca et al. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.

COELHO, Daniel Gomes et al. Evaluation of Metals in Soil and Tissues of Economic-Interest Plants Grown in Sites Affected by the Fundão Dam Failure in Mariana, Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 00, n. 0, p. 1-12, 263-2742020.

CRUZ, Fernanda Vieira da Silva et al. Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic Rainforest?. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 189, p. 110021, 2020.

DAGHINO, Stefania; MARTINO, Elena; PEROTTO, Silvia. Model systems to unravel the molecular mechanisms of heavy metal tolerance in the ericoid mycorrhizal symbiosis. **Mycorrhiza**, v. 26, n. 4, p. 263-274, 2016.

ESTEVEZ, Gisele de Fátima et al. Vermicompost improves maize, millet and sorghum growth in iron mine tailings. **Journal of Environmental Management**, v. 264, p. 110468, 2020.

FAROOQ, Muhammad; ANWAR, Farooq; RASHID, Umer. Appraisal of heavy metal contents in different vegetables grown in the vicinity of an industrial area. **Pakistan Journal of Botany**, v. 40, n. 5, p. 2099-2106, 2008.

FERNANDES, Geraldo Wilson et al. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.

GALAL, Tarek M. et al. Metal uptake capability of *Cyperus articulatus* L. and its role in mitigating heavy metals from contaminated wetlands. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 27, p. 21636-21648, 2017.

GUITTONNY-PHILIPPE, Anna et al. Constructed wetlands to reduce metal pollution from industrial catchments in aquatic Mediterranean ecosystems: A review to overcome obstacles and suggest potential solutions. **Environment International**, v. 64, p. 1-16, 2014.

GUREVITCH, Jessica; SCHEINER, Samuel M.; FOX, Gordon A. **Ecologia Vegetal-2**. Artmed Editora, 2009.

GUPTA, A. K. et al. Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus vulgaris* grown in fly ash amended soil. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 17, p. 3404-3407, 2007.

GUPTA, Sapana et al. Assessment of heavy metal contents of green leafy vegetables. **Croatian Journal of Food Science and Technology**, v. 5, n. 2, p. 53-60, 2013.

HATJE, Vanessa et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2017.

HU, Bifeng et al. Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 9, p. 1042, 2017.

HU, Howard. Human health and heavy metals exposure. **Life support: the environment and human health**. MIT Press, Cambridge, p. 65-82, 2002.

LÖNNERDAL, Bo. Excess iron intake as a factor in growth, infections, and development of infants and young children. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 106, n. suppl_6, p. 1681S-1687S, 2017.

MARCHIOL, L. et al. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. **Environmental Pollution**, v. 132, n. 1, p. 21-27, 2004.

MARTÍNEZ- ALCALÁ, Isabel; BERNAL, Maria Pilar. Environmental Impact of Metals, Metalloids, and Their Toxicity. **Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects**, p. 451-488, 2020.

MARTIN, Sabine; GRISWOLD, Wendy. Human health effects of heavy metals. **Environmental Science and Technology Briefs for Citizens**, v. 15, p. 1-6, 2009.

MEIRA, Renata MSA et al. Brazil's mining code under attack: giant mining companies impose unprecedented risk to biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 25, n. 2, p. 407-409, 2016.

MILLALEO, R. et al. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010.

MIRANDA, Lucília Souza; MARQUES, Antonio Carlos. Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna-an example from the staurozoans (Cnidaria). **Biota Neotropica**, v. 16, n. 2, 2016.

PEREIRA, Eduardo Gusmão et al. Iron excess affects rice photosynthesis through stomatal and non-stomatal limitations. **Plant Science**, v. 201, p. 81-92, 2013.

PRZYBYSZ, Arkadiusz et al. Effect of manganese on yield and quality of hydroponically grown lettuce. **Journal of Elementology**, v. 22, n. 1, p. 315-327, 2017.

QUEIROZ, Hermano M. et al. The Samarco mine tailing disaster: a possible time-bomb for heavy metals contamination?. **Science of the Total Environment**, v. 637, p. 498-506, 2018.

RIOS, Camilla Oliveira et al. Assessment of Iron Toxicity in Tropical Grasses with Potential for Revegetating Mined Areas. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 26, n. 5, 2017.

SANTOS, O. S. H. et al. Understanding the environmental impact of a mine dam rupture in Brazil: Prospects for remediation. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, n. 2, p. 439-449, 2019.

SARMA, Hemen. Metal hyperaccumulation in plants: a review focusing on phytoremediation technology. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 4, n. 2, p. 118-138, 2011.

SARWAR, Nadeem et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. **Chemosphere**, v. 171, p. 710-721, 2017.

SCHUTZENDUBEL, Andres; POLLE, Andrea. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal- induced oxidative stress and protection by mycorrhization. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 372, p. 1351-1365, 2002.

SEGURA, Fabiana Roberta et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813-825, 2016.

SILVA, Danielle Letícia; FERREIRA, Matheus Carvalho; SCOTTI, Maria Rita. O maior desastre ambiental brasileiro: De Mariana (MG) a Regência (ES). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, v. 24, n. 1-2, 2015.

SUBRAHMANYAM, Desiraju; RATHORE, V. S. Influence of manganese toxicity on photosynthesis in ricebean (*Vigna umbellata*) seedlings. **Photosynthetica**, v. 38, n. 3, p. 449-453, 2000.

TONG, Yawei et al. High manganese, a risk for Alzheimer's disease: High manganese induces amyloid- β related cognitive impairment. **Journal of Alzheimer's Disease**, v. 42, n. 3, p. 865-878, 2014.

UGYA, A. Y. et al. Phytoextraction of heavy metals and risk associated with vegetables grown from soil irrigated with refinery wastewater. **Journal of Applied Biology & Biotechnology**, v. 7, n. 2, p. 14-9, 2019.

VAMERALI, Teofilo; BANDIERA, Marianna; MOSCA, Giuliano. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 8, n. 1, p. 1-17, 2010.

VIEHWEGER, Katrin. How plants cope with heavy metals. **Botanical Studies**, v. 55, n. 1, p. 35, 2014.

YADAV, Arti; YADAV, Pawan Kumar; SHUKLA, D. N. Investigation of heavy metal status in soil and vegetables grown in urban area of Allahabad, Uttar Pradesh, India. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 3, n. 9, p. 1-7, 2013.

WONG, Ming Hung. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. **Chemosphere**, v. 50, n. 6, p. 775-780, 2003.

ZAGO, Valéria Cristina Palmeira; DAS DORES, Nathália Corrêa; WATTS, Beatriz Amanda. Strategy for phytomanagement in an area affected by iron ore dam rupture: A study case in Minas Gerais State, Brazil. **Environmental Pollution**, v. 249, p. 1029-1037, 2019.

ZAYED, Adel; GOWTHAMAN, Suvarnalatha; TERRY, Norman. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. **Journal of Environmental Quality**, v. 27, n. 3, p. 715-721, 1998.

Capítulo 1

Potential use of Samarco's iron ore tailings for the cultivation of agricultural species

Abstract

The rupture of the Fundão dam (Minas Gerais, Brazil) released a large amount of iron ore tailings, which raised concerns about possible impacts on local agricultural activity. Given this scenario, this study evaluated the physiological performance and the accumulation of metals by four species of great relevance in the region, two grain crops (bean and maize) and two forage (*braquiária* and *crotalária*), cultivated in tailings and in soil. The bioextraction capacity of each species was also evaluated as indicated by the bioaccumulation factor (BF). The tailings showed higher levels of Fe, Mn and Na than did the soil. The productivity of bean, *crotalaria* and maize in the tailings did not differ from that in soil. *Braquiária* plants had reduced growth when grown in tailings, which can be related to the physical characteristics of this substrate, affecting the root system of this species. In general, photosynthetic pigments and Fv/Fm did not differ between treatments. With the exception of *braquiária*, Fe and Mn were the main metals in higher concentrations in the shoot of plants grown in the tailings, reflecting the high levels of these elements in this substrate. The concentrations of metals detected in bean and maize grains were within the limits allowed for human consumption. *Braquiária* can be indicated to restore pastures in the region affected by the tailings as it represents a low risk for metal biomagnification in the food chain. *Crotalaria* and maize showed high concentrations of Fe and Mn and $BF > 1$ for Mn, Zn and Cu, and thus are indicated as promising for phytoextraction. Nonetheless, caution should be exercised in the use of the shoot of these plants for animal feed without further study.

Key words: bean, bioaccumulation factor, *braquiária*, *crotalária*, maize, phytoextraction

Introduction

Anthropogenic activities, such as mining, are responsible for the degradation of biotic and abiotic components of the environment, with direct effects on the balance of the most varied ecosystems (Roy and McDonald, 2015; Bose and Bhattacharyya, 2008; Wang et al., 2008; Ahmad, et al., 2013). The rupture of the Fundão dam in the municipality of Mariana (Minas Gerais, Brazil) in 2015, released a large amount of iron ore tailings, resulting in a series of socio-environmental losses (Carmo et al., 2017). At the time of the rupture, there were alarms for possible damage to the ecosystem in general and, in particular, to the restoration of native vegetation and the cultivation of species of agronomic interest in the formed technosol (Silva et al., 2015; Schaefer et al., 2015; Fernandes et al., 2016). These forecasts generated great apprehension with potential contamination risks from agricultural activity in the region directly affected by the tailings.

The tailings are extremely dense, poor in organic matter, deficient in many essential nutrients and have low infiltration capacity (Andrade et al., 2018; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020). They are mainly composed of iron hydroxides (goetite and hematite), culinite, quartz and some metals such as manganese, chromium, zinc, nickel, copper, lead and cobalt (Queiroz et al., 2018; Santos et al., 2019). Among these, Fe and Mn stand out for being in high concentrations in the tailings (Segura et al., 2016; Zago et al., 2019; Cruz et al., 2020). Although these two elements are essential nutrients, when in high concentrations they represent an important source of environmental contamination and can be harmful to plant development (Millaleo et al., 2010; Ashraf et al., 2011).

The availability of Fe and Mn, which depends on their concentration and pH of the soil, influences their absorption and accumulation by plants (Hell and Stephan, 2003; Viani et al., 2014). It is highly relevant to monitor species that are part of the diet of

humans and animals growing in soil contaminated by metals, since food contamination is the main route of entry of metals into these organisms (Mudgal et al., 2010; Roy and McDonald, 2015). In addition to consumption, studies that evaluate the productivity and the accumulation of metals in agricultural species can generate information about their potential use as metal phytoextractors in contaminated environments, as highlighted by Marchiol et al. (2004) and Vamerali et al. (2010).

In this context, some studies have evaluated the development of native and cultivated plants in Fundão tailings and have indicated that low fertility as limiting factor for plant growth, with no evidence of toxicity by metals (Andrade et al., 2018; Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020). Thus, it is expected that the same will be found for other species of agricultural interest, whether they are forage or granular. However, considering the need to reestablish agricultural activity in the region affected by the disaster, studies are needed to assess the effects of cultivating species of agricultural interest in the tailings. Thus, four of the main species cultivated in the region affected by the tailings — maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*), for grain production (IBGE, 2018); crotalária (*Crotalaria spectabilis*) and braquiária (*Urochloa ruziziensis*) for forage crop purposes (Machado et al., 2010) — were grown in tailings and in soil in order to assess physiological performance and metal accumulation and thus understand whether the tailings affect the productivity and quality of plants for consumption, based on the bioextraction and bioaccumulation abilities of each species.

Material and methods

Substrates

Plants were cultivated on iron ore tailings originating from the rupture of the Fundão dam and collected in 2018, on the banks of the Gualaxo do Norte river (municipality of Mariana, MG), and on soil collected in the municipality of Sete Lagoas, MG. Three samples of each substrate were analyzed in the laboratory of Geoquímica Ambiental (DEGEO, UFOP), to determine levels of Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Cu, Li, Cr, Co, Mn, Ni, Na, Fe, Mg, Mo, K, Th, P, Pb, S, Sc, Sr, V, Se, Ti, Zn and Zr, using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES, Aligent 725). The pH of the tailings and the soil were determined in triplicate using a 1:2.5 (v/v) ratio of soil:distilled water (Embrapa, 2011).

Experimental conditions and selected species

The experiment was conducted in a greenhouse at Embrapa Milho e Sorgo, municipality of Sete Lagoas, MG, Brazil. Based on the chemical analysis of the tailings and the soil, both substrates were fertilized with NPK (8-28-16) before planting, using ammonium sulfate as a source of N. Due to the low drainage capacity of the tailings, as reported by Cruz (2018), a 1:3 ratio of sand:substrate was used for both treatments. Four plant species of agricultural interest were selected for the experiment - two legumes and two grasses, with one of each being forage and the other being grain crops: *Crotalaria spectabilis* (crotalária), *Phaseolus vulgaris* (bean; cultivar FC 402), *Urchloa ruziziensis* (braquiária) and *Zea mays* (maize; cultivar RK 8115). The choice of crops was based on their current importance for regional agriculture (IBGE, 2018), as well as being species with short reproductive cycles and rapid growth. The selection of species also considered the possibility of analyzing performance and metal accumulation in species of different plant groups, both from a food (used in human vs. non-human animal feed) and a phylogenetic (legumes vs. grasses) point of view.

Seeds of all species were previously germinated in transparent germination boxes at 25 °C under a 12-hour photoperiod ($40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Soon after the emergence of the primary root, the homogeneous seedlings were selected and transplanted into pots with a capacity of 20 L for maize, 5 L for *crotalaria*, and 3 L for bean and *braquiária*. The experiment was conducted in a completely randomized design using two treatments (tailings vs. soil) x four species (maize, *crotalaria*, bean and *braquiária*), with five replicates per species for a total of 40 experimental units.

Growth and productivity

The height of the shoot, the diameter of the stem for all species and the diameter of the clump for the *braquiária* were measured in the fourth and eighth week after planting. The number of leaves for maize, *crotalaria* and bean and the total number of tillers for *braquiária* were recorded. The relative growth rate (RGR) was also calculated, according to Radford (1967).

Pigment concentration and maximum quantum yield of photosystem II (Fv/Fm) were evaluated at 60 days after planting. Measurements of Fv/Fm were performed on fully expanded leaves from five plants using a portable modulated fluorometer (model PAM-2500, Walz, Effeltrich, Germany). The leaves were acclimated for 30 minutes after which minimum fluorescence (F_0) was measured under a weak modulating light ($0.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and maximum fluorescence (F_m) by a light-saturating pulse ($8000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, for 0.8 s). The contents of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids were evaluated for discs of three fully expanded leaves, of the 0.8 cm^2 each, which were weighed and immersed in 80% acetone until complete diaphanization. After centrifugation, the supernatant was evaluated at the wavelengths of 663, 646 and 470 nm (Lichtenthaler, 1987) using a microplate reader (Thermo, Multiskan GO).

The shoots of the plants were collected at the end of the experiment [60 days for both forage, and after the maturation of grains for graniferous (90 days for bean, and 110 for maize)]. The compaction of the tailings made it difficult to recover roots, thus preventing the determination of root dry mass. The vegetal material was washed in distilled water to remove residues and then dried in an oven with forced air circulation at 65 °C to obtain dry mass. After drying, the material was weighed and the production of dry mass determined according to Poorter and Nagel (2000). For the grain crops species, in addition to total biomass of grains per plant, the average number of grains per ear for maize was evaluated, as well as the number of pods per plant and the number of grains per pod for bean.

Mineral concentration and bioaccumulation factor

After drying, the samples were crushed in a mill to determine the concentrations of N, P, K, Ca, Mg, S, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Na, Pb, Cr, Cd and B, in the shoot of all species and in the grains of maize and bean, by analyzing five replicates per treatment for each species. Total N was determined by Kjeldahl method (Nelson and Sommers, 1973), while P content was measured colorimetrically by the ascorbic acid method (Braga and Defelipo, 1974). The concentration of S was obtained by turbidimetry (Alvarez et al., 2001) and that of K by flame photometry. The concentrations of Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Na, Pb, Cr, Cd and B were determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES PerkinElmer model Optima 8300 DV).

Accumulation capacities for the elements Cu, Fe, Zn, Mn, Ni and Al were determined for the four analyzed species. The bioaccumulation factor (BF) was calculated as the ratio between the concentration of an element in the shoot (C_{shoot} ; mg kg^{-1}) and the concentration of the same element in the respective growth substrate (C_{subs} ; mg kg^{-1}), where $BF = C_{shoot}/C_{subs}$ (Zayed and Terry, 1998).

Statistical Analysis

Data were previously tested for normality and homoscedasticity. Being normal, the data were submitted to t-tests with differences being considered significant for $P < 0.05$. With this test, each species was compared between treatments. The analyses were performed using GraphPad Prism 5.01 (GraphPad Software, CA, USA).

Results and Discussion

The substrates used in this study differed in their chemical characteristics. The tailings had higher concentrations of Na (19.24 mg kg^{-1}), Fe ($186496.27 \text{ mg kg}^{-1}$) and Mn ($863.60 \text{ mg kg}^{-1}$), than did the soil (Na = 2.26 mg kg^{-1} ; Fe= $113731.45 \text{ mg.kg}^{-1}$; Mn= $625.50 \text{ mg kg}^{-1}$; Table 1). High concentrations of Fe, Mn and Na are common in tailings from iron ore exploration and have even been reported in previous studies with Fundão tailings (Santos et al., 2019; Cruz et al., 2020; Coelho et al., 2020). The soil, typical of the Cerrado region (Brazilian savanna), had higher Al content ($62219.70 \text{ mg kg}^{-1}$) than did the tailings ($32719.95 \text{ mg kg}^{-1}$). Arsenic was detected only in the soil (26.58 mg kg^{-1}). There were no significant differences for the other evaluated elements. While pH for the tailings was 7.2, for the soil it was 6.1. According to Cruz et al. (2020), tailings are characterized by low fertility, low concentration of organic matter, reduced cation exchange capacity and alkaline pH. In addition, particles such as fine sand and silt predominate, which can favor compaction and generate limitations to plant root development (Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020).

No differences were observed between treatments for *crotalária*, bean and maize for the parameters of height, biomass accumulation (shoot of *crotalária*, bean and maize) and grain production (bean and maize) (Figure 1). *Crotalária* stood out for presenting higher RGR ($P=0.03$; Figure 1) and stem diameter (7.39 mm ; $P=0.04$) when cultivated in

the tailings in relation to the soil. RGR of other species did not differ between treatments. The absence of damage to productivity in plants grown in tailings corroborates previous studies, which showed that the development of plants is not compromised by the presence of metals (Zago et al., 2019; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020). In contrast, plants of *braquiária* had a 43% reduction in dry mass production of the shoot ($P<0.01$; Figure 1) and approximately 25% in clump diameter ($P=0.02$), when grown in tailings compared to soil. *Braquiária* produces a vast fasciculated root system, which can improve soil quality, especially in relation to structuring and accumulation of organic matter (Salton and Tomazi, 2014), characteristics that make this species suitable for cultivation in the region affected by the tailings (Schaefer et al., 2015). However, physical characteristics of tailings may have compromised the growth of *braquiária*, resulting in the lowest dry mass of the stem observed in the present study, as suggested for other species (Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020).

In general, pigment content and Fv/Fm values of the analyzed species did not differ significantly between plants grown in the tailings and the soil (Table 2), which is in agreement with other studies (Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020). The content of chlorophyll b and the chlorophyll/carotenoid ratio in *crotalária* and Fv/Fm in maize were observed to be higher ($P=0.03$; Table 2) in plants grown in tailings compared to those in the soil. None of the studied species showed visual symptoms associated with metal phototoxicity, such as chlorosis and leaf necrosis (Ashraf et al., 2011), which evidences the absence of metal toxicity in the tailings, as found by previous studies (Zago et al., 2019; Esteves et al., 2020; Cruz et al., 2020).

The concentrations of mineral elements in plant tissues varied among species and treatments (Figure 2). Toxic metals such as Pb and Cd were not detected in any of the species investigated here, corroborating data obtained by Coelho et al. (2020) for other

species of economic interest. All plants grown in soil had higher levels of Mg ($P<0.05$) than plants grown in tailings. *Crotalaria* and bean plants had higher K contents ($P<0.01$), while maize, *braquiária* and bean showed higher Al concentrations, when cultivated in the soil compared to in the tailings. Maize plants showed higher levels of B, and *braquiária* of N ($P<0.01$), when cultivated in the soil compared to in the tailings. On the other hand, higher levels of Cu were observed in *crotalaria*, maize and *braquiária* plants; Zn, Fe and Mn in *crotalaria*, maize and bean plants; B ($P<0.02$) and S ($P<0.01$) in *crotalaria* plants; and Na ($P<0.02$) in bean, when cultivated in the tailings compared to the soil. The higher concentrations of Fe and Mn observed in plants grown in the tailings, compared to the soil, reflect the high levels of these metals in the tailings and corroborate results obtained for other species (Andrade et al., 2018; Zago et al., 2019; Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020). The high Fe and Mn tailings content may have also interfered with the absorption of Mg and K, due to the competition of these metals for absorption channels, which reflects in the lower absorption of the Mg and K (Welch and Shuman, 1995; Millaleo et al., 2010).

The source of N used in this study was ammonium sulfate ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), which dissociates into SO_4^{2-} and NH_4^+ ions when in water. During the absorption of ammonium (NH_4^+), H^+ ions are released, which acidifies the rhizosphere and can alter the availability of several essential nutrients to plants (Viani et al., 2014). The decrease in the pH of the tailings, intensified by the presence of NH_4^+ , may have promoted the solubility of minerals and their consequent absorption. The high concentrations of Fe and Mn in the tailings may have contributed to the higher concentrations of these nutrients in plants since the absorption of cationic micronutrients is poorly controlled by root cells (Welch and Shuman, 1995; Grusak et al., 1999). Some studies have indicated that channels with low specificity facilitate the uptake of cations, which can generate an imbalance in the

absorption of elements present in higher concentrations in the substrate, at the expense of others (Welch and Shuman, 1995; Grusak et al., 1999).

Unlike the other species analyzed here, the concentrations of Fe and Mn in the shoot of *braquiária* did not differ between substrate ($P<0.03$). This result indicates a low risk for amplification of these metals in the food chain (Ahmad et al., 2013), with the use of this species as pasture in the region affected by the tailings. In contrast, Coelho et al. (2020) reported high concentrations of Fe and Mn in another forage grass when grown in tailings and pointed out a potential risk of its use for animal feed. Forage grasses are of great importance in the composition of Brazilian pastures (Machado et al., 2010; Valle et al., 2010), and *Brachiaria* species have been used for recovery of the affected area (Renova, 2017). The low concentrations of metals in *braquiária* grown in tailings, as demonstrated in this study, and the ability to soil improvement (Salton and Tomazi, 2014), support its use in pastures in the affected area and in the maintenance of pastoral activity in the region.

Regarding the concentration of metals in maize and bean grains, Ni levels were higher in plants grown in tailings ($P<0.02$; Figure 2). Bean grains produced in the soil had higher levels of Mg and Al than those of plants grown in tailings ($P<0.01$), while the opposite was found for Mn ($P=0.01$; Figure 2). Maize grains from plants grown in tailings showed higher concentrations of S, Fe and Zn compared to those of plants grown in soil ($P=0.03$). Although the concentrations of Fe in maize grains and Mn in bean grains were higher when grown in tailings than in the soil, the levels are below the limits considered critical for human consumption (FAO/WHO, 2011), as has been demonstrated by Andrade et al. (2018) for rice grains. In contrast, the concentrations of Fe and Mn in the shoot of bean and maize cultivated in the tailings are high (Figure 2). Lower levels of metals in grains compared to shoots have also been reported for wheat (Bose and

Bhattacharyya, 2008). Greater accumulation of metals in vegetative parts, in relation to their concentration in reproductive structures, such as grains, is an important mechanism used by plants to minimize possible damage to reproduction and the next generation (Vamerali et al., 2010; Xu et al., 2014). The reduced transport of metals from the shoot to the grains favors cultivation on substrates with high concentrations of metals because it avoids damage to grain quality for consumption purposes (Bose and Bhattacharyya, 2008), as demonstrated in the present study.

The bioaccumulation factor (BF), an index that reflects the ability of plants to accumulate metals and is used in selecting plants for phytoextraction (Zayed and Terry, 1998), varied among species. The trace elements Mn, Zn and Cu showed higher BF values for all species. *Crotalaria* and maize grown in tailings had BF values higher than 1 (one) for Mn, Zn and Cu (Table 3), which characterizes them as potential phytoextractors for these metals, according to Baker (1981) and Yanqun et al. (2005). In addition to higher BF, the content of Mn observed in *crotalaria* and maize was similar to or higher than that of some species described as accumulators of this element (Wang et al., 2008; Juárez-Santillán et al., 2010). Species of the genus *Crotalaria*, as well as maize, have been identified as phytoextractors of metals in contaminated environments (Alidoust et al., 2009; Xu et al., 2014). Plants used in phytoextraction must, among other characteristics, have fast growth, high BF and easy agricultural management (Vamerali et al., 2010; Sarma, 2011), which are all attributes of *crotalaria* and maize. The results of the present study suggest the potential that these species have for the extraction of Mn, Zn and Cu in areas with iron ore tailings.

This study confirmed that the fertilization of tailings makes the cultivation of plants in this substrate feasible and demonstrated the absence of toxicity damage to the development of agricultural species. The results presented here showed that braquiária

(*U. ruziziensis*) did not accumulate high concentrations of metals, which indicates safety use as forage in the area affected by the tailings. The concentrations of metals in bean and maize grains produced in the tailings are within the limits allowed for human ingestion, which makes their consumption feasible. Thus, the results presented here indicate the viability of the resumption of agricultural activity with these species in the region impacted by the iron ore tailings from the rupture of the Fundão dam. Further studies should also evaluate the cultivation directly in the affected region by tailing, to ascertain the implications of the field conditions on the productivity and bioaccumulation. In addition, the high concentrations of Fe and Mn, as well as $FB > 1$ for Mn, Zn and Cu, in the shoot of *crotalaria* and maize identify these species as potential phytoextractors in the areas affected by tailings. However, due to the use of the shoot of these species for animal feed, studies should be carried out in order to assess possible risks of biomagnification of metals in the food chain.

References

- Ahmad, K., Shaheen, M., Khan, Z.I., Bashir, H., 2013. Heavy metals contamination of soil and fodder: a possible risk to livestock. *Sci. Tech. Dev.* 32(2), 140-148.
- Alidoust, D., Suzuki, S., Matsumura, S., Yoshida, M., 2009. The role of citric acid in enhanced phytoextraction of heavy metals in an andosol by *Crotalaria juncea*. *Fresen. Environ. Bull.* 18, 835-842.
- Alvarez V., V.H. Dias, L.E. Ribeiro Júnior, E.S. Souza, R.B., Fonseca, C.A., 2001. Métodos de análises de enxofre em solos e plantas. ed. Universidade Federal de Viçosa, 131p. Viçosa, MG.
- Andrade, G. F., Paniz, F.P., Martins Jr, A.C., Rocha, B. A., Lobato, A. K.S., 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>.
- Ashraf, M. A., Maah, M. J., Yusoff, I., 2011. Heavy metals accumulation in plants growing in ex tin mining catchment. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 8(2), 401-416.
- Baker, A.J., 1981. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant. Nutr.* 3(1-4),643-654. <https://doi.org/10.1080/01904168109362867>.
- 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>.
- Braga, J., Defelipo, B., 1974. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *Rev. Ceres* 21, 73-85.
- Carmo, F.F., Kamino, L. H. Y., Junior, R.T., de Campos, I.C., Carmo, F.F., Silvino, G., Castro, K.J.S.X., Mauro, M.L., Rodriguesa, N.U.A., Miranda, M.P.S., Pinto, C. E.F. 2017.

Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspect. Ecol. Conserv.* 15(3), 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>.

Codex Alimentarius Commission, 2011. Working document for information and use in discussions related to contaminants and toxins in the GSCTFF. CODEX: Rome, Italy.

Coelho, D.G., Marinato, C.S., de Matos, L.P., de 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. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 16(5), 596-607 <https://doi.org/10.1002/ieam4253>.

Cruz, F.V.S. 2018. Desempenho de sementes e plântulas de espécies arbóreas no rejeito oriundo da Barragem de Fundão (Mariana, MG). 2018. Master Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil.

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? *Ecotoxicol Environ Safety*, 189, 110021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110021>

EMBRAPA, 2011. Manual de métodos de análise de solo/Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2a ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 225p.

Esteves, G.F., Souza, K.R.D., Bressanin, L. A., Andrade, P.C.C., Júnior, V.V., Reis, P.E., Silva, A.B., Mantovani, R.J., Magalhães, P.C., Pasqual, M., Souza, T.C., 2020. Vermicompost improves maize, millet and sorghum growth in iron mine tailings. *Environ. Manag.* 264, 110468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110468>.

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 Jr. P.M., Millan, V.E.G., Mielke, C., Ramirez, J. L., Neves, A., Rogass, C., Ribeiro, S.P.,

Scariot, A., Fernandes, S., 2016. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Nat. Conserv.* 14(2), 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.10.003>.

Grusak, M.A., Pearson, J.N., Marentes, E., 1999. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. *Field Crops Res.*, 60(1-2), 41-56. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00132-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00132-4).

Hell, R., Stephan, U.W., 2003. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. *Planta* 216(4), 541-551. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0920-4>.

IBGE, 2018. Produção Agrícola Municipal (PAM) 2018. *Prod. agric. munic.*, Rio Janeiro 45, 1-8.

Juárez-Santillán, L.F., Lucho-Constantino, C.A., Vázquez-Rodríguez, G.A., Cerón-Ubilla, N.M., Beltrán-Hernández, R. I., 2010. Manganese accumulation in plants of the mining zone of Hidalgo, Mexico. *Bioresour Technol.* 101(15), 5836-5841. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.020>.

Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology*. Academic Press, pp. 350-382.

Machado, L.A.Z., Lempp, B., Valle, C.B., Jank, L., Batista, L.A.R., Postiglioni, S.R., Resende, R.M. S., Fernandes, C.D., Verzignassi, J.R., Valentim, J.F., Assis, G.M.L., Andrade, C.M.S., 2010. Principais espécies forrageiras utilizadas em pastagens para gado de corte. In: Pires, A.V. (Ed.). *Bovinocultura de Corte*. Piracicaba: Fealq, pp.375-417.

Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P., Zerbi, G., 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. *Environ. Pollut.* 132(1), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.04.001>.

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. *J. Soil Sci. Plant. Nutr.* 10(4), 470-481. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>.

Mudgal, V., Madaan, N., Mudgal, A., Singh, R.B., Mishra, S., 2010. Effect of toxic metals on human health. *Open Nutraceuticals J.* 3(1), 94-99. <http://dx.doi.org/10.2174/18763960010030100094>.

Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agron J.*, 65(1), 109-112. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.0002196200650001003x>.

Poorter, H., Nagel, O., 2000. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review. *Aust. J. Plant Physiol.* 27(12), 1191-1191. https://doi.org/10.1071/PP99173_CO.

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? *Sci. Total Environ.* 637, 498-506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.370>.

Radford, P.J., 1967. Growth analysis formulae - their use and abuse. *Crop Science*, 7:171-175. <https://doi.org/10.2135/cropsci1967.0011183X000700030001x>.

Renova, 2017. Atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado PRAI. Fundação Renova. Available at: https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2017/01/prai_renova_jan17_rev03.pdf. Accessed date: 20 July 2020.

Roy, M., McDonald, L.M., 2015. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils. *Land Degrad. Dev.* 26(8), 785-792. <https://doi.org/10.1002/ldr.2237>.

- Salton, J.C., Tomazi, M., 2014. Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo. Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico (INFOTECA-E) 1-6.
- Santos, O.S.H., Avellar, F.C., Alves, M., Trindade, R.C., Menezes, M.B., Ferreira, M.C., França, G.S. Cordeiro, J., Sobreira, F.G., Yoshida, I.M. Moura, P.M., Baptista, M.B., Scotti, M. R., 2019. Understanding the environmental impact of a mine dam rupture in Brazil: Prospects for remediation. *J. Environ. Qual.* 48(2), 439-449. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.04.0168>.
- Sarma, H., 2011. Metal hyperaccumulation in plants: a review focusing on phytoremediation technology. *J. Environ. Sci. Technol.* 4(2), 118-138. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.118.138>.
- Segura, F.R., Nunes, E.A., Paniz, F.P., Paulelli, A.C.C., Rodrigues, G.B., Braga, G.Ú.L., Pedreira-Filho, W.R., Barbosa, F., Cerchiaro, G., Silva, F.F., Batista, B.L., 2016. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environ. Pollut.* 218, 813-825. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>.
- Schaefer, C.E.G.R., Santos, E. E., de 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. *Arq. Mus. Hist. Nat. Jardim Bot. UFMG* 24(1-2), 105-135.
- Silva, D.L., Ferreira, M.C., Scotti, M.R., 2015. O maior desastre ambiental brasileiro: De Mariana (MG) a Regência (ES). *Arq. Mus. Hist. Nat. Jardim Bot.* 157:136-158.
- Valle, C.B., Macedo, M.C.M., Euclides V.P.B., Jank, L., Resende, R.M.S., 2010 Gênero *Brachiaria*, in Fonseca, D.M., Martuscelo, J.A. (Eds.) *Plantas Forrageiras*. Viçosa, pp. 30-77.

Vamerali, T., Bandiera, M., Mosca, G., 2010. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environ. Chem. Lett.* 8(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0268-0>.

Viani, R.A., Rodrigues, R.R., Dawson, T. E., Lambers, H., Oliveira, R.S., 2014. Soil pH accounts for differences in species distribution and leaf nutrient concentrations of Brazilian woodland savannah and seasonally dry forest species. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 16(2), 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2014.02.001>.

Wang, X., Liu, Y., Zeng, G., Chai, L., Xiao, X., Song, X., Min, Z., 2008. Pedological characteristics of Mn mine tailings and metal accumulation by native plants. *Chemosphere* 72(9), 1260-1266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.05.001>.

Welch, R.M., Shuman, L., 1995. Micronutrient nutrition of plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 14(1), 49-82. <https://doi.org/10.1080/07352689509701922>.

Xu, T., Xie, F., Wei, Z., Zeng, S., Wu, Q.T., 2014. Phytoremediation of sewage sludge and use of its leachate for crop production. *Environ. Technol.* 36(23), 3000-3007. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.955061>.

Yanqun, Z., Yuan, L., Jianjun, C., Haiyan, C., Li, Q., Schwartz, C., 2005.

Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China. *Environ. Int.* 31(5), 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.02.004>.

Zago, V.C.P., 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. *Environ. Pollut.* 249, 1029-1037. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.060>.

Zayed, A., Gowthaman, S., Terry, N. (1998). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. *J. Environ. Qual.* 27(3), 715-721. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700030032x>.

Table 1. Concentrations of chemical elements in the ore and iron tailings from the Fundão dam and in the soil. ND - not detected.

Elements	Tailing	Soil
Ca	1102.37 ± 1329.81	1743.63 ± 1106.61
K	246.14 ± 394.56	526.46 ± 435.79
Mg	318.07 ± 387.48	551.24 ± 400.26
P	1119.4 ± 1283.14	1885.18 ± 1339.98
S	156.13 ± 185.14	252.48 ± 178.55
Mn	863.61 ± 316.22	625.5 ± 265.65
Fe	186496.27 ± 126211.46	113731.45 ± 129100.4
Zn	41.94 ± 12.06	48.81 ± 12.38
Cu	5.21 ± 0.58	27.81 ± 0.55
Na	19.24 ± 17.75	2,26 ± 4.52
As	ND	26.58 ± 1.05
Cd	ND	ND
Cr	24.82 ± 2.09	55.61 ± 1.5
Ni	9.21 ± 8.27	15.29 ± 8.79
Al	32719.95 ± 49767.24	62219.7 ± 50724.07
Pb	13.06 ± 16.58	23.73 ± 20.56

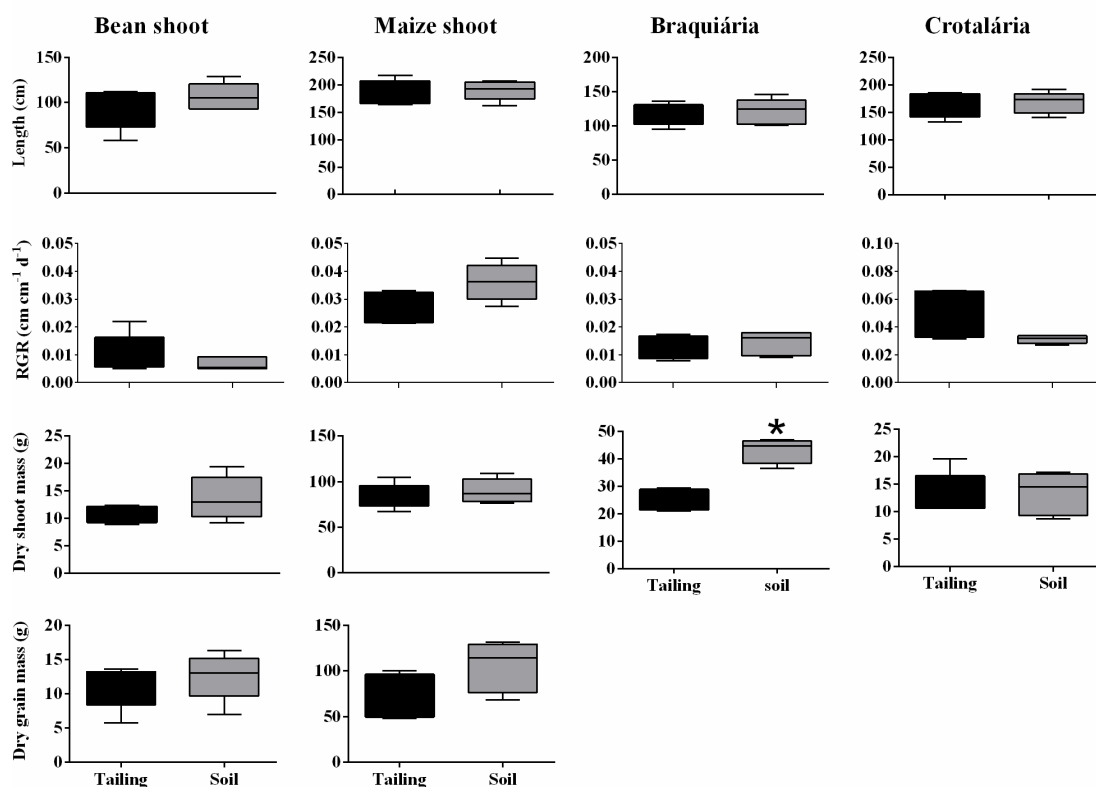


Figure 1. Length, relative growth rate (RGR) and dry mass per plant of the shoot of *braquiária* and *crotalária* after 60 days and bean and maize after complete grain maturation, and dry mass of grains from these last two, grown in tailings from the Fundão dam and in soil. * indicates difference between treatments ($P < 0.05$).

Table 2. Pigment content ($\mu\text{g g}^{-1}$) and potential quantum yield of PS II (Fv/Fm) in leaves of two forage species (*braquiária* and *crotalária*) and two grain producers (bean and maize) grown in the iron ore tailings from the Fundão dam and soil. * indicates difference between treatments (P <0.05). Chl: chlorophyll; Car: carotenoids

Parameter	Bean		Maize		Crotalária		Braquiária	
	Tailings	Soil	Tailings	Soil	Tailings	Soil	Tailings	Soil
Chl a	706.2 ± 39.3	675.5 ± 36.5	1013 ± 203.2	1303 ± 109.5	1460 ± 119.2	1290 ± 106.9	618.3 ± 93.1	565.3 ± 61.0
Chl b	277.2 ± 21.1	229.3 ± 21.9	336.0 ± 37.2	399.8 ± 27.6	589.3 ± 55.0*	431.4 ± 38.8	277.1 ± 25.0	263.5 ± 16.5
Total chl	923.4 ± 51.41	983.4 ± 59.24	1314 ± 248.6	1703 ± 135.8	2049 ± 167.7	1722 ± 140.1	879.4 ± 115.8	828.8 ± 76.5
Chl a/b	2.569 ± 0.09	2.477 ± 0.25	3.24 ± 0.22	3.251 ± 0.10	2.50 ± 0.15	3.02 ± 0.168	2.34 ± 0.17	2.12 ± 0.120
Car	34.57 ± 1.7	28.91 ± 5.1	40.22 ± 7.9	50.09 ± 3.6	55.52 ± 5.1	53.31 ± 4.0	25.70 ± 4.3	22.62 ± 3.4
Chl/car	28.43 ± 0.75	30.42 ± 3.3	33.01 ± 0.69	33.95 ± 0.47	37.20 ± 1.5*	32.30 ± 0.89	35.09 ± 2.0	38.12 ± 2.6
Fv/Fm	0.80 ± 0.00	0.82 ± 0.00	0.84 ± 0.00*	0.79 ± 0.01	0.81 ± 0.03	0.86 ± 0.00	0.80 ± 0.01	0.82 ± 0.00

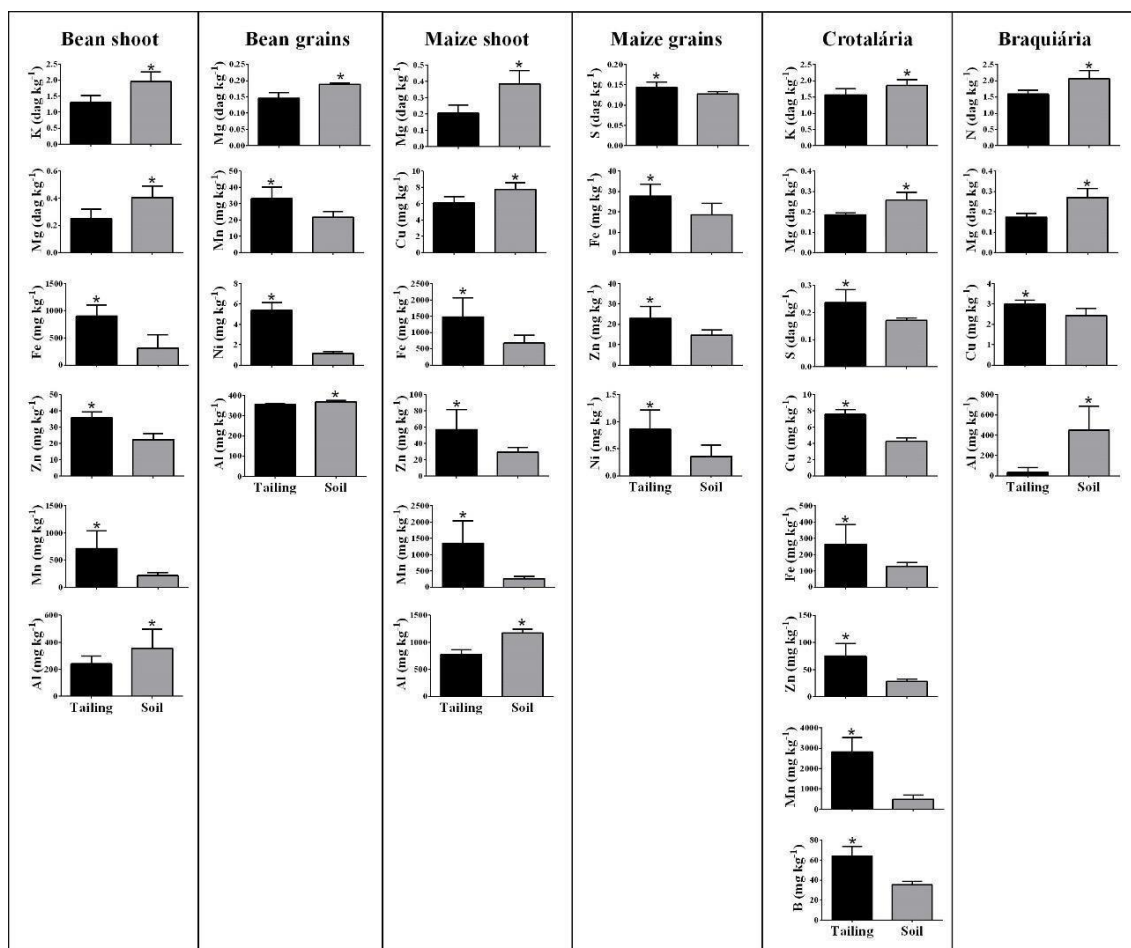


Figure 2. Concentrations of chemical elements, that significantly different between treatments ($P < 0.05$), for the shoot of *braquiária* and *crotalária*, after 60 days of cultivation, and in the shoot and grains of bean and maize, of plants in the period harvest, grown in iron ore tailings from the Fundão dam (light bars) and in soil (dark bars). * indicates difference between treatments ($P < 0.05$).

Table 3. Bioaccumulation factor (FB) of metals in the shoot of bean, maize, *braquiária* and *crotalária* plants, grown in the iron ore tailings from the rupture of the Fundão dam and in soil. ND - not detected.

Element	Bea		Mai e		Crotal ria		Braquiária	
	Tailing	Soil	Tailing	Soil	Tailing	Soil	Tailing	Soil
Cu	0,732	0,115	1,122	0,264	1,448	0,152	0,576	0,087
Fe	0,004	0,002	0,007	0,005	0,001	0,001	0,002	0,003
Zn	0,854	0,460	1,361	0,597	1,788	0,580	0,448	0,395
Mn	0,717	0,344	2,117	0,534	3,250	0,783	0,055	0,071
Ni	ND	ND	0,039	0,021	0,177	0,079	ND	ND
Al	0,007	0,010	0,023	0,017	0,002	0,001	0,001	0,012

Capítulo 2

**Viabilidade do cultivo de hortaliças no rejeito de minério de ferro da Samarco:
acumulação de metais e riscos à segurança alimentar**

Resumo

O rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão, no sudeste do Brasil, encontra-se depositado em áreas agricultáveis. A presença desse material gera insegurança para a retomada das atividades agrícolas, sobretudo o cultivo de hortaliças, as quais podem acumular metais em níveis potencialmente tóxicos. Neste estudo, cultivou-se rúcula e rabanete no rejeito e em solo, ambos adubados e acrescidos em 25% de areia, e analisou-se a produtividade, o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes, o desempenho fotossintético, acúmulo de metais nas plantas e o possível risco à segurança alimentar, através do consumo de vegetais cultivados no rejeito. A produtividade da rúcula e do rabanete não diferiu entre os tratamentos. Não foram observadas alterações nos teores de pigmentos, bem como diferenças substanciais nos parâmetros fotossintéticos das plantas analisadas. Plantas cultivadas no rejeito apresentaram maiores teores de Fe, Mn e Na, em relação ao solo controle, o que reflete os maiores teores desses elementos no rejeito. Não foram evidenciados sinais visuais de toxicidade por metais em plantas cultivadas no rejeito. Os níveis de metais ingeridos através do consumo estimado de rúcula e rabanete estão abaixo dos limites máximos permitidos para o consumo humano, de acordo com normas internacionais de saúde. Os resultados aqui apresentados sugerem a viabilidade do cultivo agrícola no rejeito e contribuem para a retomada do cultivo de hortaliças na região afetada pelo rejeito liberado com o rompimento da barragem de Fundão.

Palavras-chave: Fotossíntese, Produtividade; Rúcula; Rabanete; Acumulação de metais.

Introdução

A poluição por metais, decorrente da atividade mineradora, representa uma séria ameaça ao meio ambiente e à segurança alimentar (Ashraf et al., 2011; Pandey et al. 2016). O consumo de vegetais cultivados em regiões com altas concentrações de metais pode acarretar riscos à saúde humana (Martin e Griswold, 2009; Gupta et al., 2013; Yadav et al., 2013). Hortaliças são capazes de absorver altos níveis de metais do ambiente e acumulá-los em partes comestíveis, representando uma importante via de contaminação da cadeia alimentar (Cob et al., 2000; Yadav et al., 2013; Hu et al., 2017; Ugya et al., 2019). Desse modo, é fundamental investigar o conteúdo de metais em hortaliças cultivadas em ambientes contaminados, para uma maior compreensão dos riscos aos quais os consumidores estão submetidos (Muchuweti et al., 2006; Al-Hammad e El-Salam 2016; Ugya et al., 2019).

Além de riscos à segurança alimentar, a absorção excessiva de metais, mesmo que essenciais como Fe, Mn, Cu, Zn e Ni, pode reduzir a produtividade das culturas agrícolas (Sinha e Gupta, 2005; Sharma e Agrawal, 2005; Ashraf et al., 2011). A disponibilidade dos nutrientes no solo está relacionada a diversos fatores tais como pH, potencial redox, composição do substrato, além da atividade microbiana (Basta et al., 2005; Martínez-Alcalá e Bernal, 2020). Quando o conjunto desses fatores favorece a absorção, e os elementos minerais são acumulados em concentrações supraótimas pelas plantas, podem ocorrer prejuízos como anomalias nos órgãos vegetais e redução na incorporação de biomassa (Gupta et al., 2007; Ashraf et al., 2011). Além de alterações morfológicas, plantas submetidas a estresse por metais podem apresentar prejuízos na fotossíntese, como reflexo da redução no conteúdo de pigmentos fotossintetizantes, no rendimento quântico máximo do PSII e na assimilação de CO₂ (Pereira et al., 2013; Briat et al., 2015; Sarwar et al., 2015).

No Brasil, a região afetada pelo rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG) recebeu um grande aporte de rejeito de minério de ferro, o que tem sido sugerido como potencial risco à retomada da atividade agrícola na área (Silva et al., 2015; Fernandes et al., 2016). Tem sido demonstrado que o rejeito apresenta baixa fertilidade, alta compactação e elevados teores de Fe e Mn (Segura et al., 2016; Andrade et al., 2018; Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020), além de traços de Cr, Zn, Ni, Cu, Pb (Queiroz et al., 2018). Estudos que avaliaram o desenvolvimento de espécies nativas (Cruz et al., 2020) e de interesse agrícola (Andrade et al., 2018; Esteves et al., 2020; Coelho et al., 2020) crescidas no rejeito, apontaram a baixa fertilidade como o principal entrave ao

desenvolvimento, não sendo observados sintomas de estresse por metais. Entretanto, as espécies avaliadas apresentaram elevadas concentrações de Fe e Mn, tanto na parte aérea quanto nas raízes (Andrade et al, 2018; Cruz et al., 2020; Coelho et al., 2020; Esteves et al., 2020), o que gera incerteza na segurança do consumo de produtos agrícolas provenientes do local, por humanos e animais .

Há uma lacuna no conhecimento relativo ao cultivo de hortaliças no rejeito, sobretudo pelo pequeno número de estudos com este enfoque. Hortaliças folhosas, como a rúcula, e com raízes tuberosas como o rabanete, além de representarem importantes fontes alimentares, compreendem notáveis indicadores da biodisponibilidade de metais no substrato (Dungan e Dees, 2007; Al-Hammad e El- Salam 2016; Summa et al., 2019). Sendo assim, tais espécies representam modelos para o entendimento de como ocorre o acúmulo de metais em folhas e raízes tuberosas consumidas por seres humanos, quando cultivados no rejeito de minério de ferro. Com base nestes pressupostos, objetivou-se, com este estudo, analisar o desempenho (produtividade), atributos fotossintéticos, o acúmulo de metais, e a viabilidade de consumo de rúcula e rabanete cultivados no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão, com o intuito de oferecer subsídios para a retomada da atividade agrícola na região afetada pelo rompimento da barragem de Fundão.

Materiais e métodos

Cultivo das plantas

As plantas foram cultivadas em rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, coletado em 2018 às margens do rio Gualaxo do Norte, município de Mariana, MG, e em um solo agrícola coletado no município de Sete Lagoas, MG. O rejeito possui maiores conteúdos de Na ($0,019 \text{ g kg}^{-1}$), Fe ($18,65 \text{ g kg}^{-1}$) e Mn ($0,86 \text{ g kg}^{-1}$) em relação ao solo (Na = $0,002 \text{ g kg}^{-1}$; Fe = $11,37 \text{ g kg}^{-1}$; Mn = $0,62 \text{ g kg}^{-1}$). No solo foi constatada a presença de arsênio ($0,026 \text{ g kg}^{-1}$), o qual não está presente no rejeito, além de maiores conteúdos de Al ($6,22 \text{ g kg}^{-1}$) em relação ao rejeito ($3,27 \text{ g kg}^{-1}$). O rejeito possui pH alcalino (7,2), enquanto o solo controle tem o pH levemente ácido (6,1) (Almeida et al., 2020, Capítulo 1). Em decorrência das características nutricionais e físicas do rejeito (Zago et al., 2019; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020; Almeida, 2020, Capítulo 1) e do solo (Almeida, Capítulo 1), ambos os substratos foram adubados com NPK (8-28-16),

tendo o sulfato de amônio como fonte de N. Além disso ambos os substratos foram misturados com areia lavada na proporção de 1:3 para melhorar a drenagem.

Foram selecionadas duas hortaliças, uma folhosa, *Eruca vesicaria* ssp. *sativa* (rúcula; cultivar Cultivada), e uma com raízes tuberosas *Raphanus sativus* (rabanete; cultivar Cometa). Estas espécies, que representam importantes modelos para análise de acumulação de metais, são produzidas e consumidas no Brasil. As sementes foram germinadas em câmara de germinação a 25 °C sob fotoperíodo de 12 horas ($40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Plântulas homogêneas foram selecionadas e transferidas para vasos de 2L (uma planta por vaso) e a irrigação foi mantida na capacidade de campo ao longo do experimento. Para cada espécie foram utilizadas 10 repetições por tratamento, sendo o experimento conduzido em delineamento inteiramente casualizado. As medidas não destrutivas foram realizadas após quatro semanas e as plantas colhidas após 40 dias de cultivo, quando foram contabilizados o número de folhas e determinada a massa seca da parte aérea e das raízes.

Parâmetros fotossintéticos e pigmentos

Atributos fotossintéticos foram mensurados no segundo par de folhas totalmente expandidas. Parâmetros referentes à fluorescência da clorofila foram analisados usando-se um fluorômetro portátil modulado (modelo PAM-2500, Walz, Effeltrich, Alemanha). Para verificar o rendimento quântico máximo (F_v/F_m), as folhas foram aclimatadas por 30 minutos, e após esse período a fluorescência mínima (F_0) foi aferida sob uma luz moduladora fraca ($0,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a fluorescência máxima (F_m) por um pulso saturante de luz ($8000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), durante 0,8 s. Para determinação da resposta fotossintética a diferentes intensidades luminosas, as folhas foram expostas a intensidades de luz actínica crescente ($0-3000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), em treze etapas, com 30 s de duração cada, para verificação dos seguintes parâmetros: F_s (fluorescência em estado estacionário) e F_m' (fluorescência máxima de folhas adaptadas à luz). Com base nesses valores, foram calculadas dissipação não-fotoquímica, $\text{NPQ} = (F_m - F_m')/F_m'$ (Bilger e Bjorkman, 1990) e o rendimento quântico efetivo do fotossistema II, $\phi_{II} = (F_m' - F_s)/F_m'$ (Genty et al., 1989). A taxa de transporte de elétrons (ETR) foi calculada como $\text{ETR} = \phi_{II} \times \text{PAR} \times 0,84 \times 0,5$, onde PAR = radiação fotossinteticamente ativa, 0,84 = fração de luz absorvida pelas folhas, e 0,5 = fração da distribuição de energia de excitação no fotossistema II (Melis et al., 1987), sendo verificada a taxa máxima de transporte de elétrons (ETR_{max}). Como ponto de comparação, entre os tratamentos, para NPQ, ϕ_{II} e ETR, utilizou-se o ponto da curva onde a luz actínica compreendeu $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, o

qual representou a luminosidade média do ambiente, bem como o ponto de saturação da fotossíntese.

Foram determinados os conteúdos de clorofila *a* (Chl *a*), clorofila *b* (Chl *b*) e carotenoides (Car). Para extração dos pigmentos foram utilizados três discos foliares de 0,8 cm² cada, os quais foram pesados e imersos em acetona a 80% até a diafanização completa. Após centrifugação, o sobrenadante foi avaliado em um leitor de placas (Thermo, Multiskan GO), nos comprimentos de onda de 663, 646 e 470 nm (Lichtenthaler, 1987).

Medidas de trocas gasosas foram realizadas por meio de um analisador de gás no infravermelho (IRGA) MODELO LI-6400 XT (Li-Cor, Lincoln, NE), com câmara de fluorescência (LI-6400-40). As avaliações foram realizadas entre 08:30 e 11:30 am. A luz da câmara foi ajustada para 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e a temperatura do bloco foi regulada para 25 °C, baseando-se na temperatura média ambiente no dia da avaliação. A concentração de CO₂ na atmosfera variou entre 420 e 440 $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol air}^{-1}$. As folhas avaliadas foram mantidas na câmara até a estabilização da assimilação líquida e condutância estomática. Foram avaliados: assimilação líquida (*A*); condutância estomática (*g_s*); e transpiração (*E*).

Composição química dos tecidos vegetais

Foi determinada a composição química das partes das plantas que são tradicionalmente utilizadas para o consumo humano (parte aérea da rúcula, e raízes tuberosas do rabanete), em cinco repetições por tratamento, foram quantificados os elementos N, P, K, Ca, Mg, S, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Na, Pb, Cr, Cd e B. Inicialmente foi feita a digestão nítrico-perclórica (Sarruge e Haag, 1974): 0,5 g do material moído foi transferido para tubos de digestão, onde acrescentou-se 10 mL da mistura de ácido nítrico + ácido perclórico na proporção 4:1. O material, em seguida, foi conduzido a uma chapa quente pré-aquecida a 80 °C, sendo essa temperatura elevada gradativamente até atingir 200 °C. Assim que o extrato ficou cristalino, foi removido da chapa e posto para resfriar. Sequencialmente o volume foi completado para 25 mL com água deionizada. Para determinação dos micronutrientes, uma alíquota de 5 mL foi retirada do extrato nítrico-perclórico e transferida para um tubo de ensaio, no qual foi adicionado 15 mL de água deionizada. Em seguida a solução foi agitada para determinar a emissão de luz no espectrofotômetro de absorção atômica.

Estimativa de exposição de humanos a metais pelo consumo de vegetais cultivados no rejeito

A ingestão diária de metais (Fe, Mn, Zn, Cu, B e Al), a partir do consumo de rúcula e rabanete cultivados no rejeito, foi estimada com base na equação: Ingestão do metal= [consumo diário de hortaliças (kg) x concentração média do metal (mg kg⁻¹)]/peso corporal (kg) (IPCS, 2008). O consumo médio diário de hortaliças foi obtido a partir de dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) para os anos 2017-2018 no Brasil (IBGE, 2020), na qual é considerado o consumo de hortaliças em geral, sem distinção da espécie, sendo este de 65,14g/dia. Para a estimativa da ingestão diária de Fe, Mn, Zn, Cu, B e Al, os teores foram calculados em mg/kg de massa fresca. O peso corporal médio de um brasileiro com idade superior a 10 anos (63,6 kg) foi obtido a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) e usado como base para os cálculos.

Análises estatísticas

Após a realização de testes de normalidade e homocedasticidade, tendo-se confirmado esses parâmetros, os dados foram submetidos a teste T, a 5% de significância, sendo considerados significativamente diferentes quando valor de P foi inferior a 0,05. As análises foram realizadas no programa GraphPad Prism 5.01 (GraphPad Software, CA, EUA).

Resultados

A biomassa seca da parte aérea e da raiz (Figura 1), bem como o número de folhas, de ambas as espécies, não diferiram significativamente entre os tratamentos (rejeito e solo) ($P>0,05$). O conteúdo de pigmentos e os parâmetros relacionados à fluorescência da clorofila *a* também não diferiram entre os tratamentos para ambas as espécies (Tabela 1). Em relação a parâmetros associados as trocas gasosas, a assimilação líquida (*A*) e a condutância estomática (*g*) não diferiram entre os tratamentos, bem como transpiração para rabanete (*E*). Uma maior taxa de transpiração (*E*) foi detectada em plantas de rúcula crescidas no rejeito quando comparado aquelas cultivadas em solo ($P=0,01$). Os demais parâmetros relacionados às trocas gasosas não diferiram significativamente entre os tratamentos (Tabela 1).

Entre os macronutrientes, a concentração de K foi superior em plantas que se desenvolveram no solo em relação às do rejeito, para ambas as espécies ($P<0,02$; Tabela 2). O conteúdo de P foi maior em plantas de rúcula e de rabanete cultivadas no rejeito, quando comparado àquelas crescidas no solo controle ($P<0,01$). Apenas em rúcula o teor

de Ca foi significativamente superior em plantas crescidas no rejeito em relação às aquelas crescidas no solo ($P < 0,03$).

Para micronutrientes, os níveis de Fe e Mn de ambas as espécies foram superiores em plantas cultivadas no rejeito em relação ao solo ($P < 0,04$; Tabela 2), nas quais também se constatou maiores níveis de Na ($P < 0,01$). As concentrações de Zn e Cu diferiram apenas nos indivíduos de rúcula, sendo superior em plantas crescidas no rejeito, em comparação com o solo ($P < 0,01$). A concentração de Al em ambas as espécies foi superior nas plantas cultivadas no solo, em relação às aquelas crescidas no rejeito ($P < 0,01$). O Ni foi detectado apenas em indivíduos de rúcula que cresceram no solo ($0,11 \text{ mg kg}^{-1}$). Não foram detectados Cd, Cr, e Pb em nenhuma das espécies e tratamentos. Com base no consumo médio diário de hortaliças por um brasileiro adulto, estimou-se a ingestão média diária de Fe, Mn, Zn, Cu, B e Al através do consumo de vegetais provenientes do rejeito, considerando-se esta como a única fonte de hortaliças a serem consumidas (Tabela 3). De acordo com a estimativa, através do consumo de vegetais crescidos no rejeito, o Fe representa o metal ingerido em maiores níveis, sobretudo através do consumo de folhas de rúcula, enquanto Cu compreende aquele consumido em menores concentrações, quando comparados aos demais elementos (Tabela 3).

Discussão

A manutenção da produtividade das hortaliças analisadas neste estudo corrobora o evidenciado anteriormente para graníferas de interesse agrícola (Almeida, Capítulo 1). A ausência de efeitos sobre parâmetros relacionados à fluorescência da clorofila *a* e teores de pigmentos, contrapõe o constatado em estudos anteriores, nos quais foram observadas alterações em parâmetros fotossintéticos (Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020) e nos teores de pigmentos (Andrade et al., 2018) em plantas cultivadas no rejeito em relação a outros substratos. A ausência de efeitos do cultivo no rejeito sobre parâmetros fotossintéticos e teores de pigmentos pode estar associada ao fornecimento de nutrientes, através da adubação, tendo em vista que a carência de nutrientes foi sugerida, em outros estudos, como fator responsável por alterações em tais parâmetros (Andrade et al., 2018; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020). Uma redução na taxa transpiratória de plantas de rúcula crescidas em solo pode ser reflexo dos maiores teores de Al presente em seus tecidos, em relação aos de plantas cultivadas no rejeito. Maiores concentrações de Al interferem na condutância hidráulica, afetando o potencial hídrico foliar, o que pode ter

resultado na redução da transpiração da rúcula como estratégia para redução da perda de água (Banhos et al., 2016; Silva et al., 2018; Gavassi et al., 2020).

A adubação fornecida possivelmente supriu a carência de alguns macronutrientes no rejeito, verificada por estudos anteriores (Andrade et al., 2018; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020), o que promoveu o desenvolvimento e a produtividade das hortaliças de forma similar em ambos os substratos avaliados neste estudo. Os menores teores de P para ambas as espécies quando crescidas no solo podem estar associados à maior concentração de Al neste substrato, em relação ao rejeito. Em solos com alta saturação por alumínio a interação entre os elementos P-Al pode resultar em formas insolúveis de P, o que reduz sua disponibilidade para as plantas (Mora et al., 2002; Redel et al., 2016; Barrow, 2017; Penn e Camberato, 2019). A presença de Al, em maiores concentrações nos indivíduos de rúcula crescidos no solo, também pode estar relacionada aos menores níveis de Ca nestes, em relação àqueles crescidos no rejeito. O Al pode competir com outros cátions, como o Ca, pelo sítio de ligação no apoplasto (Marschner, 1991), além de afetar a absorção e a translocação de Ca por bloquear os canais de cálcio na membrana plasmática (Oleksyn et al., 1996; Ribeiro et al., 2013).

Os níveis mais elevados de Na detectados no rejeito (Segura et al., 2016; Carmo et al., 2017; Santos et al., 2019) refletiram em maiores concentrações desse elemento nas plantas crescidas nesse substrato, em relação àquelas que se desenvolveram no solo. Apesar dos maiores teores de Na em plantas provenientes do rejeito, não foram observados efeitos negativos sobre a produtividade, contrapondo a proposição de Santos et al. (2019), que maiores teores desse íon no rejeito afetaria o desenvolvimento das plantas. Os teores dos metais de indivíduos crescidos no rejeito seguiram a ordem Fe>Mn>Al>Zn>B>Cu para rúcula (folhas) e Fe>Al>Mn> Zn>B>Cu para rabanete (raízes tuberosas). Maiores níveis de Fe e Mn foram observados em ambas as espécies cultivadas no rejeito, enquanto para os outros metais, apenas Zn e Cu foram superiores em plantas de rúcula (folhas) crescidas nesse substrato, em relação àquelas cultivadas no solo. Apesar das maiores concentrações dos metais supracitados em plantas crescidas no rejeito, não foram observados sinais visuais de toxicidade por metais, assim como previamente constatado para outras espécies (Coelho et al., 2020; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020).

Os maiores teores de Fe e Mn verificados nos indivíduos de rúcula e rabanete cultivados no rejeito, quando comparados ao níveis de outros metais, corroboram resultados de estudos anteriores (Andrade et al., 2018; Zago et al., 2019; Coelho et al.,

2020; Cruz et al., 2020; Esteves et al., 2020; Queiroz et al., 2018). O pH do rejeito é alcalino (7,2), característica que geralmente reduz a disponibilidade de Fe (Bañuelos e Ajwa 1999; Bose e Bhattacharyya 2008). Entretanto, a fonte de N utilizada no presente estudo foi sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄), o qual é dissociado em íons SO₄²⁻ e NH₄⁺. O amônio (NH₄⁺), quando absorvido libera H⁺, acidificando o pH da rizosfera (Rodriguez et al., 2008). Além disso, tem sido documentado que canais de cátions divalentes, identificados para a entrada Ca²⁺ na membrana da célula vegetal, podem atuar no transporte de outros íons presentes no substrato, compreendendo uma importante estratégia para absorção de micronutrientes catiônicos divalentes como o Fe²⁺ (Welch, 1995; Grusak et al. 1999). Dessa forma, os maiores teores de Fe no rejeito, aliados à acidificação provocada pela adubação e à presença de canais de baixa especificidade, podem ter favorecido a absorção do Fe em plantas crescidas nesse substrato. Os elevados níveis de Fe, em plantas crescidas no rejeito, podem ter refletido nos maiores teores de Ca em indivíduos de rúcula cultivadas nesse substrato, como estratégia para minimizar possíveis efeitos estressores desse metal, em decorrência do papel do Ca em mecanismos de defesa em plantas sob condições de estresse por excesso de metais (Hirschi, 2004; Parvin et al., 2019).

Folhas de rúcula e raízes tuberosas de rabanete cultivadas no rejeito acumularam Fe, Mn, Zn, Al, B e Cu abaixo dos limites superiores permitidos para o consumo humano (WHO, 1996). Deste modo, a exposição de humanos a Fe, Zn, Al e Cu, por meio do consumo de rúcula e rabanete cultivados no rejeito, seria inferior aos limites determinados pela FAO/WHO (2011) (0,8, 1,0, 0,14 e 0,5 mg kg pc⁻¹ dia⁻¹, respectivamente). O limite de ingestão seguro para o B corresponde 9,6 mg kg pc⁻¹ dia⁻¹ (Murray, 1995), o qual é superior ao detectado nas plantas no presente estudo. Apesar de não ter sido encontrada uma dose limite diária segura para ingestão de Mn dada em mg kg pc⁻¹ dia⁻¹, WHO (1996) sugere um limite para a ingestão desse elemento por um adulto como 3,5 mg dia⁻¹. Tomando-se como base um adulto com peso corporal de 63,6 kg, a ingestão diária desse elemento, através do consumo das plantas aqui analisados, seria para rúcula de 1,47 mg/dia⁻¹ e para rabanete 0,28 mg dia⁻¹, ambas abaixo do limite sugerido por WHO (1996). Dessa forma, as concentrações de metais em folhas de rúcula e raízes tuberosas de rabanete, cultivados no rejeito não excederam os valores sugeridos para ingestão diária máxima tolerável estabelecidos por órgãos regulamentadores (WHO, 1996; FAO/WHO, 2011).

A produtividade em biomassa foi mantida nas duas espécies analisadas o que sugere a viabilidade do rejeito a produção vegetal. Diferenças nas concentrações de alguns macronutrientes nos tecidos vegetais, entre os tratamentos, podem ser atribuídas às interações entre esses elementos e os maiores teores de Al no solo e Fe no rejeito. Os maiores teores de Fe, Mn e Na em plantas cultivadas no rejeito, em relação àquelas crescidas no solo, podem ser reflexo das maiores concentrações desses elementos nesse substrato. Entretanto, não foram observados danos à produtividade, bem como sinais visíveis de toxicidade por esses elementos. De acordo com a estimativa de ingestão diária, os teores de metais absorvidos, através do consumo das plantas produzidos no rejeito, estão abaixo dos limites permitidos para o consumo humano (WHO, 1996; FAO/WHO, 2011). Os resultados obtidos neste estudo sugerem a possibilidade da retomada da atividade agrícola na região afetada pelo rompimento da barragem de Fundão.

Referências

- Al-Hammad, B.A., Abd El-Salam, M.M., 2016. Evaluation of heavy metal pollution in water wells and soil using common leafy green plant indicators in the Al-Kharj region, Saudi Arabia. *Environ. Monit. Assess.* 188. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5331-2>
- Andrade, G.F., Paniz, F.P., Martins, 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>
- Ashraf, M.A., Maah, M.J., Yusoff, I., 2011. Heavy metals accumulation in plants growing in ex tin mining catchment. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 8, 401–416. <https://doi.org/10.1007/BF03326227>
- Basta, N.T., Ryan, J.A., Chaney, R.L., 2004. Trace Element Chemistry in Residual-Treated Soil: OF TRACE ELEMENTS WITH COMMON Trace Element Reaction with Iron. *Adsorpt. J. Int. Adsorpt. Soc.* 49–63.
- Banhos, O.F.A.A., Brenda, B.M., da Veiga, E.B., Bressan, A.C.G., Tanaka, F.A.O., Habermann, G., 2016. Aluminum-induced decrease in CO₂ assimilation in “Rangpur” lime is associated with low stomatal conductance rather than low photochemical performances. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 205, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.021>
- Bañuelos, G.S., Ajwa, H.A., 1999. Trace elements in soils and plants: An overview. *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.* 34, 951–974. <https://doi.org/10.1080/10934529909376875>
- Barrow, N.J., 2017. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant Soil* 410, 401–410. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3008-9>

Bilger, W., Björkman, O., 1990. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*. *Photosynth. Res.* 25, 173–185. <https://doi.org/10.1007/BF00033159>

Briat, J.F., Dubos, C., Gaymard, F., 2015. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends Plant Sci.* 20, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005>

Bose, S., Bhattacharyya, A.K., 2008. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge. *Chemosphere* 70, 1264–1272. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.062>

Carmo, Flávio Fonseca do, Kamino, L.H.Y., Junior, R.T., Campos, I.C. de, Carmo, Felipe Fonseca do, Silvino, G., Castro, K.J. da S.X. de, Mauro, M.L., Rodrigues, N.U.A., Miranda, M.P. de S., Pinto, C.E.F., 2017. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspect. Ecol. Conserv.* 15, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>

Cobb, GP, Sands, K, Waters, M, Wixson, BG, Dorward-King, E, 2000. Accumulation of heavy metals by vegetables grown in mine wastes. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 19, 3, 600–607. <https://doi.org/10.1002/etc.5620190311>

Coelho, D.G., Marinato, C.S., de Matos, L.P., de Andrade, H.M., da Silva, V.M., Neves, P.H.S., de Oliveira, J.A., 2020. Evaluation of Metals in Soil and Tissues of Economic-Interest Plants Grown in Sites Affected by the Fundão Dam Failure in Mariana, Brazil. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 16, 596–607. <https://doi.org/10.1002/ieam.4253>

Cruz, F.V. da 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? *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110021>

Dungan, R.S., Dees, N.H., 2007. Use of spinach, radish, and perennial ryegrass to assess the availability of metals in waste foundry sands. *Water. Air. Soil Pollut.* 183, 213–223. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9370-8>

Esteves, G. de F., de Souza, K.R.D., Bressanin, L.A., Andrade, P.C.C., Veroneze Júnior, V., dos Reis, P.E., da Silva, A.B., Mantovani, J.R., Magalhães, P.C., Pasqual, M., de Souza, T.C., 2020. Vermicompost improves maize, millet and sorghum growth in iron mine tailings. *J. Environ. Manage.* 264. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110468>

FAO/WHO, 2011. Working document for Information and use in discussion related to contaminants and toxins in the GSCTFF. *Jt. FAO/WHO Food Stand. Program. Codex Comm. Contam. Foods* 1–90. <https://doi.org/10.3768/rtipress.2014.rb.0007.1405>

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 socio-economic impacts of

the dam breach in Mariana, Brazil. *Nat. e Conserv.*
<https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.10.003>

Gavassi, M.A., Dodd, I.C., Puértolas, J., Silva, G.S., Carvalho, R.F., Habermann, G., 2020. Aluminum-induced stomatal closure is related to low root hydraulic conductance and high ABA accumulation. *Environ. Exp. Bot.* 179, 104233.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104233>

Genty, B., Briantais, J.M., Baker, N.R., 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochim. Biophys. Acta - Gen. Subj.* 990, 87–92. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(89)80016-9)

Grusak, M.A., Pearson, J.N., Marentes, E., 1999. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. *Field Crops Research*, 60(1-2), 41-56.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00132-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00132-4)

Gupta, A.K., Dwivedi, S., Sinha, S., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Singh, S.N., 2007. Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus vulgaris* grown in fly ash amended soil. *Bioresour. Technol.* 98, 3404–3407. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.016>

Gupta, S., Jena, V., Jena, S., Davi, N., Mati, N., Radojevi, D., Solanki, J.S., 2013. Assessment of heavy metal contents of green leafy vegetables. *Croat. J. Food Sci. Technol.* 5, 53–60.

Hirschi, K.D., 2004. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiol.* <https://doi.org/10.1104/pp.104.046490>

Hu, B, Zhou, J, Liu, L, Meng, W, Wang, Z 2017. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk in soils of Tianjin Sewage Irrigation Region, North China. *J Environ Anal Toxicol*, 7, 1, 425-431. <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000425>

IBGE, I.B. de G. e E.-, 2020. Pesquisa de orçamentos familiares 2017-2018: avaliação nutricional da disponibilidade domiciliar de alimentos no Brasil / IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento.

IBGE, I.B. de G. e E.-, 2010. Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008-2009: antropometria e estado nutricional de crianças, adolescentes e adultos no Brasil/ IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento.

Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology*. Academic Press, pp. 350-382.

Martin, S, Griswold, W, 2009. Human health effects of heavy metals. *Environmental Science and Technology briefs for citizens*, 15, 1-6.

Martínez- Alcalá, I, Bernal, MP, 2020. Environmental Impact of Metals, Metalloids, and Their Toxicity, in: R. Deshmukh, D. K., T.G. Guerriero (Eds.) *Metalloids in Plants*, pp. 451-488

Marschner, H., 1991. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils, in: R.J. Wright, V. C. Baligar, R.P. Murrmann (Eds.), *Plant-Soil Interactions at Low pH*, Springer Netherlands, 1991.

- MELIS, A., Spangfort, M., Andersson, B., 1987. Light- Absorption and Electron- Transport Balance Between Photosystem Ii and Photosystem I in Spinach Chloroplasts. *Photochem. Photobiol.* 45, 129–136. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1987.tb08413.x>
- Mora, M.L., Cartes, P., Demanet, R., Cornforth, I.S., 2002. Effects of lime and gypsum on pasture growth and composition on an acid Andisol in Chile, South America. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33, 2069–2081. <https://doi.org/10.1081/CSS-120005749>
- Muchuweti, M., Birkett, J.W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M.D., Lester, J.N., 2006. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.028>
- Murray, FJ, 1995. A human health risk assessment of boron (boric acid and borax) in drinking water. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 22, 3, 221-230. <https://doi.org/10.1006/rtp.1995.0004>
- Oleksyn, J., Karolewski, P., Giertych, M.J., Werner, A., Tjoelker, M.G., Reich, P.B., 1996. Altered root growth and plant chemistry of *Pinus sylvestris* seedlings subjected to aluminum in nutrient solution. *Trees* 10, 135–144. <https://doi.org/10.1007/pl00009642>
- Pandey, B., Agrawal, M., Singh, S., 2016. Ecological risk assessment of soil contamination by trace elements around coal mining area. *J. Soils Sediments* 16, 159–168. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1173-8>
- Parvin, K., Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Fujita, M., 2019. Calciummediated growth regulation and abiotic stress tolerance in plants. In: Hasanuzzaman, M., Hakeem, K., Nahar, K., Alharby, H. (Eds.), *Plant Abiotic Stress Tolerance*. Springer, Cham, pp. 291–331. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_13.
- Penn, C.J., Camberato, J.J., 2019. A critical review on soil chemical processes that control how soil ph affects phosphorus availability to plants. *Agric.* 9, 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
- Pereira, E.G., Oliva, M.A., Rosado-Souza, L., Mendes, G.C., Colares, D.S., Stopato, C.H., Almeida, A.M., 2013. Iron excess affects rice photosynthesis through stomatal and non-stomatal limitations. *Plant Sci.* 201–202, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.12.003>
- IPCS, 2008. Principles and Methods for the Risk Assessment of Chemicals in Food Chapter 6 : Dietary Exposure Assessment of Chemicals in Food 1–61.
- 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? *Sci. Total Environ.* 637–638, 498–506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.370>
- Redel, Y., Cartes, P., Velásquez, G., Poblete-Grant, P., Poblete-Grant, P., Bol, R., Mora, M.L., 2016. Assessment of phosphorus status influenced by al and fe compounds in

volcanic grassland soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 16, 490–506. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000041>

Ribeiro, M.A.Q., Almeida, A.A.F. de, Mielke, M.S., Gomes, F.P., Pires, M.V., Baligar, V.C., 2013. Aluminum Effects on Growth, Photosynthesis, and Mineral Nutrition of Cacao Genotypes. *J. Plant Nutr.* 36, 1161–1179. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.766889>

Rodriguez, M.B., Godeas, A., Lavado, R.S., 2008. Soil acidity changes in bulk soil and maize rhizosphere in response to nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 39, 2597–2607. <https://doi.org/10.1080/00103620802358656>

Santos, O.S.H., Avellar, F.C., Alves, M., Trindade, R.C., Menezes, M.B., Ferreira, M.C., França, G.S., Cordeiro, J., Sobreira, F.G., Yoshida, I.M., Moura, P.M., Baptista, M.B., Scotti, M.R., 2019. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. *J. Environ. Qual.* 48, 439–449. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.04.0168>

Sarwar, N., Ishaq, W., Farid, G., Shaheen, M.R., Imran, M., Geng, M., Hussain, S., 2015. Zinc-cadmium interactions: impact on wheat physiology and mineral acquisition. *Ecotox. Environ. Saf.* 122, 528e536.

Segura, F.R., Nunes, E.A., Paniz, F.P., Paulelli, A.C.C., Rodrigues, G.B., Braga, G.Ú.L., dos Reis Pedreira Filho, W., Barbosa, F., Cerchiaro, G., Silva, F.F., Batista, B.L., 2016. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environ. Pollut.* 218, 813–825. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>

Sarruge, J.R., Haag, H.P., 1974. Análises químicas em plantas. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

Sharma, R.K., Agrawal, M., 2005. Biological effects of heavy metals: An overview 26, 301–313.

Silva, D.L., Ferreira, M.C., Scotti, M.R., 2015. O maior desastre ambiental brasileiro: De Mariana (MG) a Regência (ES). *Arq. Mus. Hist. Nat. Jardim Bot.* 157:136–158.

Silva, G.S., Gavassi, M.A., Nogueira, M.A., Habermann, G., 2018. Aluminum prevents stomatal conductance from responding to vapor pressure deficit in *Citrus limonia*. *Environ. Exp. Bot.* 155, 662–671. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.017>

Sinha, S., Gupta, A.K., 2005. Assessment of metals in leguminous green manuring plant of *Sesbania cannabina* L grown on fly ash amended soil: effect on antioxidants. *Chemosphere*, 61, 1204–1214.

Summa, V., Boccia, P., Lettino, A., Margiotta, S., Palma, A., Ragone, P.P., Sinisi, R., Zanellato, M., Sturchio, E., 2020. Mobility of trace metals in serpentinite-derived soils of the Pollino Massif (Southern Italy): insights on bioavailability and toxicity. *Environ. Geochem. Health* 42, 2215–2232. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00497-y>

Ugya, A.Y., Ahmad, A.M., Adamu, H.I., Giwa, S.M., Imam, T.S., 2019. Phytoextraction of heavy metals and risk associated with vegetables grown from soil irrigated with refinery wastewater. *J. Appl. Biol. Biotechnol.* 7, 14–19. <https://doi.org/10.7324/JABB.2019.70203>

Welch, R.M., 1995. Micronutrient Nutrition of Plants. CRC. Crit. Rev. Plant Sci. 14, 49–82. <https://doi.org/10.1080/07352689509701922>

World Health Organization (WHO), 1996. Trace elements in human nutrition and health World Health Organization. World Heal. Organ. 360.

Yadav, A., Yadav, P.K., Shukla, P.D.N., 2013. Investigation of Heavy metal status in soil and vegetables grown in urban area of Allahabad, Uttar Pradesh, India. Int. J. Sci. Res. Publ. 3, 1–7.

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. Environ. Pollut. 249, 1029–1037. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.060>

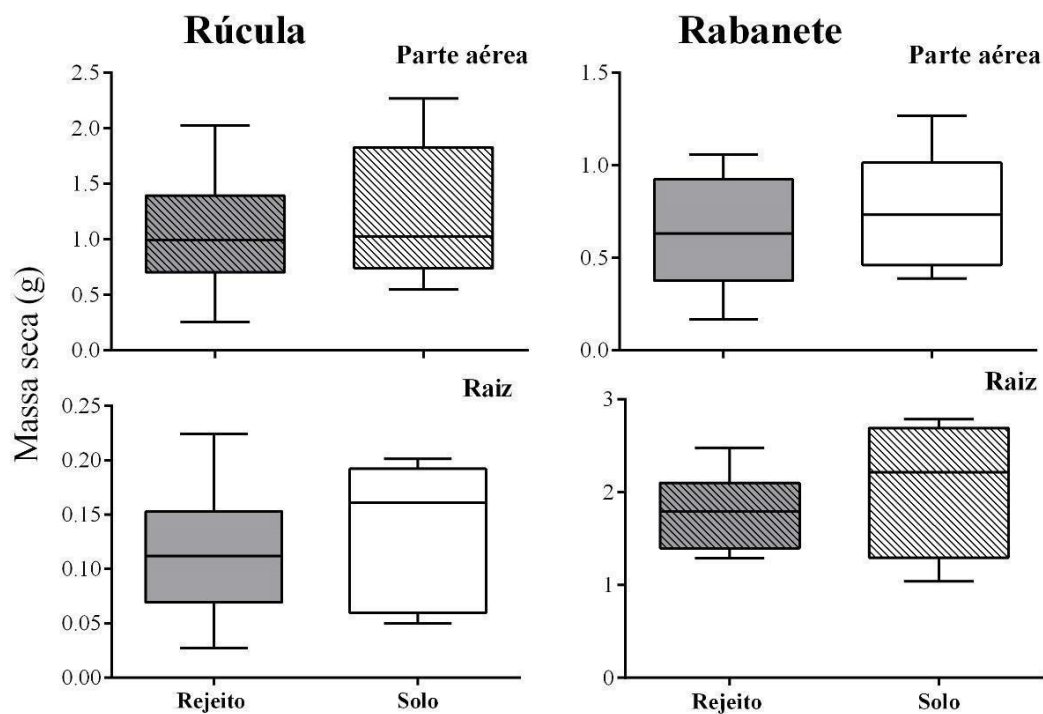


Figura 1. Massa seca (g) de rúcula (parte aérea – A; raiz – C) e rabanete (parte aérea – B; raiz – D), de plantas no período de colheita (40 dias), cultivadas no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão e em solo. Barras tracejadas correspondem às partes consumidas por humanos

Tabela 1. Concentração de pigmentos ($\mu\text{g g}^{-1}$) e parâmetros fotoquímicos de plantas de rúcula e rabanete, após quatro semanas de cultivo no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão e em solo. Chl a - clorofila a; Chl b - clorofila b; Chl total -clorofila total; Car –carotenoides; Chl a/ chl b - razão clorofila a / clorofila b; Chl/car - razão clorofila total / carotenoides; A – Assimilação líquida de CO_2 ; g_s - condutância estomática; E – transpiração. *indica diferença entre os tratamentos ($P < 0,05$).

Parâmetro	Rúcula		Rabanete	
	Rejeito	Solo	Rejeito	Solo
Chl a	311,3 \pm 45,2	307,2 \pm 32,3	331,8 \pm 32,0	295,1 \pm 41,9
Chl b	112,6 \pm 14,8	113,7 \pm 10,1	120,6 \pm 12,0	105,3 \pm 14,5
Chl a total	423,9 \pm 59,7	420,9 \pm 41,9	452,4 \pm 43,9	400,4 \pm 54,81
Car	102,5 \pm 17,2	113,5 \pm 15,3	110,4 \pm 3,21	95,1 \pm 9,36
Fv/Fm	0,74 \pm 0,01	0,74 \pm 0,01	0,75 \pm 0,01	0,77 \pm 0,004
ϕ_{II}	0,22 \pm 0,01	0,17 \pm 0,02	0,29 \pm 0,04	0,320 \pm 0,03
ETR	100,0 \pm 12,5	69,0 \pm 8,6	122,2 \pm 15,1	131,8 \pm 11,9
ETRmax	88,3 \pm 5,4	75,6 \pm 1,96	128,1 \pm 18,6	143,0 \pm 17,6
NPQ	1,23 \pm 0,08	1,28 \pm 0,159	1,196 \pm 0,140	0,995 \pm 0,096
A	8,92 \pm 1,28	5,47 \pm 1,360	15,92 \pm 1,98	14,39 \pm 1,11
g_s	0,145 \pm 0,03	0,064 \pm 0,023	0,183 \pm 0,04	0,116 \pm 0,02
E	3,02 \pm 0,6 *	1,13 \pm 0,25	4,03 \pm 0,45	2,66 \pm 0,34

Tabela 2. Teores de elementos químicos por kg de massa seca, na porção aérea rúcula e nas raízes tuberosas de rabanete, de plantas no período de colheita (40 dias), cultivadas no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão e em solo. Unidades de medida: N, P, K, Ca, Mg, S e Na (dag kg⁻¹); e Cu, Fe, Zn, Mn, B e Al (mg kg⁻¹) *indica diferença entre os tratamentos (P<0,05)

Elementos	Rúcula		Rabanete	
	Rejeito	Solo	Rejeito	Solo
N	1,79 ± 0,08	2,39 ± 0,31	1,71 ± 0,12	1,52 ± 0,07
P	0,55 ± 0,05*	0,35 ± 0,00	0,56 ± 0,02*	0,45 ± 0,02
K	2,06 ± 0,16	2,99 ± 0,25*	3,16 ± 0,27	4,41 ± 0,19*
Ca	2,23 ± 0,18*	1,66 ± 0,10	0,63 ± 0,06	0,53 ± 0,03
Mg	0,27 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,13 ± 0,00	0,16 ± 0,01
S	0,87 ± 0,08	1,04 ± 0,07	0,62 ± 0,03	0,68 ± 0,03
Cu	3,68 ± 0,18*	2,42 ± 0,19	1,90 ± 0,38	1,70 ± 0,25
Fe	1757 ± 351*	801 ± 177	2363 ± 337*	296,4 ± 16,1
Zn	82,9 ± 7,5*	46,4 ± 3,7	56,1 ± 4,2	43,3 ± 4,3
Mn	147,7 ± 8,7*	79,4 ± 5,9	59,7 ± 8,2*	23,3 ± 1,0
Na	0,12 ± 0,00*	0,047 ± 0,006	0,71 ± 0,06*	0,20 ± 0,02
B	55,4 ± 4,7	42,3 ± 4,7	25,9 ± 2,4	23,7 ± 1,4
Al	130 ± 30*	1890 ± 554	182 ± 18*	802 ± 117

Tabela 3. Estimativa de ingestão diária de metais (Fe, Mn, Zn, Cu, B e Al) a partir do consumo de rúcula e rabanete cultivados no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, 2015) e em solo (mg kg pc⁻¹ dia⁻¹).

Elemento	Rúcula		Rabanete	
	Rejeito	Solo	Rejeito	Solo
Fe	0,276	0,14109	0,17964	0,02439
Mn	0,0232	0,01399	0,00454	0,00192
Zn	0,01302	0,00805	0,00426	0,00356
Cu	0,00058	0,00043	0,00014	0,00014
Al	0,02042	0,33291	0,01384	0,066
B	0,0087	0,00745	0,00197	0,00195

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostrou que feijão, milho, crotalária, rúcula e rabanete, podem ser cultivadas no rejeito, sem prejuízos à produtividade. A braquiária, apesar de apresentar menor biomassa quando crescida no rejeito, tem sido plantada na área afetada, pela empresa responsável pela restauração, além disso, conforme verificado neste estudo, acumula baixas concentrações de metais, o que sugere uma maior segurança para seu uso para recomposição das pastagens da região. Esforços devem ser direcionados para compreender os mecanismos fisiológicos da braquiária, no que se refere à menor absorção de Fe e Mn.

Apesar dos altos teores de Fe e Mn acumulados pela maioria das espécies, não foram verificadas alterações substanciais em parâmetros fotoquímicos, o que sugere a presença de outros mecanismos de resposta a tais metais, que refletem na integridade das plantas. A baixa disponibilidade de nutrientes documentada para o rejeito pode ser contornada com uso de fertilizantes, como verificado em outros estudos e confirmado por este. No presente trabalho, o uso do fertilizante amoniacal pode ter favorecido a maior absorção de Fe e Mn, em decorrência de seu efeito redutor no pH do rejeito. Com isso, sugere-se novas pesquisas que visem investigar o uso de diferentes fertilizantes no cultivo agrícola no rejeito, com a finalidade de selecionar aqueles com maior eficiência.

Corroborando estudos anteriores, verificou-se a ausência de sinais visíveis de toxicidade por metais, o que valida a proposição de que os principais entraves ao desenvolvimento vegetal no rejeito referem-se a baixa fertilidade e alta compactação, e não a toxidez por metais. Os maiores fatores de bioacumulação para Mn, Cu e Zn, em plantas de milho e crotalária crescidas no rejeito, sugerem um potencial fitoextrator para essas espécies, as quais podem representar promissoras para extração de metais em regiões afetadas por rejeito de minério de ferro. Entretanto, faz-se necessário estudos mais aprofundados que possam investigar o potencial uso forrageiro desses vegetais provenientes de ambientes com altos teores de metais.

Além de não afetar a capacidade produtiva das culturas, o cultivo no rejeito não ocasionou acúmulo de metais acima dos limites permitidos para o consumo humano, o que viabiliza seu uso para este fim. Dessa forma, o presente estudo apresenta resultados promissores para o cultivo de seis importantes espécies de interesse agrícola no rejeito. De maneira geral, este estudo contribuiu para sanar parte das especulações geradas sobre o cultivo de plantas de interesse agrícola no rejeito. Os resultados apresentados sugerem a possibilidade de retomada da atividade agropastoril na região afetada pelo rejeito de

minério de ferro, proveniente do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG). Entretanto, faz-se necessária a análise do cultivo de espécies agrícolas diretamente na região afetada, para verificar a influência de outros possíveis fatores presentes na área sobre o desenvolvimento, produtividade e acumulação de metais.