

ANÁLISE DE SOLO E FOLIAR DOS SISTEMAS DE
REFLORESTAMENTO DE ÁREAS IMPACTADAS POR REJEITO DE
FERRO

KÍSSILA SOARES ADÃO PEREIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2021

ANÁLISE DE SOLO E FOLIAR DOS SISTEMAS DE
REFLORESTAMENTO DE ÁREAS IMPACTADAS POR REJEITO DE
FERRO

KÍSSILA SOARES ADÃO PEREIRA

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.”

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Coutinho Ramos

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO – 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

P436 Pereira, Kíssila Soares Adão.

Análise de solo e foliar dos sistemas de reflorestamento de áreas impactadas por rejeito de ferro / Kíssila Soares Adão Pereira. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

70 f. : il.

Bibliografia: 50 - 57.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2021.
Orientador: Alessandro Coutinho Ramos.

1. Rejeito de ferro. 2. Bacia do Rio Doce. 3. Sistemas de reflorestamento. 4. Metais pesados. 5. Sistema solo X planta. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630


ANÁLISE DE SOLO E FOLIAR DOS SISTEMAS DE REFLORESTAMENTO
DE ÁREAS IMPACTADAS POR REJEITO DE FERRO

KÍSSILA SOARES ADÃO PEREIRA


“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.”

Aprovada em 19 de fevereiro de 2021

Comissão Examinadora:



Dr.^a Amanda Azevedo Bertolazi (D.Sc., Produção Vegetal) – UVV



Dr. Lucas Zanchetta Passamani (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas)
– FAESA



Prof. Dr. João Carlos de Aquino Almeida (D.Sc., Ciências Biológicas) – UENF



Prof. Dr. Alessandro Coutinho Ramos (D.Sc., Produção Vegetal) – UVV
Orientador

*"Somewhere, something incredible
is waiting to be discovered."*

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Disponho de minha eterna gratidão:

- À Deus, por suas infinitas misericórdias e bênçãos concedidas;

- À minha família, por acreditarem em meu potencial, por me fornecerem apoio, amor e confiabilidade;

- Ao meu orientador, Prof. Dr. Alessandro Coutinho Ramos, por me acolher e amparar em seu grupo de pesquisa, pelo respeito e confiança na execução deste trabalho, pelos ensinamentos transmitidos e concedidos. Agradeço-lhe imensamente por isto;

- Ao meu coorientador, Prof. Dr. João Carlos de Aquino Almeida, por estar presente em minha trajetória acadêmica desde os primeiros seguimentos, sempre aconselhando, direcionando, orientando, ensinando e acreditando que sempre podemos ser mais, além de apresentar exemplaridade ímpar em seu profissionalismo. Foi além de orientador e coorientador, mas também um pai e amigo. Sou e serei imensamente grata por tudo;

- Aos queridos Amanda e Sávio, por disporem, agregarem e compartilharem seus conhecimentos comigo, onde muito me auxiliaram na elaboração deste trabalho;

- Aos meus fiéis aliados que a UENF me proporcionou, meus grandiosos amigos que se tornaram minha segunda família, que sempre estiveram apoiando, auxiliando, amando e prestando sua confiabilidade e fidelidade. Obrigada por iluminarem meus dias sombrios.

- A todos que me prestaram auxílio direta ou indiretamente, e por conseguinte contribuíram para minha formação.

- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento da minha bolsa de estudo. Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal UENF, por propiciar aprendizados valiosos e pelo acolhimento. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro que propiciou a realização de mais um de meus sonhos, Universidade ao qual estou vinculada desde minha graduação e fez nascer a paixão pela pesquisa científica.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Bacia Hidrográfica do Rio Doce.....	4
2.2. O desastre ambiental de Mariana e seus impactos socioambientais	6
2.3. Metais pesados e sua influência no solo e nas plantas	9
3. OBJETIVOS	13
3.1. Objetivo geral	13
3.2. Objetivos específicos	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	15

4.1. Caracterização das áreas experimentais.....	15
4.2. Análises das propriedades físicas do solo.....	15
4.2.1. Composição granulométrica	15
4.3. Análises das propriedades químicas do solo.....	16
4.3.1. Determinação do pH em água	16
4.3.2. Determinação da acidez potencial (H+Al).....	17
4.3.3. Cálculo da soma de bases trocáveis (SB), CTC efetiva (t), CTC (T), índice saturação de bases (V) e índice de saturação de alumínio (m)	17
4.3.5. Valores gerais de referência para interpretação da análise de solos	18
4.4. Análise química foliar.....	19
4.5. Análise estatística de dados	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1. Análise física do solo.....	21
5.2. Análise química do solo.....	24
5.3. Análise Química Foliar	30
5.4. Correlação Solo x Planta	44
6. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

RESUMO

PEREIRA, Kíssila Soares Adão. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Janeiro de 2021. ANÁLISE DE SOLO E FOLIAR DOS SISTEMAS DE REFLORESTAMENTO DE ÁREAS IMPACTADAS POR REJEITO DE FERRO. Orientador: Prof. Alessandro Coutinho Ramos.

Em novembro de 2015, o rompimento intempestivo da estrutura de contenção de rejeitos da barragem de Fundão, em Mariana (MG), culminou em um dos maiores desastres de mineração do país e do mundo. Os estudos sobre a qualidade e dinâmica dos solos e plantas no pós-incidente ainda são poucos e atrasam a criação de medidas eficazes para contornar os danos e promover a recuperação das áreas afetadas. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a qualidade dos atributos físicos e químicos dos solos, referentes às áreas de Regeneração Natural, Revegetação e Recuperação Agrícola; e promover a avaliação da interferência de tais atributos nas usinas localizadas nessas regiões após o rompimento da barragem. Desta forma, as análises químicas e físicas dos diferentes tipos de solos de nove pontos de coleta (P2, P3, P4, P5, P6, P11.1, P18, P19 e P19.1) foram localizadas nas três áreas

descritas acima. Também foi realizado o levantamento da vegetação existente nessas áreas e realizadas análises químicas das plantas para obter a correlação entre os solos e as plantas. Os solos das três áreas analisadas apresentam, na sua maioria, textura franca e franca arenosa, pouco interessantes para a agricultura, baixos valores de nutrientes adequados e elevados níveis de deficiência nutricional. A deficiência nutricional também foi observada para a maioria das plantas analisadas, exceto para os gêneros: *Calopogonium* (P5), *Calopogonium* (P6), *Calopogonium* (P11), *Calopogonium* (P18), *Canavalia* (P18), *Ipomoea* (P19.1), que apresentaram teores de nutrientes significativamente elevados, sugerindo que essas plantas são resistentes ao substrato salino. A análise da correlação solo x planta mostrou alto percentual de déficit de nutrientes, sugerindo que solos pobres interferem diretamente na disponibilidade nutricional dessas plantas. Diante do exposto, é possível concluir que essas áreas apresentam déficits nutricionais severos, comprometendo o crescimento das plantas, com exceção daquelas que são resistentes a essas condições. No entanto, estudos complementares devem ser realizados para fornecer um melhor entendimento dos mecanismos de solos e plantas.

Palavras chaves: Rejeito de ferro, Bacia do Rio Doce, Sistemas de reflorestamento, Metais pesados, Sistema solo X planta.

ABSTRACT

PEREIRA, Kíssila Soares Adão. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Janeiro de 2021. ANALYSIS OF SOIL AND LEAF OF REFORESTATION SYSTEMS IN AREAS IMPACTED BY IRON TAILINGS. Advisor: D.Sc. Alessandro Coutinho Ramos.

In November 2015, the untimely rupture of the tailings containment structure at the Fundão dam, in Mariana (MG), culminated in one of the biggest mining disasters in the country and in the world. Studies on the quality and dynamics of soils and plants in the post-incident are still few and delay the creation of effective measures to circumvent the damage and promote the recovery of the affected areas. In this context, this study aimed to analyze the quality of physical and chemical attributes of soils, referring to the areas of Natural Regeneration, Revegetation and Agricultural Recovery; and promote the evaluation of the interference of such attributes in the plants located in these regions after the dam failure. Thus, the chemical and physical analyzes of the different types of soils from nine collection points (P2, P3, P4, P5, P6, P11.1, P18, P19 and P19.1) were located in the three areas described above. A survey of the existing vegetation in these areas was also carried out and chemical analyzes of the plants were carried

out to obtain the correlation between soils and plants. The soils of the three analyzed areas have, for the most part, a frank and frank sandy texture, not very interesting for agriculture, low values of adequate nutrients and high levels of nutritional deficiency. Nutritional deficiency was also observed for most of the plants analyzed, except for the genera: *Calopogonium* (P5), *Calopogonium* (P6), *Calopogonium* (P11), *Calopogonium* (P18), *Canavalia* (P18), *Ipomoea* (P19.1), which showed significantly high nutrient content, suggesting that these plants are resistant to saline substrate. The analysis of the soil x plant correlation showed a high percentage of nutrient deficit, suggesting that poor soils directly interfere in the nutritional availability of these plants. Given the above, it is possible to conclude that these areas have severe nutritional deficits, compromising plant growth, with the exception of those that are resistant to these conditions. However, further studies should be carried out to provide a better understanding of soil and plant mechanisms.

Keywords: Iron waste, Rio Doce Basin, Reforestation systems, heavy metals, soil vs. plant system.

1. INTRODUÇÃO

Sendo considerado o mais grave desastre socioambiental da história ocasionado por vazamento de minério, e uma das maiores tragédias nacionais nos últimos cinco anos, o rompimento intempestivo da estrutura de contenção de rejeitos na barragem de Fundão, na unidade de Germano, em Mariana (MG) ocorreu em novembro de 2015 (CARMO et al., 2017; IBAMA, 2019). Este desastre liberou uma enxurrada de lama tóxica culminando em um cenário de devastação, devido ao volume de rejeitos lançados e à extensão do dano ocasionado (ESCOBAR, 2015; SAMARCO, 2019).

No decorrer da tragédia, 39 municípios abrangendo os estados de Minas Gerais e Espírito Santo sofreram com o incidente (SAMARCO, 2019). Cerca de 45 milhões de m³ de rejeitos de minério foram carreados para além dos limites dos reservatórios, sendo depositados no ambiente impactando aproximadamente 680 km de corpos de água da bacia hidrográfica do Rio Doce (ANA, 2015; IBAMA, 2019). Laudos, levantamentos, análises e relatórios foram construídos por órgãos públicos e federais (IBAMA, 2015). Estes concluíram que a profundidade e complexibilidade do impacto, apresentaram proporções tão descomedidas que tornaram inconcebível estimar um prazo preciso para reversão do dano (IBAMA, 2015; PMQQS, 2020).

Conforme o Laudo Técnico Preliminar emitido pelo IBAMA em 2015, além de causar a destruição de 1.469 hectares e Áreas de Preservação

Permanente (APP), o rejeito de minério afetou gravemente o ecossistema, impactando diretamente a fauna e flora, culminando em prejuízos socioeconômicos (IBAMA, 2015) e gerando uma enorme preocupação com as perdas ambientais, materiais e culturais (GREENPEACE, 2016).

Após o incidente, a Agência Nacional de Águas (ANA) reportou em relatório prévio a presença dos elementos Hg, As, Pb, Cd, Mn, Sn e Fe nas análises feitas das amostras da água do Rio Doce. Além disso, em um estudo realizado por Quadra et al., (2019), foram encontradas taxas extremamente altas de partículas de Fe, Al e Mn. Também foram demonstrados riscos potenciais de citotoxicidade e danos ao DNA humano através de bioensaios toxicológicos utilizando amostras oriundas da jusante da barragem (QUADRA et al., 2019; além da detecção de níveis críticos de metais pesados com potencial tóxico presentes nas amostras de lama e solo (ANA, 2016; SEGURA et al., 2016).

Embora desempenhem um papel importante para as atividades biológicas dos seres vivos, os metais pesados essenciais devem ter suas concentrações constantemente monitoradas (NAGAJYOTI et al., 2010). Devido ao seu potencial tóxico e por apresentarem fácil acumulação e persistência no meio (REHMAN, 2017), o excesso ou deficiência na disponibilidade desses elementos podem ser uma ameaça iminente, podendo induzir diversas complicações ecológicas, evolutivas, nutricionais e ambientais, portanto suas concentrações devem sempre estar dentro do limite permitido (SHAHID et al., 2017).

Solos que sofreram contaminação por metais pesados apresentam desequilíbrio microbiológico, alteração em suas propriedades químicas e até mesmo físicas, tendo sua fertilidade completamente comprometida (NAVEEDULLAH et al., 2013). Os fatores que regem a retenção e disponibilidade de metais pesados no solo são: acidez ativa (pH), concentração do metal, CTC e teor de matéria orgânica. Porém, os processos de adsorção, precipitação, complexação e oxirredução, estão intrinsicamente envolvidos na estabilização destes metais (ALLOWAY, 1995).

Deste modo, a compreensão dos fatores supracitados é de suma importância, uma vez que estes oportunizam a mobilização de metais pesados na solução do solo, facilitando a absorção destes elementos para as plantas, águas subterrâneas e superficiais, culminando na dispersão de metais no meio

ambiente (SHERENE, 2010). As plantas, por sua vez, possuem duas vias usuais de absorção de metais, sendo elas ativas e passivas; na absorção passiva (ou não metabólica) há a difusão dos íons do solo para as raízes, já na absorção ativa (metabólica) leva-se em consideração o gradiente de concentração do metal (KABATA-PENDIAS, 2004).

As plantas são capazes de acumular metais e utilizá-los em suas reações metabólicas e bioquímicas, no entanto, solos que sofreram altas deposições de metais pesados viabilizam a absorção destes poluentes pelas plantas através de seu sistema radicular, tornando-os tóxicos para os vegetais (ALI et al., 2019). Embora as raízes possuam mecanismos eficientes para a absorção de metais, a parte aérea também é capaz de absorver metais dispersos no ambiente através da deposição de partículas atmosféricas nas superfícies das folhas (BONDADA et al., 2004).

Levando em consideração as informações supracitadas e suas problemáticas, ainda há necessidade de pesquisas nos diversos âmbitos referentes ao pós incidente, a fim de elucidar mais detalhadamente os possíveis impactos deste acidente na comunidade vegetal ali existente e fornecer medidas mitigadoras, objetivando o desenvolvimento de novas estratégias capazes de contornar os prejuízos ambientais causados pelo desastre.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivos analisar as características físicas e químicas dos solos afetados sob diferentes tipos de recuperação; analisar os teores de macro e micronutrientes na parte aérea de diferentes espécies coletadas nas áreas de recuperação e verificar se existe uma correlação entre as características de solo e as plantas existentes nos locais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Bacia Hidrográfica do Rio Doce

A Bacia hidrográfica do Rio Doce (Figura 1) é a principal bacia hidrográfica da Região Sudeste do Brasil, e dispõe de uma área de drenagem de 86.715 km², em que 86% de sua área total é pertencente ao Estado de Minas Gerais abarcando o Leste Mineiro, e 14% da área está situada ao Noroeste do Espírito Santo (CBH-DOCE, 2020). Com uma extensão de 879 km, o Rio Doce abrange 229 cidades, sendo que suas nascentes estão alocadas nas serras mineiras (da Mantiqueira e do Espinhaço) e suas águas percorrem áreas capixabas para desaguarem no Oceano Atlântico, no município de Linhares (ANA, 2019; CBH-DOCE, 2020).

A bacia em questão possui uma grande importância no histórico de atividades econômicas direcionadas à extração mineral, abrigando o maior complexo siderúrgico da América Latina, bem como a maior mineradora a céu aberto do mundo, a companhia Vale do Rio Doce (ANA, 2019). Diante de tal fato, estas atividades contam com um número expressivo de barragens, que se destinam a deposição de rejeitos de minério e à geração de energia hidrelétrica (PORTO, 2016; ANA, 2019; SAMARCO, 2019).

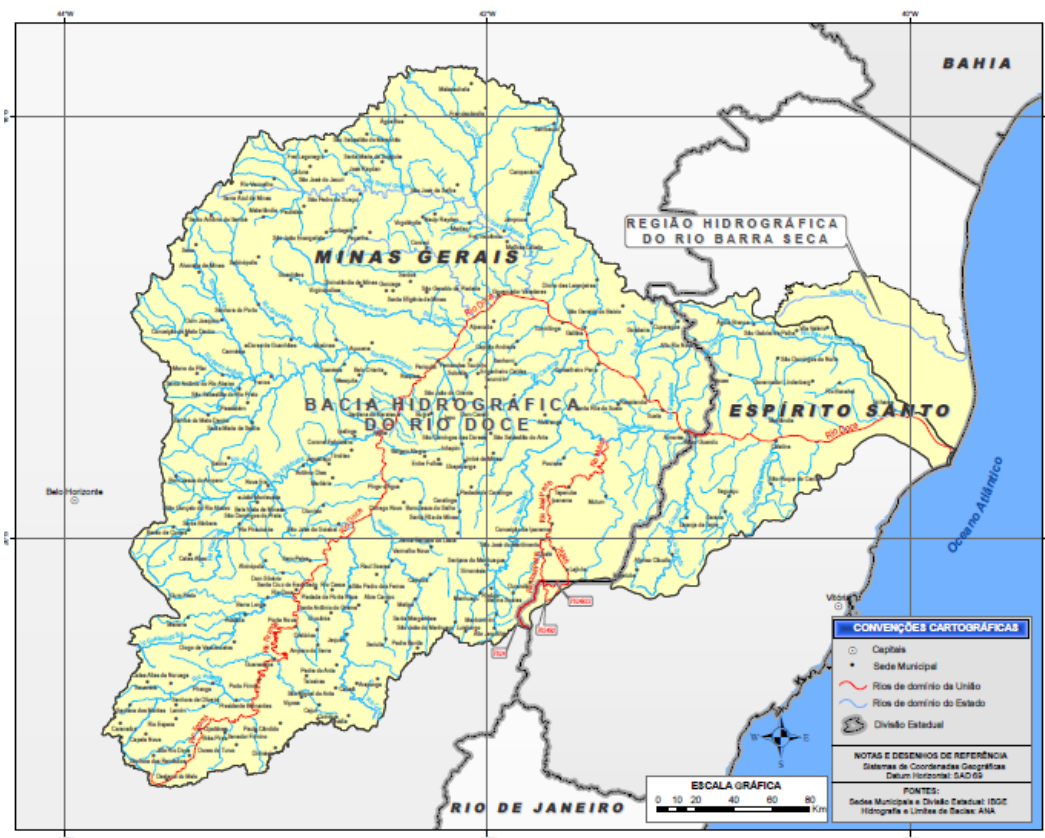


Figura 1. Domínio de cursos d'água da Bacia hidrográfica do Rio Doce (ANA, 2013).

A estimativa da população situada na Bacia do Rio Doce gera em torno de 3,5 milhões de habitantes, sendo distribuídos em 200 municípios no Estado de Minas Gerais e 29 no Espírito Santo, totalizando 229 cidades. Aproximadamente 73% da população total da bacia está alocada na área urbana, e os demais em área rural (PIRH, 2010). Contudo, nos dados fornecidos pelo Plano Integrado de Recursos Hídricos, foi relatado que mais de 100 municípios apresentam um número significativo de população rural, indicando que o maior gerador de renda para pessoas alocadas nestas cidades, provêm das atividades agropecuárias (PIRH, 2010; CHB-DOCE, 2020).

A área em questão possui complexos industriais voltados para a mineração e siderurgia (CHB-DOCE, 2020). Além disso, desempenha também outras atividades econômicas em ramos diversificados, que influenciam diretamente na economia regional, como por exemplo a agricultura que conta com culturas de café, cana de açúcar, lavouras tradicionais, criação de gado de corte e leiteiro, suinocultura, produtos alimentares e celulose, representando,

assim, grande parte das exportações e gerando um impacto significativo na economia nacional (CHB-DOCE, 2020; PMQQS, 2020).

A Bacia do Rio Doce possui uma rica biodiversidade, pois 98% de sua área está inserida no bioma de Mata Atlântica, o qual é considerado um dos mais meritórios, mas é também o que requer maior atenção pois está entre os mais ameaçados do mundo (IBAMA, 2015; GREENPEACE, 2016). Da porcentagem total descrita, os outros 2% compreendem o bioma Cerrado. Ainda que haja desigualdade entre as diferentes regiões da bacia, esta ainda pode ser considerada privilegiada no que se refere à disponibilidade de recursos hídricos, sendo o Rio Doce um dos principais rios que fornecem água e nutrição para a Mata Atlântica em extinção (IBIO AGB DOCE, 2014; IBAMA, 2015).

2.2. O desastre ambiental de Mariana e seus impactos socioambientais

Em 15 de novembro de 2015, ocorreu um dos maiores desastres no âmbito da mineração da história mundial e uma das maiores catástrofes ambientais ocorridas no país com o rompimento da barragem de contenção de rejeitos localizada em Mariana (MG) (IBAMA, 2019; SAMARCO, 2019). Tal ocorrido culminou na destruição do subdistrito de Bento Rodrigues situado no município de Mariana-MG, tendo por resultado devastação e contaminação de solos, água, fauna, floras, ecossistemas e prejuízos socioeconômicos (BRASIL, 2015; IBAMA, 2019).

Embora este incidente não tenha sido considerado o pior com relação à fatalidade, este foi registrado como o maior da história do país e do mundo (FEAM, 2016). O que classifica este incidente como o maior foi a quantidade do volume de rejeitos emitidos no ambiente, onde aproximadamente 680 km de corpos d'água da bacia hidrográfica do Rio Doce foram impactados (Figura 2), e posteriormente estes rejeitos desaguaram no oceano atlântico adentrando cerca de 60 quilômetros (FEAM, 2016; SEGURA et al., 2016).



Figura 2. Caminhos percorridos pelo rejeito de minério ao longo da Bacia do Rio Doce (SAMARCO, 2020).

O rompimento da barragem de rejeitos de minério ocasionou a deterioração de aproximadamente 1.587 hectares de cobertura vegetal, sendo 511,08 desses hectares afetados de Mata Atlântica, além de áreas de preservação permanente e matas ciliares (SEDRU, 2016; CARMO et al., 2017). As perdas não ocorreram somente no âmbito ambiental e social, mas também cultural, uma vez que diversas áreas pertencentes ao patrimônio cultural também foram lesadas (Figura 3) (SEDRU, 2016; CARMO et al., 2017; ESPINDOLA et al., 2017).

Conforme o Laudo Técnico Preliminar emitido pelo IBAMA em 2015, a contaminação provocada pela emissão de rejeitos no ambiente pode afetar o solo em longo espaço de tempo (IBAMA, 2015). Devido à natureza inerte e ausente de matéria orgânica, o rejeito em questão tem grande potencial para promover a desestruturação e alteração do pH do solo e conseqüentemente, inviabilizar a recuperação e desenvolvimento de espécies nativas, bem como a modificação da vegetação local e progressão de ecossistemas diferentes dos originais, uma vez que a sedimentação da lama com rejeitos sobre o ambiente prejudica sua regeneração natural (IBAMA, 2015; GREENPEACE, 2016).

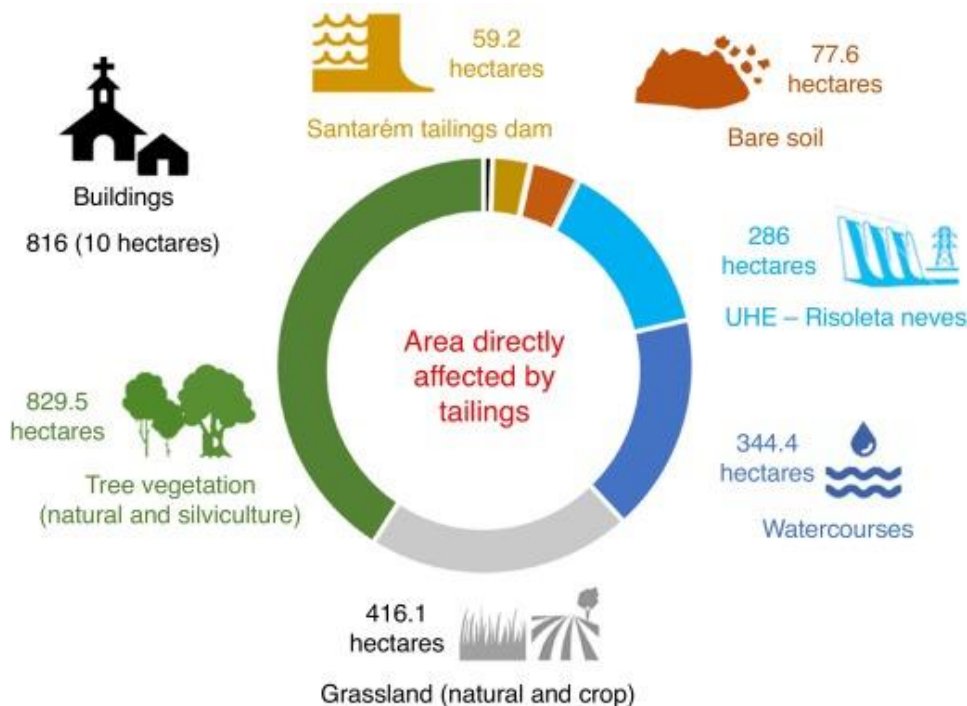


Figura 3. Impactos ambientais e culturais ocasionados pelo rompimento da barragem (Carmo et al., 2017).

De acordo com a resolução Nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, manter o controle da qualidade da água é de caráter imprescindível, pois esta é essencial para o equilíbrio ecológico aquático da região, assim como sua destinação para o uso da irrigação e dessedentação animal é essencial para a proteção da saúde e bem estar humano e animal (CONAMA, 2005). Os solos das várzeas dos rios dos municípios afetados são do tipo arenoso e, devido a sua natureza permeável, são mais suscetíveis à contaminação por metais pesados associados à lama, tornando este rejeito um fator preocupante e alarmante (GREENPEACE, 2016).

Diante da problemática em questão, salienta-se o prejuízo sofrido pela agricultura de pequena propriedade familiar, pois os produtores do entorno da bacia tiveram suas atividades agrícolas prejudicadas devido à má qualidade da água do rio e do solo. Além disso, o incidente provocou diversos impactos negativos na saúde pública, culminando em problemas como: parasitoses, diarreias, gastroenterites, dermatites, infecções das vias aéreas superiores devido ao contato com a poeira da lama, ansiedade, hipertensão arterial sistêmica, diabetes e reemergência de doenças controladas como a dengue (FREITAS et al., 2019).

2.3. Metais pesados e sua influência no solo e nas plantas

Os metais pesados consistem em elementos de alto peso atômico, condutividade elétrica elevada, maleabilidade, brilho e perdem seus elétrons voluntariamente para formar cátions (BÁNFALVI, 2011). Além das características supracitadas, para ser classificado como um metal pesado, este deve obter uma densidade cinco vezes superior à da água, porém alguns estudos já consideram alguns metais com densidade menor que 5 g cm^{-3} (WALKER et al., 2012; ALI e KHAN, 2018).

Existem diversas fontes que disponibilizam estes metais no meio, podendo ser de ocorrência natural e geogênica através do intemperismo da crosta terrestre e erupções vulcânicas, ou por meio de ações antropogênicas que incluem: emissões industriais, atividades mineradoras, fundição, atividades agrícolas como aplicação de pesticidas e fertilizantes fosfatados (ALI et al., 2019; JAISHANKAR et al., 2014). Além da combustão de combustíveis fósseis que ocasiona a liberação de cádmio no ambiente, do processo de erosão e da liberação de efluentes industriais e urbano (SPIEGEL, 2002; JAISHANKAR et al., 2014).

Os metais pesados causam efeitos negativos à saúde humana quando expostos por um longo período de tempo ou em concentrações que ultrapassam os valores recomendados, além de serem poluentes ambientais que provocam problemas de alta significância para a ecologia, evolução, nutrição e meio ambiente (JAISHANKAR et al., 2014). Uma das propriedades que os metais pesados possuem, é a sua capacidade de biomagnificar (ALI et al., 2019). Este efeito consiste na habilidade que o metal tem de persistir no meio ambiente, se acumular em organismos vivos e ser transferido de um nível trófico para o outro dentro da cadeia alimentar (ALI et al., 2019). A dimensão de seu acúmulo na biota irá depender de sua taxa acumulativa no corpo, pois cada metal possui uma meia vida diferente em espécies distintas (MASINDI e MUEDI, 2018; ALI et al., 2019).

Ainda que possam desempenhar alta toxicidade em níveis acima do permitido, os metais pesados também possuem aplicações relevantes para a humanidade quando dominadas pela indústria e pesquisa em vários âmbitos. Por exemplo, um recente estudo publicado por Maciel et al. (2020), evidenciou

que complexos de cobre (II) apresentaram potencial antiproliferativo, diminuindo a viabilidade de células de câncer de pulmão humano através do mecanismo de apoptose (MACIEL et al., 2020).

Alguns metais e metaloides existentes desempenham um papel crucial para a vida como um todo. No âmbito biológico, estes elementos modulam funções fisiológicas indispensáveis no corpo, pois integram biomoléculas como enzimas, que catalisam reações bioquímicas no metabolismo (ALI e KHAN, 2018).

No que diz respeito às suas funções em sistemas biológicos, é necessário salientar que os metais são classificados em essenciais e não essenciais (ALI et al., 2019). Essa classificação varia para os diferentes grupos de organismos, tais como microrganismos, plantas e animais; em que o que pode ser essencial para um grupo específico de organismos, não necessariamente será para o outro, e as interações entre metais pesados com os variados grupos são complexas (CHALKIADAKI et al., 2014).

Os metais pesados classificados como essenciais, possuem atividade iminente no metabolismo dentro das concentrações baixas e básicas já reconhecidas (ALI et al., 2019). Exemplificando esta classe, encontram-se os seguintes elementos: Mn, Fe, Cu, Mo e Zn (ABDU et al., 2016) e embora classificados como essenciais, seu excesso ou déficit pode culminar na ocorrência de doenças ou anomalias. Em contrapartida, os metais não essenciais não auxiliam e não desempenham papel biológico no metabolismo dos organismos, sendo eles: Cd, Pb, Hg (RAMIREZ, 2013).

Diante das particularidades que os metais pesados apresentam, a sua dinâmica no organismo quando em níveis críticos, resulta em perturbação das funções metabólicas do corpo (ABDU, 2017). Uma vez em contato com o organismo, os metais desempenham a capacidade de reagir com alguns compostos essenciais para o corpo substituindo-os (ALI et al., 2019). Por exemplo, o cálcio pode ser substituído por chumbo, zinco substituído por cádmio e maior parte dos oligoelementos são substituídos por alumínio, desequilibrando processos metabólicos, atividades hormonais e enzimáticas (MUKKE e CHINTE, 2012).

Estudos anteriores constataram que vias carcinogênicas podem ser induzidas através da exposição a metais pesados, onde a carcinogenicidade e

mutagenicidade de metais pesados estão associados à indução de estresse oxidativo, em que reações redox dos sistemas biológicos são realizadas por íons metálicos com potencial carcinogênico, como por exemplo: cromo, níquel, vanádio, cobalto e arsênico (GENESTRA, 2007; REHMAN et al., 2017). Desta maneira, os radicais livres produzidos induzem danos oxidativos às proteínas e ao DNA, podendo também interferir negativamente na sua transcrição e reparo (GENESTRA, 2007; RUSYNIAK et al., 2010).

Outras consequências da exposição aos metais pesados também ocorrem, como: influência nas funções enzimáticas, aumento da suscetibilidade às infecções, alterações negativas no metabolismo de lipídios, proteínas, hormônios, funções renais e síntese de neurotransmissores, comprometendo as funções do Sistema Nervoso Central (SNC) (REHMAN et al., 2017). Portanto, a acumulação destes elementos deturpa as funções metabólicas de forma grave (HYDER et al., 2013).

Segura et al. (2016), forneceram dados preliminares do perfil químico e citotoxicidade dos resíduos provenientes do derramamento de rejeitos de minério, onde foram identificados potencial citotóxico e danoso ao DNA na lama e solo e a alta fração mobilizável de Al, As, Ba, Fe, Mn, Pb e Sr nas amostras de lama, além de níveis críticos de Ag em águas superficiais. O que demanda atenção quanto à presença de tais elementos (SEGURA, 2016).

Em plantas, os metais pesados como Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn e Mo são micronutrientes ou oligoelementos essenciais para o seu metabolismo, fornecendo subsídios imprescindíveis para seu crescimento, resistência ao estresse e biossíntese, além de modular a ação de diferentes biomoléculas como carboidratos, clorofila, ácidos nucleicos e metabólitos secundários (REHMAN et al., 2017; SHAHID et al., 2017). É importante destacar que a deficiência ou excesso de um metal pesado essencial nos vegetais pode causar doenças ou condições anormais de crescimento e desenvolvimento (APPENROTH, 2010).

Alguns tipos de metais também podem ocasionar um desbalanço nutricional nas plantas, pois causam efeitos antagônicos e competitivos com outros metais que compõem a cadeia nutricional vegetal ou micronutrientes catiônicos, impossibilitando a absorção de nutrientes essenciais para as plantas ou causando uma redução da maior parte de nutrientes disponíveis (MARSCHNER, 2011). Exemplificando tal fato, cita-se o Fe, que sob

concentrações ideais possui características benéficas, porém, em excesso, causa bronzeamento foliar e escurecimento radicular (KROHLING et al., 2016).

Em solos, a ocorrência de metais pesados denota muita atenção e provavelmente consistirá em um problema grave quando suas concentrações estiverem em um nível alarmante e acima do permitido (LEPP, 2012; MUSILOVA et al., 2016). A maioria dos metais pesados não sofrem degradação microbiana ou química, devido à sua incapacidade de serem degradáveis e, conseqüentemente, suas concentrações no ambiente perduram por muito tempo (ALLOWAY, 2012).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Analisar os atributos físicos e químicos dos solos coletados em diferentes pontos afetados pelo rompimento da barragem da Samarco em Mariana/MG e sua influência nos teores de macro e micronutrientes das espécies vegetais ali situadas, a fim de sugerir medidas mitigadoras para os solos da região e identificar espécies que possam ser utilizadas para a recuperação de áreas afetadas pelo desastre.

3.2. Objetivos específicos

- Avaliar e classificar os nove diferentes tipos de solos das áreas afetadas quanto aos seus atributos físicos, levando em consideração a sua granulometria e textura;
- Analisar as características químicas como teores de macro e micronutrientes, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e pH dos diferentes tipos de solos provenientes de áreas atingidas pelo rejeito;

- Determinar os teores de macro e micronutrientes das plantas presentes nos diferentes pontos afetados pelo rompimento da barragem da Samarco em Mariana/MG;
- Indicar as espécies vegetais que reflitam as características físico-químicas do solo, para que possam ser adotadas como indicadores ambientais.
- Verificar a dinâmica da correlação solo X planta, como a qualidade do solo interfere na presença de nutrientes nas plantas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização das áreas experimentais

O presente estudo foi realizado às margens do Rio Doce, entre os municípios de Mariana e Santa Cruz do Escalvado, no Estado de Minas Gerais, Brasil. As coletas foram realizadas em nove diferentes pontos amostrais que correspondem às áreas de: Regeneração Natural (P2, P4 e P19), Revegetação (P3, P5, P6, P11.1, P18) e Recuperação Agrícola (P19.1). As áreas em questão, compreendem as regiões que foram acometidas aos três tipos de reestruturação após o incidente ocorrido em 2015.

4.2. Análises das propriedades físicas do solo

As amostras para as análises físicas foram coletadas com o auxílio de uma sonda na camada de 0 a 20 cm dos solos e compreenderam a determinação da granulometria e classificação textural nos nove diferentes pontos amostrais.

4.2.1. Composição granulométrica

Para realizar a composição granulométrica, 20 g de terra de cada amostra foram dispersas com NaOH 1 N e em seguida foram submetidas à agitação mecânica com agitador do tipo “*Stirrer*” de rotação alta por cinco

minutos para as amostras de textura média (P2, P4, P5, P11.1, P18, P19 e P19.1) e 15 minutos para as demais amostras (P3 e P6). Após o período da agitação, a areia foi separada por tamisamento da suspensão em uma peneira de 0,053 mm de diâmetro. A suspensão contendo argila e silte foi coletada em proveta de 1 L, sendo submetida ao processo de sedimentação para determinação da fração argila pelo método da pipeta. O silte foi determinado pela diferença das outras frações em relação à amostra original, conforme Donagemma (2016).

Após a secagem da areia separada por tamisamento, as amostras que apresentaram textura média, foram passadas através de um conjunto de peneiras colocadas em um agitador mecânico durante cinco minutos a fim de obter as seguintes frações: areia muito grossa (1-2 mm), areia grossa (0,5-1,0 mm), areia média (0,25-0,5 mm), areia fina (0,1-0,25 mm) e areia muito fina (0,05-0,1 mm).

4.3. Análises das propriedades químicas do solo

Os atributos químicos pH em água, acidez trocável (H+Al), matéria orgânica, CTC efetiva e a pH 7,0, saturação de Ca, Mg e K na CTC, índice saturação de Na, soma de bases, saturação de bases e macro e micronutrientes (P, K, S, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Cu, Mn e B) foram determinados segundo Embrapa (1997), brevemente descritos a seguir.

4.3.1. Determinação do pH em água

Para determinação do pH foram adicionados 10 mL de solo em 25 mL de água destilada em um béquer de 100 mL de volume. Após agitação por 10 minutos com bastão de vidro e repouso por uma hora, foi realizada a leitura do pH utilizando um eletrodo de vidro combinado para pHmetro. O eletrodo de vidro combinado para pHmetro foi calibrado antes das mensurações, com as soluções-tampão para pH 4,0 e 7,0, sendo novamente calibrado a cada 15 leituras, e lavado com água destilada.

4.3.2. Determinação da acidez potencial (H+Al)

Para determinação da acidez potencial (H+Al) foram adicionados 5 g de solo secado ao ar e 75 mL da solução de $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em um erlenmeyer de 125 mL. Após agitação por 15 minutos e repouso de 16 horas, retirou-se uma alíquota de 25 mL do sobrenadante para determinar o teor de H+Al por titulação com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, utilizando fenolftaleína a 3 % como solução indicadora.

4.3.3. Cálculo da soma de bases trocáveis (SB), CTC efetiva (t), CTC (T), índice saturação de bases (V) e índice de saturação de alumínio (m)

Sendo $\text{SB (cmolc/kg)} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+)$, onde o sódio (Na^+) é determinado de forma semelhante ao K^+ , porém utilizando o filtro próprio para Na^+ no fotômetro de chama.

Utilizou-se $t \text{ (cmolc /kg)} = (\text{SB} + \text{Al}^{3+})$, onde SB é a soma de bases trocáveis e Al^{3+} é o teor de alumínio trocável, para obter a CTC efetiva. Determinou-se a CTC a partir de $T \text{ (cmolc/kg)} = \text{SB} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{3+})$, onde somou-se a acidez potencial com a soma de bases.

A porcentagem de saturação de bases foi calculada utilizando a seguinte equação: $V\% = 100 \times \text{SB}/T$, e a porcentagem de saturação com alumínio foi obtida pela seguinte expressão: $100 \times \text{Al}^{3+} / (\text{SB} + \text{Al}^{3+})$.

4.3.4. Análise de macro e micronutrientes

Os seguintes nutrientes P, K, Ca, Mg, S, Na, B, Fe, Zn, Mn e Cu foram quantificados por ICP-OES, após digestão com HNO_3 concentrado e H_2O_2 em sistema de digestão aberta. Condições do ICP: gás plasma $8,0 \text{ L min}^{-1}$, gás a auxiliar $0,70 \text{ L min}^{-1}$ e gás carreador $0,55 \text{ L min}^{-1}$ (Peters, 2005).

4.3.5. Valores gerais de referência para interpretação da análise de solos

Para classificar e determinar a qualidade dos solos analisados com base nos parâmetros químicos foram utilizados os valores de referência presentes estipulados nos Manuais de Recomendação de Adubação dos Estados do Espírito Santo (2001 e 2007), Minas Gerais (1999) e São Paulo (1996) (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de referência para classificação de parâmetros químicos do solo presentes nos Manuais de Recomendação de Adubação dos Estados do Espírito Santo (2001 e 2007), Minas Gerais (1999) e São Paulo (1996).

Parâmetro	Unidade	Classificação					
		Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	
Fósforo Mehlich							
- Cultura Perene	- Solo argiloso	mg/dm ³	-	<5	5-10	>10	-
	- Solo Textura média	mg/dm ³	-	<10	10-20	>20	-
	- Solo Arenoso	mg/dm ³	-	<20	20-30	>30	-
- Cultura Anual	- Solo argiloso	mg/dm ³	-	<20	20-40	>40	-
	- Solo Textura média	mg/dm ³	-	<40	40-60	>60	-
	- Solo Arenoso	mg/dm ³	-	<60	60-80	>80	-
- Hortaliça	- Solo argiloso	mg/dm ³	-	<30	30-60	>60	-
	- Solo Textura média	mg/dm ³	-	<60	60-100	>100	-
	- Solo Arenoso	mg/dm ³		<100	100-150	>150	-
Enxofre		mg/dm ³	-	<5	50-10	>10	-
Potássio	- Cultura perene/anual	mg/dm ³	-	<60	60-150	>150	-
	- Hortaliça	mg/dm ³	-	<80	80-200	>200	-
Cálcio		cmol/dm ³	-	<1,5	1,5-4,0	>4,0	-
Magnésio		cmol/dm ³	-	<0,6	0,6-1,0	>1,0	-
Alumínio		cmol/dm ³	-	<0,4	0,4-1,0	>1,0	-
Acidez Potencial (H+Al)		cmol/dm ³	-	<2,6	2,6-5,0	>5,0	-
Matéria Orgânica		dag/dm ³	-	<1,6	1,6-3,0	>3,0	-
Ferro		mg/dm ³	<20	21-31	31-200	>200	-
Zinco		mg/dm ³	<4,1	4,1-6,9	7,0-40,0	>40,0	-
Cobre		mg/dm ³	<0,6	0,6-1,5	1,6-20,0	>20,0	-
Manganês		mg/dm ³	<6,0	6-11	12-130	>130	-
Boro		mg/dm ³	≤0,15	0,16-0,35	0,36-0,6	0,61-0,90	>0,90
Sódio	- Solo argiloso	mg/dm ³	-	<60	60-100	>100	-
	- Solo Textura média	mg/dm ³	-	<40	40-80	>80	-
	- Solo Arenoso	mg/dm ³	-	<20	20-50	>50	-
Relação Ca/Mg		-	-	-	4:1	-	-
Relação Ca/K		-	-	-	15:1	-	-

Relação Mg/K		-	-	-	5:1	-	-	
Sat. Ca na CTC		%	<40	40-60	60-65	>65	-	
Sat. Mg na CTC		%	<7	7-10	10-15	>15	-	
Sat. K na CTC		%	<3	3-5	5	>5	-	
Índice Sat. Na		%	-	<20,0	-	-	-	
Soma de Bases		cmol _c /dm ³	-	<2,1	2,1-5,0	>5,0	-	
CTC Efetiva		cmol _c /dm ³	-	<2,6	2,6-6,0	>6,0	-	
CTC a pH 7,0		cmol _c /dm ³	-	<4,6	4,6-10,0	>10,0	-	
Saturação de Bases		%	<26	26-50	51-70	71-90	>90	
pH em H ₂ O		-	Acidez			Neutro	Alcalinidade	
			Elevada	Média	Fraca		Fraca	Elevada
			≤5,0	5,1-6,0	6,1-6,9	7,0	7,1-7,8	>7,8

4.4. Análise química foliar

Para a determinação dos teores de N, o material vegetal foi submetido à digestão sulfúrica, no qual o nitrogênio foi determinado pelo método de Nessler (Jackson, 1965). Os demais nutrientes P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu, Mn e B foram quantificados por ICP-OES, após digestão com HNO₃ concentrado e H₂O₂ em sistema de digestão aberta. Condições do ICP: gás plasma 8,0 L min⁻¹, gás a auxiliar 0,70 L min⁻¹ e gás carreador 0,55 L min⁻¹ (Peters, 2005).

4.5. Análise estatística de dados

Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, sendo que cada ponto dentro de sua respectiva área (regeneração natural - P2, P4 e P19, revegetação - P3, P5, P6, P11.1, P18 e recuperação agrícola - P19.1) foi considerado um tratamento, composto por cinco repetições cada. O pH, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu, Mn, B, H+Al, Al, SB, CTC (t), CTC (T), V (%), m (%) foram analisados estatisticamente através de *two-way* ANOVA. Quando um fator ou qualquer interação entre os fatores foram considerados estatisticamente significantes, foram realizadas comparações agrupadas através

de um teste t de média, corrigindo os resultados correspondentes por comparações múltiplas, utilizando o teste de Tukey a $p \leq 0.05$. Todas as análises foram conduzidas utilizando-se o programa *GraphPad Prism 7.0*, utilizando um nível de 5% de significância para os testes das hipóteses.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise física do solo

As análises físicas compreenderam a determinação da granulometria e classificação textural em nove diferentes pontos amostrais com regeneração natural (P2, P4 e P19), revegetação (P3, P5, P6, P11.1, P18) e recuperação agrícola (P19.1) (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização física das amostras de solos em estudo.

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	GRANULOMETRIA					CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL
	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila	
	-----g/kg-----					
Ponto 2	104	436	540	400	60	Franco Arenoso
Ponto 3	82	354	436	424	140	Franco
Ponto 4	52	380	432	488	80	Franco Arenoso
Ponto 5	100	340	440	480	80	Franco Arenoso
Ponto 6	50	354	404	496	100	Franco
Ponto 11.1	56	408	464	476	60	Franco Arenoso
Ponto 18	66	424	490	430	80	Franco Arenoso
Ponto 19	84	358	442	478	80	Franco Arenoso
Ponto 19.1	48	532	580	340	80	Franco Arenoso

De acordo com o Manual Técnico de Pedologia emitido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (2015), para identificar e classificar a

granulometria dos solos é necessário analisar os conteúdos de areia, silte e argila presentes nas amostras, tanto através de análises feitas diretamente no campo ou no laboratório. A classificação textural viabiliza a compreensão do comportamento das partículas nas propriedades físicas do solo, e dentro desse contexto existem treze tipos de classificações: areia, silte, argila, areia franca, franca, franco-argiloarenosa, francoargilosa, francoarenosa, argiloarenosa, muito argilosa, argilossiltosa, franco-argilossiltosa e francossiltosa (BRADY e WEIL, 2013; IBGE, 2015).

Com base nos resultados da análise granulométrica (Tabela 2) observou-se uma baixa amplitude textural entre as amostras dos solos coletados, os quais foram enquadrados e classificados como Franco-Arenoso (textura-média) nos pontos P2, P4, P5, P11.1, P18, P19 e P19.1, e Franco nos pontos P3 e P6. A textura que os solos apresentam em sua composição, possui alta influência em sua dinâmica de adesão e coesão entre as partículas, na dinâmica da água, do solo, em seu manejo e na sua resistência à tração, além de exercer interferência direta nos processos ecológicos do solo (HE et al., 2014). Deste modo, considera-se que a textura dos solos atua veementemente como indicadores da qualidade e produtividade dos mesmos (WANG et al., 2005).

Foi possível observar uma variação de areia total correspondente aos valores que alternaram de 404 a 580 g kg⁻¹ (Tabela 2). Todos os pontos analisados apresentaram quantidades significativamente maiores de área fina com relação à areia grossa, as quais variaram de 340 a 532 g kg⁻¹ e 50 a 104 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 2). Os maiores níveis de areia grossa foram encontrados em solos coletados nos pontos P2 e P5, em contrapartida, os que obtiveram menores níveis foram encontrados em amostras de solos dos pontos P6, P4 e P11.1 (Tabela 2).

Com relação aos teores de argila, os resultados da análise demonstraram valores correspondentes a uma amplitude de 60 a 140 g kg⁻¹, sendo que os solos que apresentaram os maiores teores de argila foram os provenientes das amostras coletadas nos pontos com revegetação P3 e P6, o que auxiliou na sua caracterização textural como solos francos (Tabela 2). Em relação aos teores de silte, nota-se uma baixa variação entre os solos, apresentando valores referentes a uma amplitude entre 340 a 496 g kg⁻¹ (Tabela

2). Dentre as amostras coletadas, os solos que apresentaram valores maiores nos teores de silte foram coletados nos pontos P4 e P6 (Tabela 2).

As amostras de solos coletadas nos pontos correspondentes às áreas de regeneração natural (P2, P4, P19), recuperação agrícola (P19.1) e parte da área de revegetação (P5, P11.1, P18) apresentaram teores de areia maiores quando comparadas às demais (Tabela 2), possuindo partículas mais grosseiras com superfície específica baixa. Em um estudo realizado por Borba et al. (2004), foi constatado que a prevalência de partículas maiores na Bacia do Rio Doce é decorrente de atividades de mineração realizadas em áreas de solos potencialmente erodíveis. Além disso, Reis et al. (2020) realizaram uma análise granulométrica dos sedimentos do rio, onde foi constatada a predominância de frações de areia muito grossa e areia fina nas estações de amostragem à montante do desastre ambiental.

Os solos arenosos tendem a apresentar maior perda da capacidade produtiva e degradação, quando comparados aos solos argilosos sob condições análogas (DONAGEMMA et al., 2016). Este tipo de solo geralmente manifesta maiores déficits de elementos e componentes essenciais, como fósforo e matéria orgânica, devido ao seu alto teor de areia, que gera em cerca de 70%, tornando-os altamente permeáveis, com baixa capacidade de retenção hídrica e de adsorção iônica. Assim, para trabalhar com solos arenosos, deve-se investir em técnicas que auxiliem na reposição de matéria orgânica do solo, e também em técnicas que os tornem menos suscetíveis à erosão e potencialize a sua capacidade agrícola (BRADY e WEIL, 2013).

Em contrapartida, as amostras de solos correspondentes aos pontos P3 e P6, que possuem maior teor de argila, apresentam maior capacidade de adsorção hídrica e nutricional, devido à maior área superficial das partículas de argila, conferindo-lhes movimentação lenta de água e ar, e conseqüentemente aumentando sua atividade química (CENTENO et al., 2017). Desta forma, seria esperado que nos pontos P3 e P6 houvesse uma maior quantidade de nutrientes em níveis adequados. Porém, como pode ser observado na Tabela 3, os solos que apresentaram maior porcentagem de nutrientes adequados (53,3%) são os solos dos pontos P19 e P19.1.

No entanto, esta porcentagem de nutrientes não variou muito e se manteve baixa entre os demais solos (33% no ponto P2, 40% nos pontos P3,

P5, P6, P11.1 e P18 e 46,7 no ponto P4) (Tabela 3). Tal fato pode ser explicado pelo elevado teor de Fe nos solos de todos os pontos de coleta, pois os óxidos de ferro estão relacionados à adsorção de poluentes (metais pesados) e à fixação do fósforo nos solos tornando este nutriente indisponível às plantas. Além de atuarem como agentes cimentantes entre as partículas do solo e afetarem a capacidade de troca catiônica, reduzindo assim a capacidade de adsorção de nutrientes do solo (FAO, 2006).

Tabela 3. Quantidade (total ou porcentagem) dos nutrientes analisados (P, K, S, Ca, Mg, Al, H+Al, pH em H₂O, matéria orgânica, Fe, Zn, Cu, Mn, B e Na) que se apresentam em níveis adequados ou em níveis de deficiência em cada ponto de coleta (P2, P3, P4, P5, P6, P11.1, P18, P19 e P19.1).

Pontos de Coleta	P2	P3	P4	P5	P6	P11.1	P18	P19	P19.1
Total de Nutrientes Analisados	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Total de Nutrientes Adequados	6	7	8	7	7	7	7	8	8
Total de Nutrientes em Deficiência	9	8	7	8	8	8	8	6	6
% Nutrientes Adequados	33,3	40,0	46,7	40,0	40,0	40,0	40,0	53,3	53,3
% Nutrientes em Deficiência	66,7	60,0	53,3	60,0	60,0	60,0	60,0	46,7	46,7

5.2. Análise química do solo

As características químicas referentes as amostras de solos coletados nos nove pontos amostrais (P2, P3, P4, P5, P6, P11.1, P18, P19 e P19.1) estão apresentadas na Tabela 4. Os atributos químicos apresentaram pequena variação entre as amostras dos diferentes tipos de recuperação. A classificação dos parâmetros químicos do solo foi realizada de acordo com os valores de referência presente nos Manuais de Recomendação de Adubação dos Estados do Espírito Santo (2001 e 2007), Minas Gerais (1999) e São Paulo (1996) (Tabela 5).

De modo geral, as áreas estudadas apresentaram solos com baixa fertilidade, sendo o ponto 19.1 sob recuperação agrícola com a melhor condição em comparação aos demais pontos (Tabela 4). Destaca-se que os teores de Ca, Mg e K apresentaram níveis baixos nos solos e de Fe e Mn muito alto nas camadas superficiais (Tabela 4). Além disso, as suas relações (Ca:Mg, Ca:K e Mg:K) pode afetar a produtividade das plantas no futuro, uma vez que a baixa disponibilidade de elementos essenciais ou o seu excesso trazem consequências preocupantes para o solo, bem como impossibilitam e/ou limitam o crescimento de plantas, além de promover a contaminação de lençóis freáticos, e saturação do solo (MARSHNER, 2011).

Tabela 4. Caracterização química das amostras de solos em estudo.

PARÂMETRO ANALISADO	UNIDADE	P2	P3	P4	P5	P6	P11.1	P18	P19	P19.1
Fósforo Mehlich	mg/dm ³	4	4	4	5	5	7	7	7	5
K	mg/dm ³	13	14	11	17	15	19	44	61	79
S	mg/dm ³	6	5	8	6	8	7	4	6	6
Ca	cmol _c /dm ³	0,7	0,9	1,2	1,2	1,0	0,9	1,6	1,5	1,8
Mg	cmol _c /dm ³	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
H+Al	cmol _c /dm ³	1,2	1,6	1,1	1,7	1,2	0,9	1,0	1,1	0,9
pH em H ₂ O		5,9	5,8	6,3	5,9	6,5	7,5	7,2	7,2	7,6
Matéria Orgânica	dag/kg	0,5	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8
Fe	mg/dm ³	232	284	296	312	209	234	223	357	359
Zn	mg/dm ³	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	1,1
Cu	mg/dm ³	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	1,1	0,6	0,6
Mn	mg/dm ³	36	104	172	137	120	180	255	226	205
B	mg/dm ³	0,35	0,37	0,37	0,65	0,46	0,32	0,30	0,34	0,32
Na	mg/dm ³	13	11	25	17	10	21	27	36	43
Relação Fe/Mn	-	6,4	2,7	1,7	2,3	1,7	1,3	0,9	1,6	1,8
Relação Ca/Mg	-	7	9	12	12	10	9	16	15	3,6
Relação Ca/K	-	21	25,1	42,5	27,5	26	18,5	14,2	9,6	8,9
Relação Mg/K	-	3	2,8	3,5	2,3	2,6	2,1	0,9	0,6	2,5
Sat. Ca na CTC	%	34,4	34,1	49,4	39,4	42,8	46,2	56,9	52,5	52,9
Sat. Mg na CTC	%	4,9	3,8	4,1	3,3	4,3	5,1	3,6	3,5	14,7
Sat. K na CTC	%	1,6	1,4	1,2	1,4	1,6	2,5	4,0	5,5	6,0
Índice Sat. Na	%	2,8	1,8	4,5	2,4	1,9	4,7	4,2	5,5	5,5
Soma de Bases	cmol _c /dm ³	0,9	1,1	1,4	1,4	1,2	1,1	1,9	1,9	2,7
CTC Efetiva	cmol _c /dm ³	0,9	1,1	1,4	1,4	1,2	1,1	1,9	1,9	2,7
CTC a pH 7,0	cmol _c /dm ³	2,1	2,7	2,5	3,1	2,4	2,0	2,9	3,0	3,6
Saturação de Bases	%	42,6	40,4	56,6	45,5	49,6	55,9	65,9	63,5	74,9

Tabela 5. Classificação dos parâmetros químicos das amostras de solos em estudo de acordo com os Manuais de Recomendação de Adubação dos Estados do Espírito Santo (2001 e 2007), Minas Gerais (1999) e São Paulo (1996).
 ■ Muito Baixo, ■ Baixo, ■ Médio, ■ Alto.

PARÂMETRO ANALISADO	P2	P3	P4	P5	P6	P11.1	P18	P19	P19.1
Fósforo Mehlich	■	■	■	■	■	■	■	■	■
K	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ca	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Mg	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Al	■	■	■	■	■	■	■	■	■
H+Al	■	■	■	■	■	■	■	■	■
pH em H ₂ O	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Matéria Orgânica	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fe	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Zn	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cu	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Mn	■	■	■	■	■	■	■	■	■
B	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Na	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sat. Ca na CTC	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sat. Mg na CTC	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sat. K na CTC	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Índice Sat. Na	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Soma de Bases	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CTC Efetiva	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CTC a pH 7,0	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Saturação de Bases	■	■	■	■	■	■	■	■	■

De acordo com os resultados apresentados é possível observar que os valores referentes ao P disponível nas amostras variaram entre 4 e 7 mg dm⁻³, com média de 5,33 mg dm⁻³ P, sendo assim considera-se que estes solos apresentam baixa disponibilidade deste nutriente (Tabelas 4 e 5). Similarmente ao P, os teores de Mg e a porcentagem de matéria orgânica, em média de 0,17

$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,74 \text{ dag dm}^{-3}$, respectivamente, foram considerados baixos em todos os solos dos pontos analisados (Tabelas 4 e 5).

Ao analisar os teores de Ca^{2+} verificou-se que estes variaram entre 0,7 e $1,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo classificados como de baixa disponibilidade nos pontos P2 a P11.1 e de média disponibilidade nos pontos P18 a P19.1 (Tabelas 4 e 5). Para o K, os resultados foram semelhantes ao Ca^{2+} , com valores de baixa e média disponibilidade (Tabelas 4 e 5). Estes resultados sugerem que processos de erosão ou lixiviação podem ter contribuído para a perda destes nutrientes. Em relação à disponibilidade de S, esta foi classificada como média em todos os pontos estudados, exceto na amostra de solo do ponto P18 cuja disponibilidade foi classificada como média. Os teores de S variaram de 6 a 8 mg dm^{-3} (Tabelas 4 e 5).

O único teor de B com nível alto foi registrado apenas na amostra de solo do ponto P5, sendo que nos pontos P3, P4, e P6 o teor deste elemento foi médio e nos pontos P2, P11.1, P18, P19 e P19.1 foi classificado como de nível baixo (Tabelas 4 e 5). Os valores correspondentes à saturação de Ca, Mg e K na CTC apresentaram níveis baixos ou muito baixos nos diferentes pontos de coleta, exceto nos pontos P19 e P19.1 em que a saturação de K na CTC teve um nível alto (Tabelas 4 e 5).

Os teores de Zn presentes nas amostras, foram classificados como muito baixo em todos os pontos, variando entre 0,1 e 0,4 (Tabelas 4 e 5). Analogamente, os teores de Cu foram considerados muito baixos nos pontos P2 a P11.1 e baixos nos pontos P18 a P19.1, variando entre 0,2 e $1,1 \text{ mg dm}^{-3}$ (Tabelas 4 e 5). Contrariamente aos elementos citados acima, os teores de Fe foram elevados em todos os pontos amostrais, variando de 209 a 359 mg dm^{-3} (Tabelas 4 e 5). O Mn também foi encontrado em teores elevados variando de 36 a 255 mg dm^{-3} , considerados médios nos pontos P2, P3 e P6 e altos nos pontos P4, P5, P11.1, P18, P19 e P19.1 (Tabelas 4 e 5).

Em um estudo realizado por Pinto-Coelho (2015), foi relatado que a compactação do solo, contaminação por metais e aminas, e a queda na fertilidade das várzeas e áreas alagáveis seriam os principais impactos previstos para o solo após o desastre. Além disso, ao fazer uma análise comparativa entre solos de áreas naturais e áreas impactadas, Trugilho (2018) encontrou

resultados que apontavam um aumento no teor de Fe e Mn, aumento de pH, redução da CTC e da matéria orgânica nos solos após o desastre.

Com exceção da amostra de solo da área de recuperação agrícola, referente ao do ponto 19.1, os demais apresentaram baixo teor de cátions trocáveis que pode ser atribuído à baixa CTC destes solos (Tabelas 4 e 5) e as perdas de nutrientes pouco retidos nos sítios de troca, devendo, dessa forma, serem manejados com critérios rigorosos, a fim de atingirem seu máximo potencial produtivo, sem que provoque a sua degradação. Com relação aos parâmetros de índice de saturação de Na e CTC a pH 7,0, foi possível observar que seus níveis foram baixos em todos os pontos de coleta (Tabelas 4 e 5). Já os parâmetros de soma de bases e CTC efetiva estão baixos em todos os pontos, com exceção do ponto P19.1 (Tabelas 4 e 5).

Silva et al. (2015) demonstraram que o rejeito oriundo do rompimento da barragem da Samarco possuía 90% de areia e silte em sua composição e os outros 10% correspondiam à argila, fatores que interferem na estrutura física do solo. Conforme o Manual Técnico de Pedologia emitido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (2015), a areia apresenta baixa superfície específica, logo, a sua presença em quantidades elevadas na composição dos solos analisados neste trabalho pode ter causado a baixa capacidade de trocas catiônicas observada, induzindo, conseqüentemente, a baixa fertilidade.

A saturação de bases variou entre 40,4 e 74,9, considerada baixa nos pontos P2, P3, P5 e P6, média nos pontos P4, P11.1, P18 e P19, e alta no ponto P19.1 (Tabelas 4 e 5). É importante destacar que quando o solo possuir saturação de base alta, não significa necessariamente que ele possui alta fertilidade, devido à presença de altos teores de sódio e/ou altos teores de sais solúveis (EMBRAPA, 2005). Além disso, solos com textura arenosa (franca ou areia) e S inferior a $1,0 \text{ cmolc kg}^{-1}$ também são considerados de baixa fertilidade (EMBRAPA, 2005).

Os valores de pH em H_2O apresentaram similaridade entre as amostras dos tratamentos, variando de 5,8 a 7,6, sendo considerados de acidez média e fraca nos pontos P2 a P6, e alcalinidade fraca nos pontos P11.1 a P19.1 (Tabelas 4 e 5). Desta forma, devido aos valores de pH no solo, não foi detectado Al e, conseqüentemente, a acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) foi considerada baixa no solo de todos os pontos analisados (Tabelas 4 e 5).

Os parâmetros que ordenam a distribuição de metais pesados, bem como a sua adsorção no solo e nas águas, são controlados pelo tipo, especificação, concentração do metal e pH do solo. Grandes retenções de metais e solubilidades mais baixas ocorrem em valores de pH elevado no solo (BRADL, 2004). Neste mesmo sentido, ao analisar a Tabela 4, os valores de pH nos solos variaram de médio a alto, sugerindo uma alta retenção de metais nos diversos pontos analisados.

A troca de íons e o pH são fatores importantes que influenciam o fluxo de metais pesados no solo, a disponibilidade de nutrientes para as plantas e microrganismos, e interferem na poluição do solo (ALLOWAY, 1995). Tal fato explica a baixa disponibilidade de matéria orgânica encontrada (Tabela 4), pois conforme os dados das análises físicas dos solos (Tabela 2), estes apresentam textura arenosa e dificilmente haverá disponibilidade nutricional adequada neste tipo de solo, a menos que foram acometidos a adubação.

5.3. Análise Química Foliar

A análise foliar consiste em uma das técnicas capazes de explicar o estado nutricional, através de avaliações e interpretações de dados que possibilitam a verificação de ocorrência de deficiências, toxidez ou desequilíbrio de nutrientes. A análise foliar propicia também o acompanhamento e avaliação de programas de adubação, se assim for necessário, além de auxiliar em seu ajuste para a próxima safra de culturas anuais, fornecendo a complementação das informações fornecidas pela análise de solo (EMBRAPA, 2005). Logo, o presente estudo buscou realizar a análise em questão a fim de promover a compreensão de como tem lido a dinâmica das plantas com relação ao solo.

Os dados obtidos através da análise química foliar possibilitaram a avaliação dos teores de macronutrientes e micronutrientes na parte aérea de diferentes espécies coletadas em nove pontos amostrais (P2, P3, P4, P5, P6, P11.1, P18, P19 e P19.1) (Tabela 6). As classificações dos nutrientes de acordo com seus valores de referência encontram-se na Tabela 7.

Tabela 6. Teores de macro e micronutrientes da parte aérea das plantas coletadas em nove diferentes pontos sob regeneração natural (P2, P4 e P19), revegetação (P3, P5, P6, P11.1, P18) e recuperação agrícola (P19.1).

PLANTAS (PONTOS DE COLETA)	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Cu	Mn	B
Cyperus (P2)	19,53	1,09	18,75	2,50	1,82	3,26	765,0	11,0	8,0	323,0	14,0
Hedychium (P2)	24,64	1,75	16,25	5,55	2,50	1,92	315,0	17,0	7,0	560,0	9,0
Calopogonium (P3)	31,85	0,77	8,13	6,55	1,25	0,89	163,0	6,0	7,0	138,0	28,0
Crotolaria (P3)	51,66	2,23	13,75	17,03	2,13	3,05	538,0	14,0	19,0	796,0	21,0
Hedychium (P4)	21,28	1,65	23,75	2,81	3,81	2,01	208,0	41,0	9,0	299,0	5,0
Brachiaria (P4)	7,28	0,89	15,63	1,87	1,75	1,19	9354,0	68,0	12,0	100,0	25,0
Calopogonium (P5)	35,63	3,92	16,88	16,97	3,81	3,48	1113,0	22,0	14,0	146,0	34,0
Crotolaria (P5)	49,84	2,87	20,00	18,97	3,13	3,37	512,0	18,0	15,0	242,0	39,0
Calopogonium (P6)	34,51	2,71	18,75	17,35	2,31	2,75	3318,0	21,0	14,0	181,0	25,0
Crotolaria (P6)	47,18	2,63	16,88	17,41	2,69	3,48	264,0	15,0	17,0	259,0	15,0
Crotolaria (P11.1)	57,12	2,87	15,63	18,91	3,25	3,16	518,0	19,0	18,0	287,0	81,0
Calopogonium (P11.1)	38,22	2,63	14,37	17,10	3,31	2,75	3248,0	22,0	13,0	222,0	25,0
Canavalia (P18)	44,38	3,92	15,63	48,48	6,88	4,82	2169,0	44,0	17,0	353,0	27,0
Calopogonium (P18)	39,83	6,66	26,25	28,08	9,00	6,31	15829,0	64,0	34,0	324,0	25,0
Brachiaria (P19)	22,96	0,92	10,63	2,43	2,06	1,35	934,0	6,0	7,0	152,0	28,0
Cyperus (P19)	20,02	2,17	13,13	2,81	1,81	1,11	809,0	8,0	7,0	417,0	37,0
Crotolaria (P19.1)	45,71	2,36	13,13	17,72	5,31	2,37	748,0	15,0	16,0	321,0	31,0
Ipamoea (P19.1)	41,65	3,92	19,38	20,40	4,25	4,55	3493,0	14,0	16,0	164,0	21,0

Tabela 7. Classificação dos parâmetros químicos das amostras foliares das plantas analisadas de acordo com o livro Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (1999) e com o Software da INCAPER Recomendação de fertilizantes, calcário e gesso para as principais culturas do estado do Espírito Santo (2009). ■ Muito Baixo, ■ Baixo, ■ Médio, ■ Alto.

GÊNEROS DAS PLANTAS	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Cu	Mn	B
Cyperus (P2)	Alto	Médio	Médio	Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo	Médio	Muito Baixo	Baixo
Hedychium (P2)	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Muito Baixo	Baixo	Baixo	Muito Baixo	Baixo
Calopognium (P3)	Muito Baixo	Médio	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Muito Baixo	Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo
Crotolaria (P3)	Muito Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo
Hedychium (P4)	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Muito Baixo	Médio	Médio	Muito Baixo	Baixo
Brachiaria (P4)	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Médio	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Médio	Médio
Calopognium (P5)	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
Crotolaria (P5)	Muito Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo
Calopognium (P6)	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
Crotolaria (P6)	Muito Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo
Crotolaria (P11.1)	Muito Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
Calopognium (P11.1)	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
Canavalia (P18)	Muito Baixo	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio
Calopognium (P18)	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
Brachiaria (P19)	Muito Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Muito Baixo	Baixo	Médio	Médio	Muito Baixo
Cyperus (P19)	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Muito Baixo	Baixo	Médio	Muito Baixo	Muito Baixo
Crotolaria (P19.1)	Muito Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Muito Baixo	Baixo	Muito Baixo	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo
Ipomoea (P19.1)	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio

Conforme os resultados obtidos, observaram-se elevados teores de N na parte aérea das plantas coletadas em todas as espécies em todos os pontos amostrados, exceto para as plantas do gênero *Hedychium* nos pontos P2 e P4, e *Brachiaria* no ponto P4, cujos teores de N encontram-se em níveis expressivamente baixos (Figura 4A, Tabelas 6 e 7). Os maiores teores de N

foram encontrados nas plantas do gênero *Crotolaria* nos pontos P3, P5, P6, P11.1 e P19.1, variando de 57,12 a 45,71 g kg⁻¹ (Tabela 6 e 7), e este efeito deve-se ao grande potencial da *Crotalária* para fixar biologicamente o N atmosférico (URQUIAGA e ZAPATA, 2000; RAMOS et al., 2001), principalmente quando consorciada com uma gramínea, que é grande competidora pelo N do solo. No entanto, o teor de N acumulado pela *Crotolaria* nestas condições de campo foi muito inferior aos obtidos por Ramos et al. (2001) (195 kg/ha de N).

Com relação ao teor de P, os níveis adequados foram observados somente em plantas do gênero *Cyperus* no ponto P2, gênero *Calopogonium* no ponto P3 e nas plantas do gênero *Brachiaria* nos pontos P4 e P19 (Figura 4B, Tabela 6 e 7). Nas demais espécies, houve variação do elemento em questão entre baixas e altas concentrações, com destaque para as plantas dos gêneros *Calopogonium* nos pontos P5, P6, P11.1 e P18, *Cyperus* no ponto P19 e *Ipamoea* no ponto P19.1, que apresentaram um elevado teor de P (Figura 4B, Tabela 6 e 7) condizente com uma alta taxa de absorção deste nutriente. Além disso, plantas do gênero *Crotolaria*, *Hedychium* e *Canavalia* em todos os pontos de coleta apresentaram teores de P muito baixos, ou seja, numa faixa de deficiência deste elemento (Figura 4B, Tabela 6 e 7).

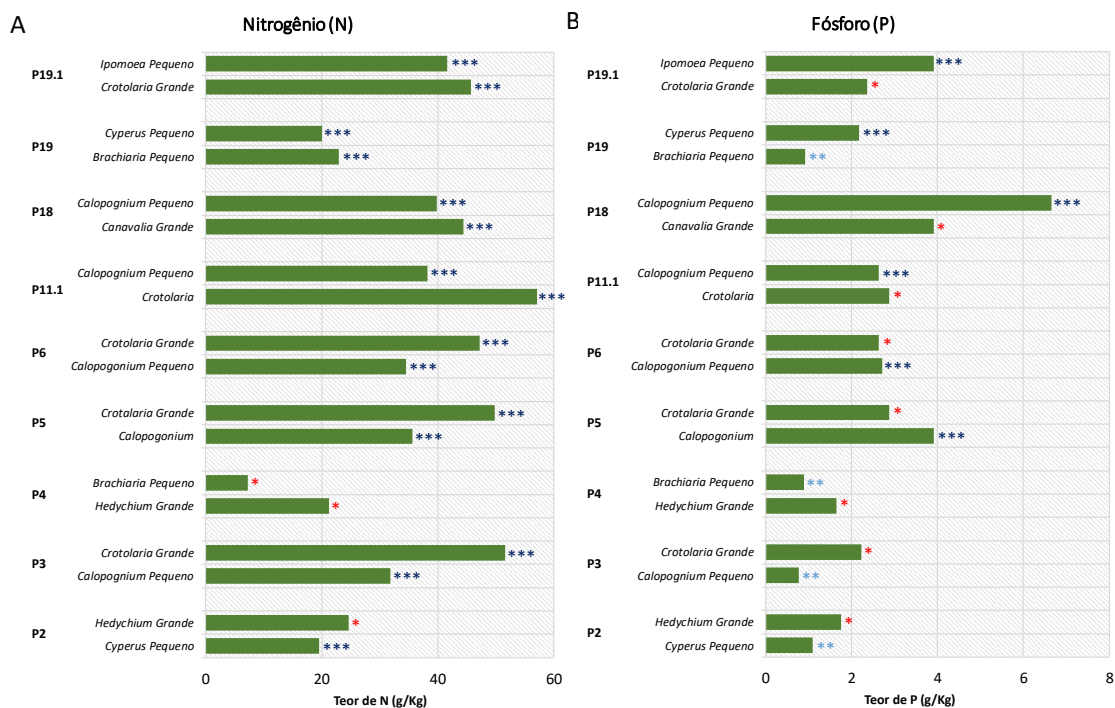


Figura 4. Teores de nitrogênio (A) e fósforo (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais. ***Representam alto nível do nutriente, **Representam nível médio do nutriente, *Representa baixo nível do nutriente nas folhas

Ao analisar os teores foliares de K (Figura 5A, Tabelas 6 e 7), observam-se baixas concentrações deste elemento em todas as plantas do gênero *Crotalaria* nos pontos P3, P5, P6, P11.1 e P19.1, *Hedychium* nos pontos P2 e P4, *Calopogonium* no ponto P3, e *Brachiaria* e *Cyperus* no ponto P19. Contrariamente, plantas do gênero *Ipomoea* no ponto P19.1, *Canavalia* e *Calopogonium* no ponto P18, apresentaram altos teores de K, com destaque para esta última que apresentou o maior teor de K ($26,25 \text{ g kg}^{-1}$) de todas as plantas (Figura 5A, Tabelas 6 e 7). Estes valores são bastante similares aos obtidos por outros autores comparando a nutrição de diferentes tipos de espécies utilizadas na adubação verde (Faria et al., 2004). As demais plantas estavam com teores de K dentro da faixa de suficiência deste nutriente (Figura 5A, Tabela 6 e 7).

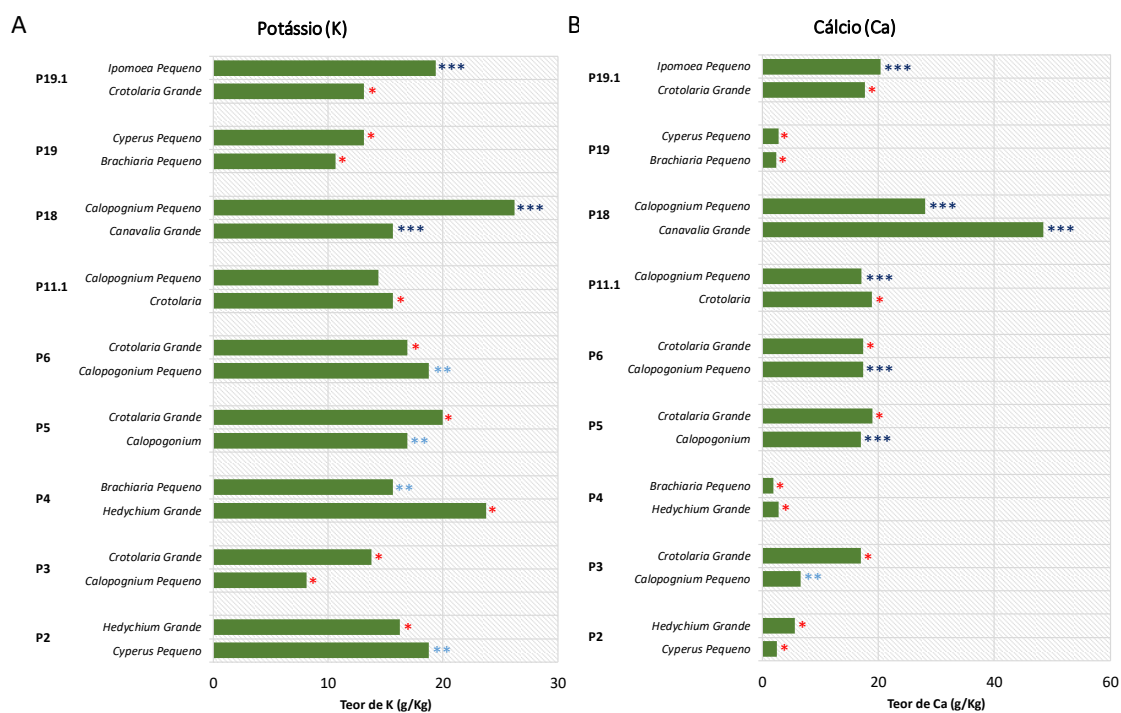


Figura 5. Teores de potássio (A) e cálcio (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais. ***Representam alto nível do nutriente, **Representam nível médio do nutriente, *Representa baixo nível do nutriente nas folhas.

Ao analisar os teores de Ca, é possível observar que seus níveis se encontram dentro da faixa de suficiência nutricional exclusivamente nas plantas do gênero *Calopogonium* no ponto P3 (Figura 5B, Tabela 7). As plantas dos gêneros *Crotalaria* nos pontos P3, P5, P6, P11.1 e P19.1, *Cyperus* nos pontos P2 e P19, *Hedychium* nos pontos P2 e P4 e *Brachiaria* nos pontos P4 e P19 apresentaram baixos níveis de Ca variando entre 1,87 e 18,97 g kg⁻¹ (Figura 5B, Tabela 6). Já as plantas dos gêneros *Calopogonium* nos pontos P5, P6, P11.1 e P18, *Canavalia* no ponto P18 e *Ipomoea* no ponto P19.1 apresentaram elevados teores de Ca em todos os pontos de coleta, variando entre 16,97 e 48,48 g kg⁻¹ (Figura 5B, Tabelas 5 e 6).

Os teores foliares de Mg (Figura 6A, Tabelas 5 e 6), das plantas do gênero *Crotalaria* nos pontos P2 e P6 encontram-se com baixos níveis de Mg, enquanto plantas do gênero *Calopogonium* nos pontos P5, P11.1 e P18, *Canavalia* no P18, e *Crotalaria* e *Ipomoea* no ponto P19.1, encontram-se com teor elevado deste elemento. As demais plantas apresentaram teores de Mg na

faixa adequada, (Figura 6A, Tabela 6). O maior teor de Mg foi identificado nas plantas do gênero *Calopogonium* no ponto P18 (9 g kg^{-1}), e o menor teor foi observado nas plantas do gênero *Calopogonium* no ponto P3 ($1,25 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 6). Com relação aos teores de S, houve grande oscilação entre as plantas coletadas nos diferentes pontos, em que estas apresentaram teores elevados, de deficiência ou adequados, sem nenhum destaque de valores discrepantes quando comparados aos níveis adequados, variando entre $0,89$ e $6,31 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 6B, Tabelas 5 e 6).

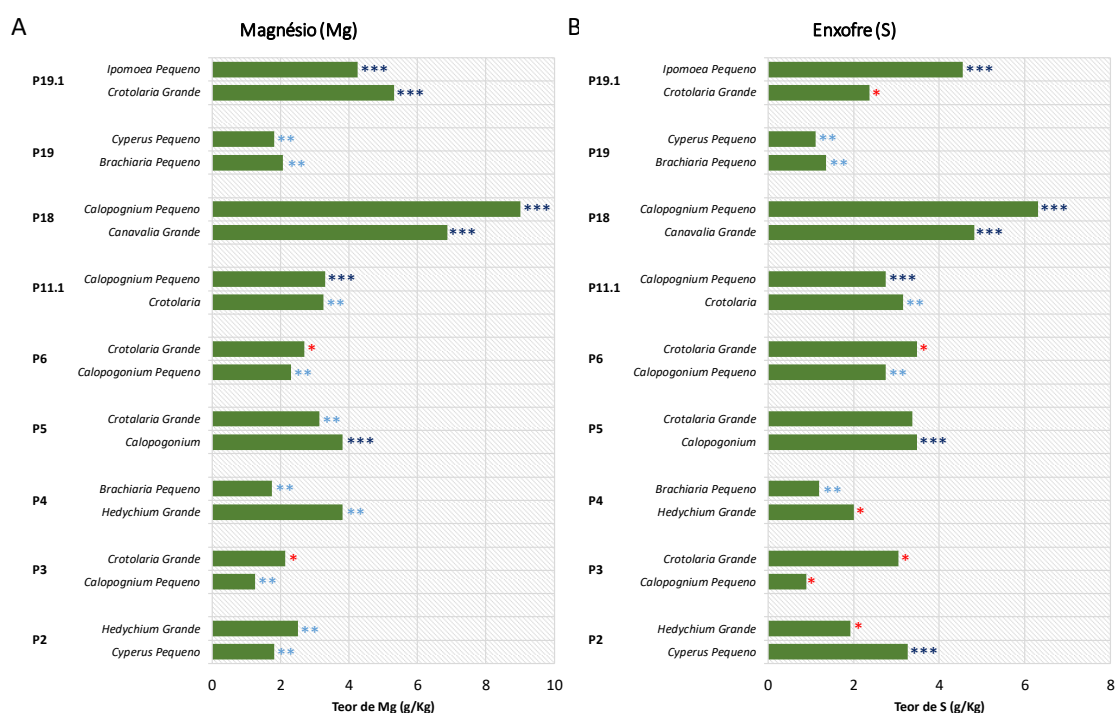


Figura 6. Teores de magnésio (A) e enxofre (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais. ***Representam alto nível do nutriente, **Representam nível médio do nutriente, *Representa baixo nível do nutriente nas folhas.

Elevados teores de Fe foram identificados em todas as plantas em todos os pontos, com exceção das plantas do gênero *Crotalaria* presentes nos pontos P3, P5, P6, P11.1, as quais apresentaram níveis de deficiência deste metal (Figura 7A, Tabela 6). É importante destacar que os altos teores de Fe variaram entre 163 a $15.829 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 5).

Entre as 18 plantas coletadas nos nove diferentes pontos amostrais, foi observada deficiência de Zn em 11 plantas, variando de 6 a 19 mg kg^{-1} , nos pontos P2, P3, P6, P11.1, P19 e P19.1. (Figura 7B, Tabelas 5 e 6). Teores

relativamente adequados de Zn foram registrados apenas nas plantas dos gêneros *Hedychium* no ponto P4 e *Calopogonium* nos pontos P5, P6 e P11.1 (Figura 7B, Tabela 7). Já as plantas dos gêneros *Brachiaria* no ponto P4, e *Calopogonium* e *Canavalia* no ponto P18, exprimiram valores elevados teores de Zn, os quais foram de 68, 64 e 44 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 7B, Tabelas 6 e 7).

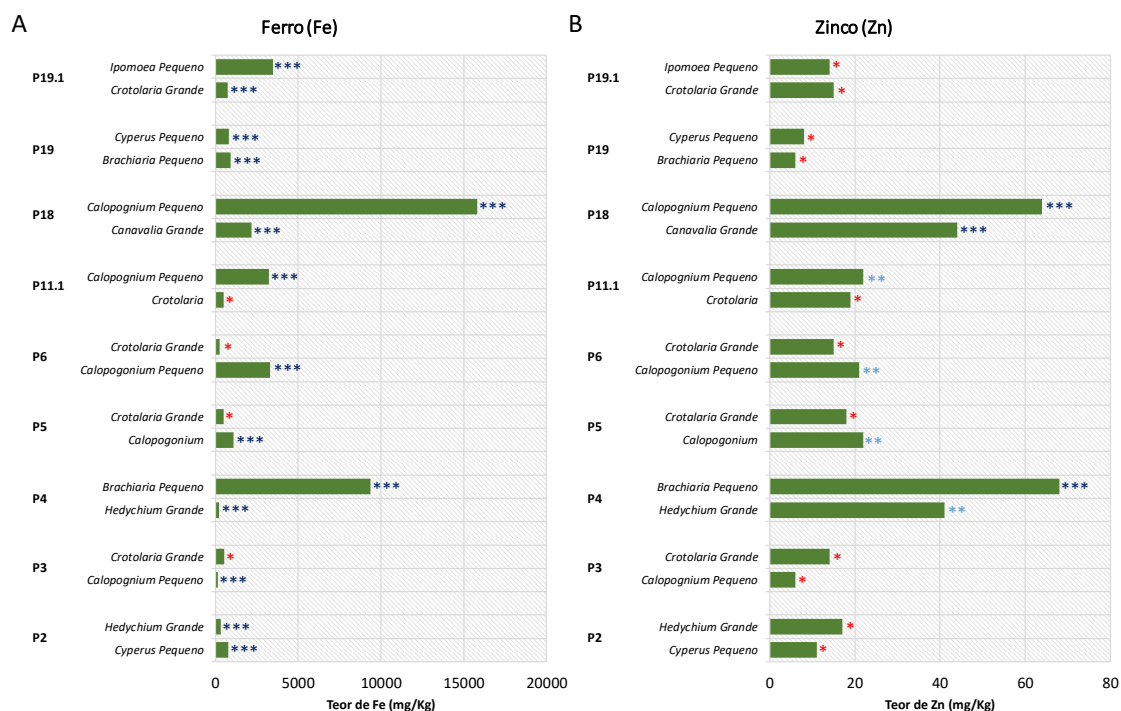


Figura 7. Teores de ferro (A) e zinco (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais. ***Representam alto nível do nutriente, **Representam nível médio no nutriente, *Representa baixo nível do nutriente nas folhas.

Opostamente, os teores de Zn observados nas amostras apresentaram altos teores foliares de Cu, variando de 13 a 34 mg kg⁻¹ nas 11 plantas das 18 coletadas, nos respectivos pontos: P3, P5, P6, P11.1, P18, e P19.1 (Figura 8A, Tabelas 6 e 7). Plantas dos gêneros *Cyperus* no ponto P2, *Calopogonium* no ponto P3, *Hedychium* e *Brachiaria* no ponto P4 e *Brachiaria* e *Cyperus* no ponto P19 obtiveram teores de Cu adequados, enquanto somente as plantas do gênero *Hedychium* no ponto P2 não absorveram Cu suficiente, apresentando, desta forma, deficiência deste elemento (Figura 8A, Tabela 7).

Quando analisados os teores de Mn, todas as plantas em todos os pontos de coleta estavam com elevados teores deste elemento, exceto as plantas do gênero *Brachiaria* nos pontos P4 e P19, as quais apresentaram teores

de Mn dentro da faixa de suficiência nutricional (Figura 8B, Tabela 6). Os altos teores de Mn variaram entre 138 a 560 mg kg⁻¹ (Tabela 6).

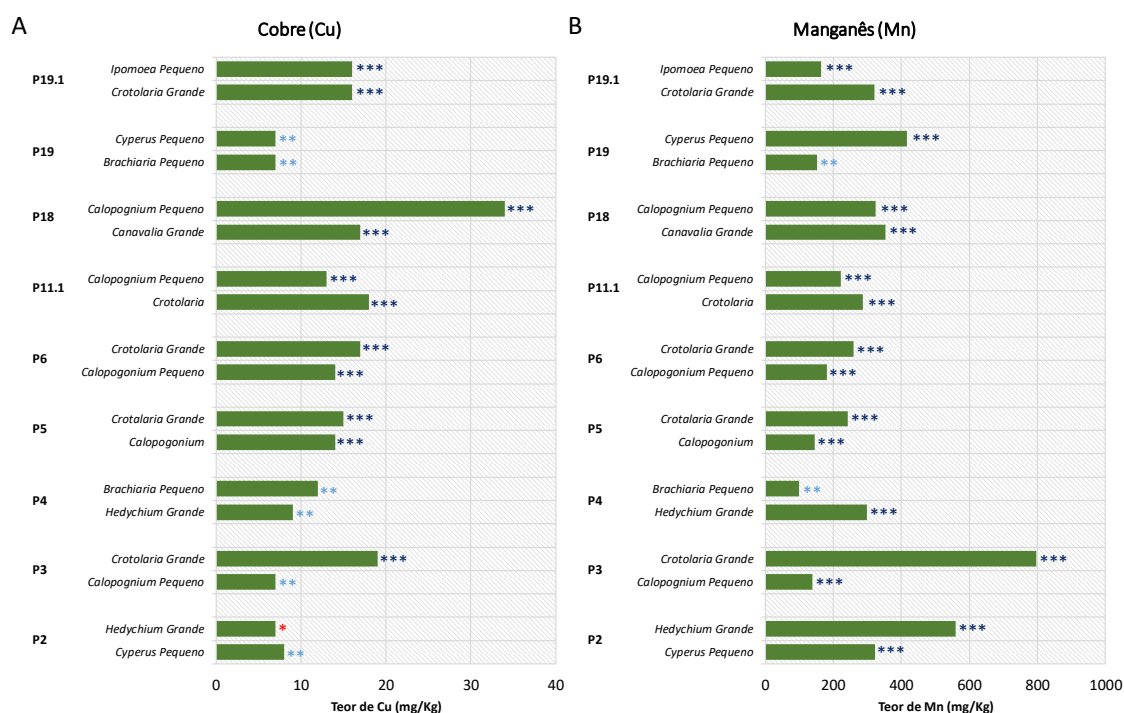


Figura 8. Teores de cobre (A) e manganês (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais. ***Representam alto nível do nutriente, **Representam nível médio do nutriente, *Representa baixo nível do nutriente nas folhas.

Ao analisar os teores de B, nota-se que apenas quatro plantas apresentaram teores adequados do elemento em questão (Figura 9A, Tabela 7). Todas as plantas do gênero *Crotalaria* presentes nos pontos P3, P5, P6, P11.1, e P19.1, além das plantas dos gêneros *Brachiaria* e *Cyperus* no ponto P19 apresentaram excesso de B, onde o maior teor (81 mg kg⁻¹) foi registrado nas plantas do gênero *Crotalaria* no ponto P11.1 (Figura 9A, Tabelas 6 e 7). No entanto, plantas do gênero *Cyperus* no ponto P2, *Hedychium* nos pontos P2 e P4, e *Calopogonium* nos pontos P3, P5, P6 e P11.1 encontram-se com deficiência de B, em que o menor teor foi de 5 mg kg⁻¹, registrado nas plantas do gênero *Hedychium* no P4 (Figura 8A, Tabelas 6 e 7).

Os teores de Na encontram-se elevados em todas as plantas de todos os pontos amostrais. Os teores de Na variaram de 2200 a 7700 mg kg⁻¹, porém quando observados os valores de Na no solo, nota-se que estes estão em baixa quantidade em todos os pontos amostrais estudados, variando de 10 a 43 mg dm⁻³ (Figura 9B, Tabelas 6 e 7). Portanto, o alto teor de Na nas folhas somente

condiz com a prática de adubação por hidrojateamento aplicado nos locais de coleta, podendo, assim, elevar o teor foliar de diversos nutrientes, incluindo o Na.

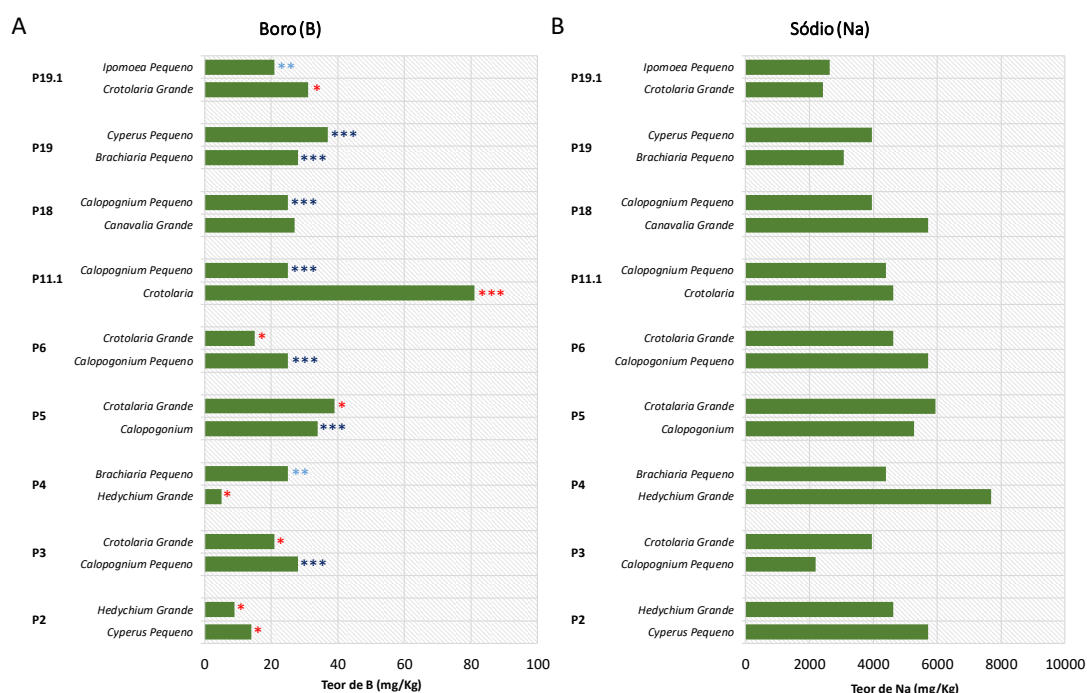


Figura 9. Teores de boro (A) e sódio (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais. ***Representam alto nível do nutriente, **Representam nível médio do nutriente, *Representa baixo nível do nutriente nas folhas.

Os resultados correspondentes à relação entre os nutrientes encontram-se nas figuras 10 a 17. Foi possível observar que a relação entre os balanços nutricionais dos macros e micronutrientes da parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais foi bem distinta, apresentando oscilações entre as plantas coletadas.

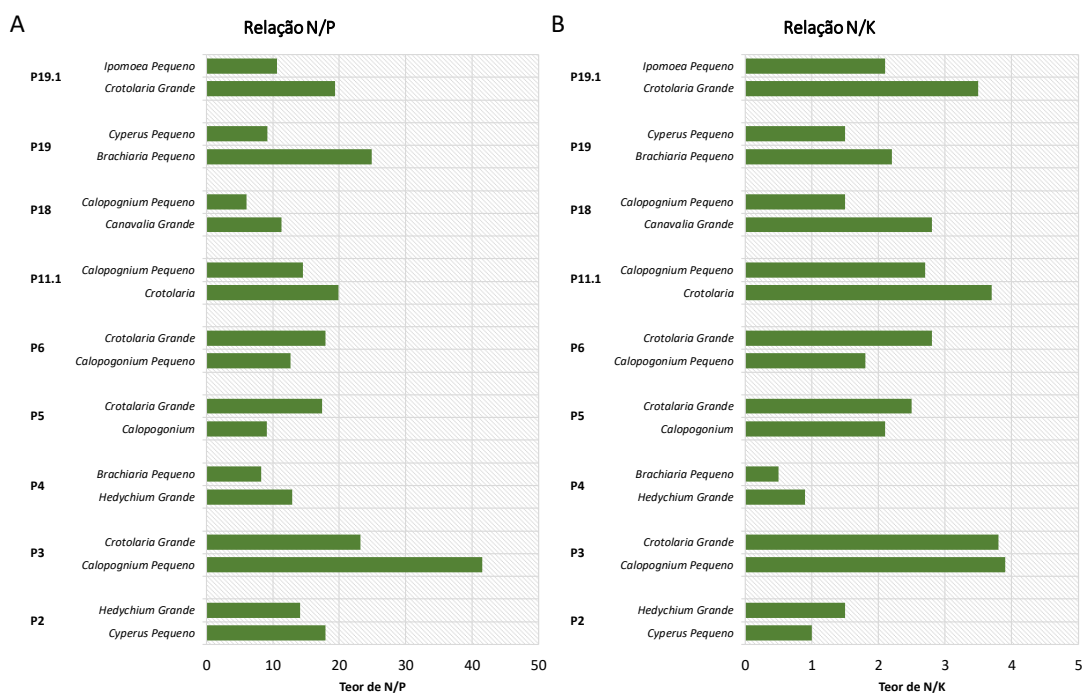


Figura 10. Relação entre o teor de nitrogênio e fósforo (A) e relação entre o teor de nitrogênio e potássio (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais.

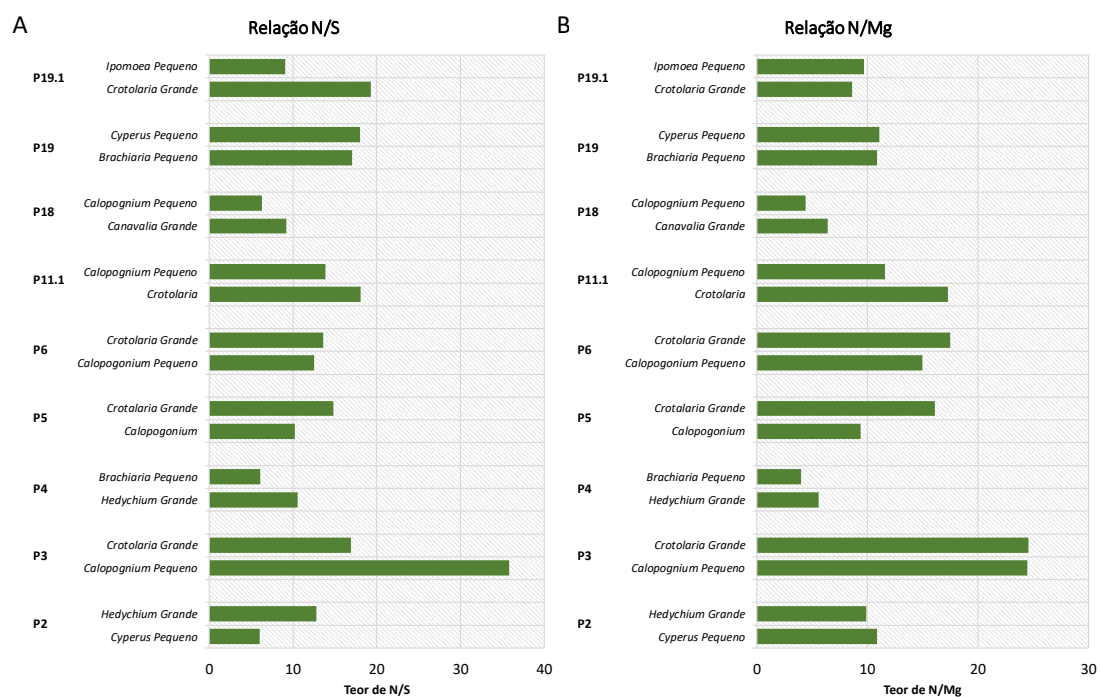


Figura 11. Relação entre o teor de nitrogênio e enxofre (A) e relação entre o teor de nitrogênio e magnésio (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais.

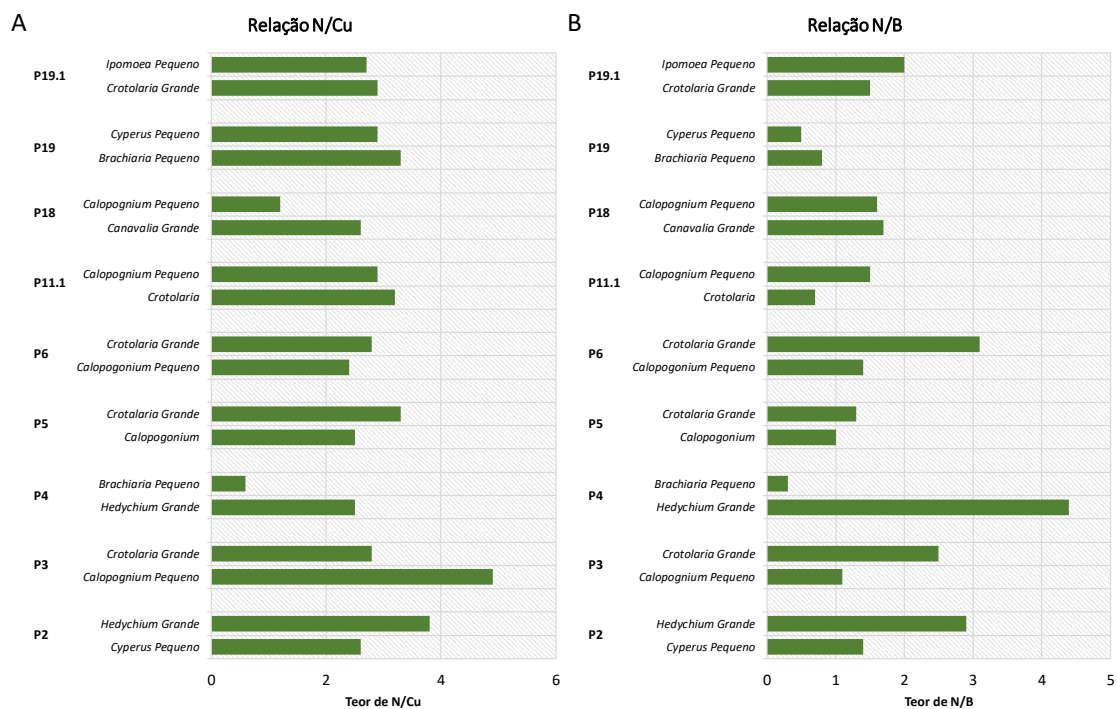


Figura 12. Relação entre o teor de nitrogênio e cobre (A) e relação entre o teor de nitrogênio e boro (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais.

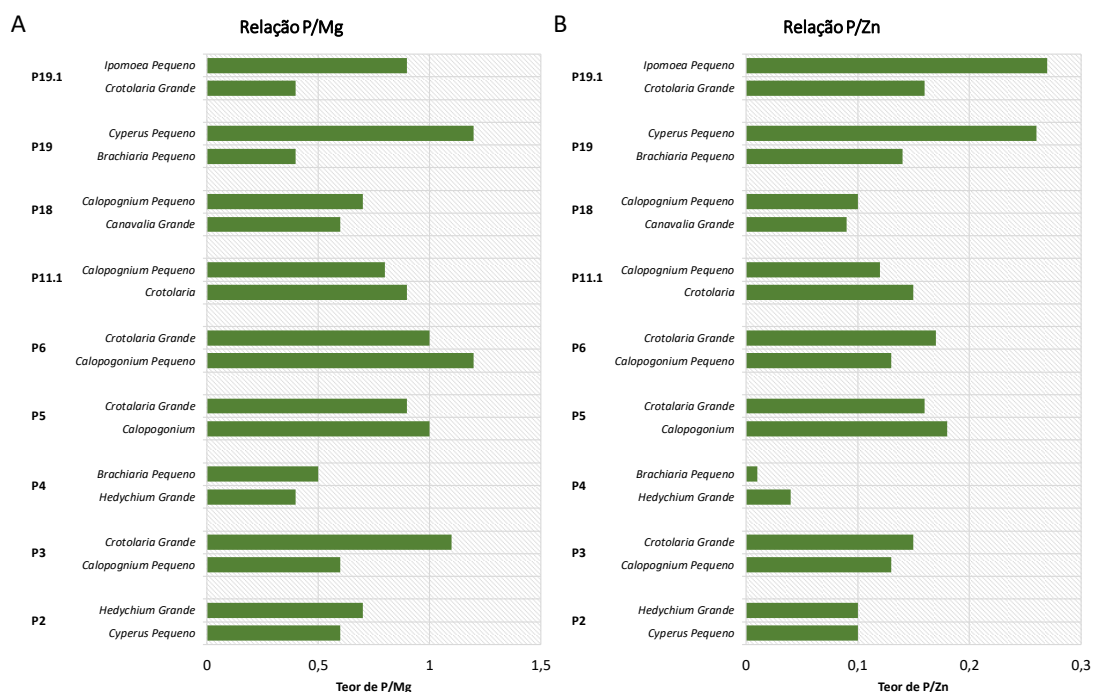


Figura 13. Relação entre o teor de fósforo e magnésio (A) e relação entre o teor de fósforo e zinco (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais.

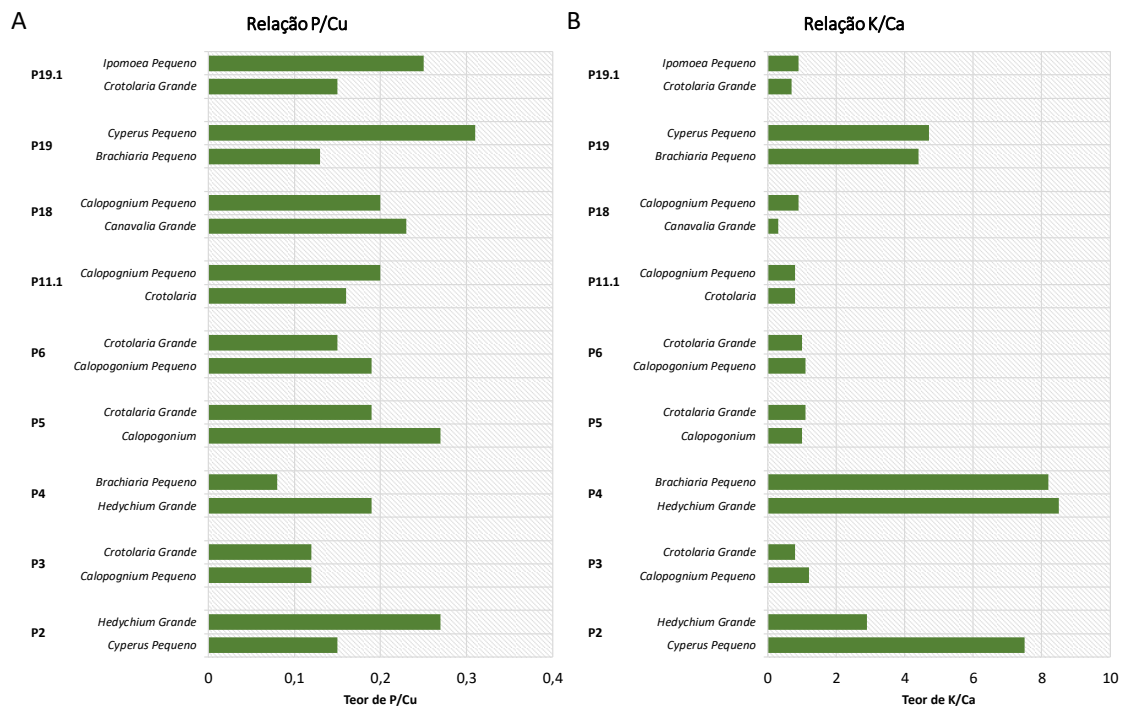


Figura 14. Relação entre o teor de fósforo e cobre (A) e relação entre o teor de potássio e cálcio (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais.

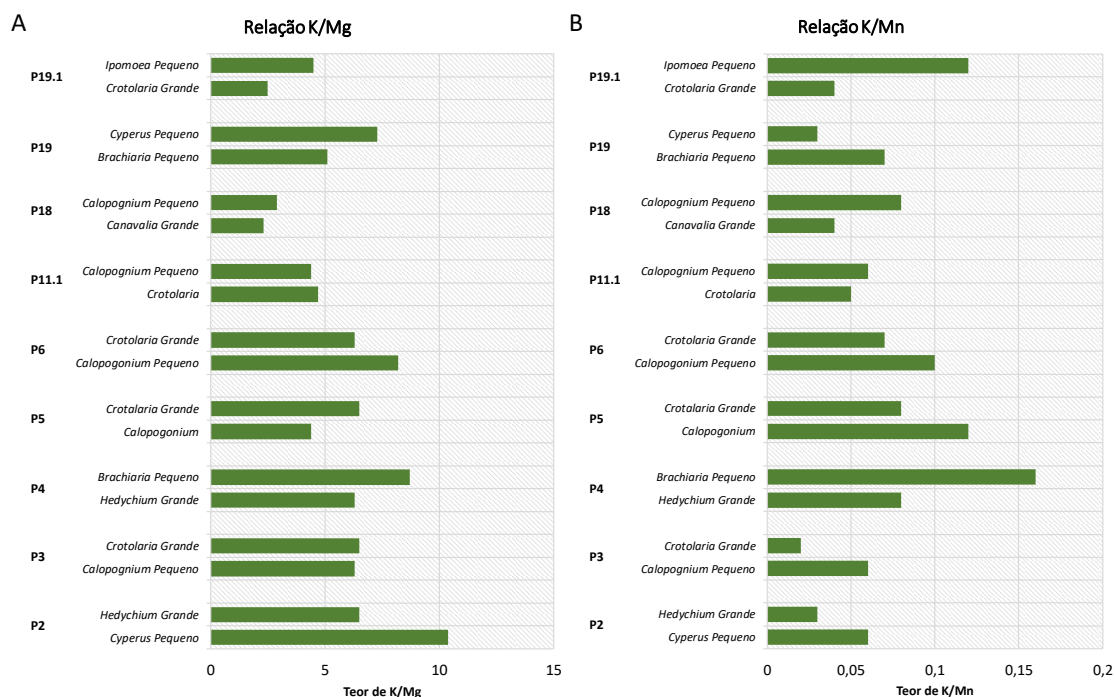


Figura 15. Relação entre o teor de potássio e magnésio (A) e relação entre o teor de potássio e manganês (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais.

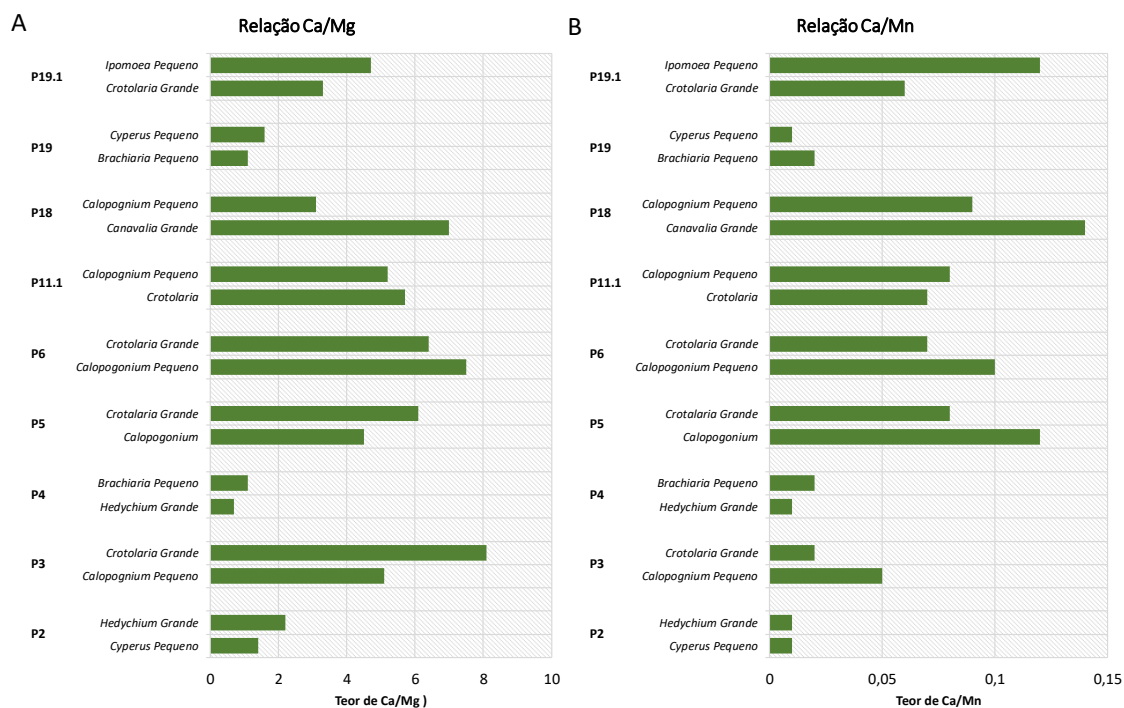


Figura 16. Relação entre o teor de cálcio e magnésio (A) e relação entre o teor de cálcio e manganês (B) na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais.

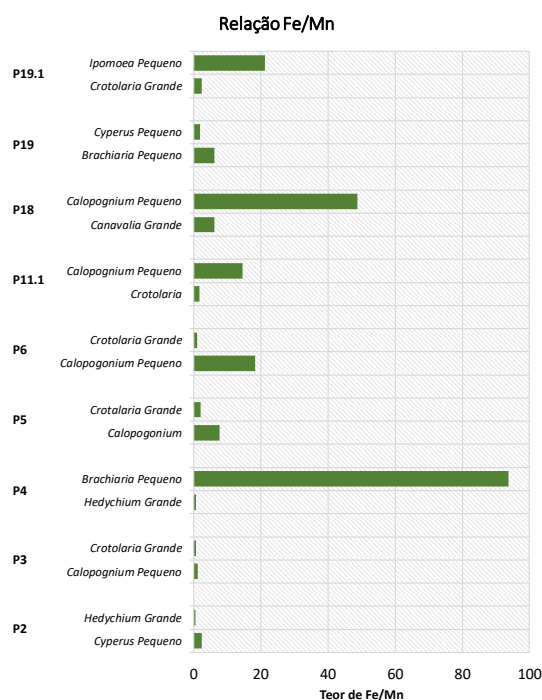


Figura 17. Relação entre o teor de ferro e manganês na parte aérea das plantas coletadas nos diferentes pontos amostrais.

5.4. Correlação Solo x Planta

Os pontos de coleta analisados no presente estudo (P2, P3, P4, P5, P6, P11.1, P18, P19 e P19.1) são pontos cujos solos estão com deficiência da maioria dos nutrientes essenciais para as plantas, nomeadamente de P, K, Mg, Zn, Cu e B, e com níveis elevados dos micronutrientes Fe e Mn que, em excesso, são considerados tóxicos dependendo do pH do solo (Tabela 7).

Tabela 8. Quantidade (total ou porcentagem) dos pontos de coleta analisados (P2, P3, P4, P5, P6, P11.1, P18, P19 e P19.1) que apresenta cada nutriente analisado (P, K, S, Ca, Mg, Al, H+Al, pH em H₂O, matéria orgânica, Fe, Zn, Cu, Mn, B e Na) em níveis adequados ou em níveis de deficiência.

Parâmetro Analisado	Total de Pontos Analisados	Total de Pontos com Nutriente Adequado	Total de Pontos com Nutriente em Deficiência	% de Pontos com Nutriente Adequado	% de Pontos com Nutriente em Deficiência
Fósforo	9	0	9	0,00	100,00
K	9	2	7	22,22	77,78
S	9	8	1	88,89	11,11
Ca	9	6	3	66,67	33,33
Mg	9	0	9	0,00	100,00
Al	9	9	0	100,00	0,00
H+Al	9	9	0	100,00	0,00
pH em H ₂ O	9	9	0	100,00	0,00
Matéria Orgânica	9	0	9	0,00	100,00
Fe	9	9	0	100,00	0,00
Zn	9	0	9	0,00	100,00
Cu	9	0	9	0,00	100,00
Mn	9	9	0	100,00	0,00
B	9	4	5	44,44	55,56
Na	9	5	4	55,56	44,44

Desta forma, dois gêneros de plantas destacaram-se por refletirem a composição química destes solos, que são as plantas dos gêneros *Hedychium* presentes nos pontos P2 e P4 com 72 e 74%, respectivamente, de correlação com os parâmetros do solo, e *Crotolaria* nos pontos P3, P5, P6 e P19.1 que correlacionou de 54 a 72%. Neste mesmo gênero, e em menor grau houve correlação em 45% com os parâmetros do solo no ponto P11.1 (Tabela 8). Ainda se tratando do gênero *Crotolaria*, é importante destacar que esta planta possui uma alta exigência de Fe, com seus níveis ótimos variando de 600 a 700 mg kg⁻¹ Fe, portanto em todos os pontos de coleta, exceto no ponto P19.1, as plantas deste gênero apresentaram com teores de Fe abaixo do nível crítico (Tabela 8).

Tabela 9. Quantidade (total ou porcentagem) dos nutrientes analisados (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu, Mn, B) que se apresentam em níveis adequados ou em níveis de deficiência em cada gênero de planta em cada ponto de coleta. Tipo de vegetação determinada para cada ponto. REG=Regeneração, RV=Revegetação e REC=Recuperação Agrícola.

Gênero das Plantas	Tipo de Vegetação	Total de Nutrientes Analisados	Total de Nutrientes Adequados	Total de Nutrientes em Deficiência	% Nutrientes Adequados	% Nutrientes em Deficiência
	REG	11	8	3	72,73	27,27
Cyperus (P2)						
	REG	11	3	8	27,27	72,73
Hedychium (P2)						
	RV	11	8	3	72,73	27,27
Calopognium (P3)						
	RV	11	3	8	27,27	72,73
Crotolaria (P3)						
	REG	11	5	6	45,45	54,55
Hedychium (P4)						
	REG	11	9	2	81,82	18,18
Brachiaria (P4)						
	RV	11	11	0	100,00	0,00
Calopognium (P5)						
	RV	11	5	6	45,45	54,55
Crotolaria (P5)						
	RV	11	11	0	100,00	0,00
Calopognium (P6)						
	RV	11	4	7	36,36	63,64
Crotolaria (P6)						
	RV	11	6	5	54,55	45,45
Crotolaria (P11.1)						
	RV	11	11	0	100,00	0,00
Calopognium (P11.1)						
	RV	11	10	1	90,91	9,09
Canavalia (P18)						
	RV	11	11	0	100,00	0,00
Calopognium (P18)						
	REG	11	8	3	72,73	27,27
Brachiaria (P19)						
	REG	11	8	3	72,73	27,27
Cyperus (P19)						
	REC	11	5	6	45,45	54,55
Crotolaria (P19.1)						
	REC	11	10	1	90,91	9,09
Ipomoea (P19.1)						

Tabela 10. Valores de referência utilizados para a classificação dos parâmetros químicos das amostras foliares das plantas analisadas de acordo com o livro Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (1999) e com o Software da INCAPER Recomendação de fertilizantes, calcário e gesso para as principais culturas do estado do Espírito Santo (2009).

Plantas	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Cu	Mn	B
	-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----				
	--						--				
Cyperus, Ipomoea e Calopognium	11,3- 15	0,8- 1,1	14,3- 18,4	4- 10,2	1,2- 2,2	1,1- 1,5	100- 150	20- 25	7- 10	80-100	15-20
Brachiaria	13-20	0,8 - 3	12-30	3-6	1,5- 4,0	0,8- 2,5	50- 250	20- 50	4- 12	40-250	10-25
Crotolaria	26	6	35	22	4	4	600- 700	25- 30	4-7	90-120	70-80
Canavalia	35	5	5	37	5	2	150- 200	15- 20	5-7	200- 150	60-70
Hydechium	33-48	2,5-7	33-50	6-15	2-7	2,5- 7	60- 200	20- 200	8- 50	35-200	20-75

Apesar dos solos nos pontos amostrais estarem com baixos níveis de nutrientes, algumas plantas foram capazes de obter alta taxa de absorção da maioria dos elementos, com destaque para os gêneros *Cyperus* e *Brachiaria*, nos pontos de regeneração natural P2, P4 e P19, apresentando de 72 a 81% dos nutrientes em níveis adequados (Tabela 8). Já nas áreas de revegetação destacam-se as plantas do gênero *Calopognium* nos pontos P3, P5, P6, P11.1 e P18, *Canavalia* no ponto P18 e *Ipomoea* no ponto P19.1, as quais tiveram de 72 a 100% dos nutrientes em níveis adequados (Tabela 8).

Em contrapartida, mesmo que tenham sido observados baixos teores de Cu nos solos de todos os pontos amostrais, 94% das plantas apresentaram teores de Cu em níveis adequados (Tabela 8), o que pode ser explicado pelos baixos valores dos níveis críticos deste elemento nessas plantas os quais variam

de 5 a 12 mg kg⁻¹, exceto para o gênero *Hedychium*, cujos valores variam de 8 a 50 mg kg⁻¹ (Tabela 9).

Algumas plantas apresentam tolerância aos ambientes com níveis elevados de metais, tornando-se capazes de crescerem e se desenvolverem sob essas condições (Taiz e Zeiger, 2017). As plantas da espécie *Canavalia*, *Calopogonium* e *Iponomea* (Tabela 5) apresentaram valores significativamente positivos na aquisição de nutrientes, sugerindo que estas são tolerantes e obtêm bons resultados em solos que sofreram com a deposição de rejeitos de mineração e que contêm em sua composição alto teor de metais pesados. Os níveis de presença de nutrientes da *Canavalia* (Tabela 6) coletados no ponto P18, variaram de médio a alto, sugerindo que esta espécie pode ser tolerante e capaz de crescer sob substratos salinos provenientes dos rejeitos de Mariana. Similarmente ao resultado obtido, Costa et al. (2018), ao avaliarem o crescimento da *Canavalia* (Feijão da praia) em substratos salinos, concluíram que esta obteve o crescimento igual à sua testemunha (controle).

6. CONCLUSÃO

As análises físicas e químicas realizadas nos solos nos pontos de coleta (P2, P3, P4, P5, P6, P11.1, P18, P19 e P19.1) demonstraram que os solos em questão apresentam teores baixos dos nutrientes analisados. Portanto, as plantas situadas nestas áreas refletem o estado destes solos, apresentando deficiência nutricional. Tais plantas são pertencentes aos gêneros *Hedychium* nos pontos P2 e P4 e *Crotolaria* nos pontos P3, P5, P6 e P19.1, as quais poderiam ser usadas como indicadoras ambientais dos solos analisados.

Ainda que os solos analisados estejam apresentando deficiência nutricional, alguns gêneros de plantas apresentaram uma nutrição adequada como é o caso dos gêneros *Cyperus* e *Brachiaria*, nos pontos P2, P4 e P19 (regeneração natural), *Calopognium* nos pontos P3, P5, P6, P11.1 e P18 (revegetação), *Canavalia* no ponto P18 (revegetação) e *Ipomoea* (recuperação agrícola).

Diversos fatores podem influenciar na capacidade de resposta das plantas analisadas em relação ao solo e à taxa de absorção de nutrientes, como a fisiologia e o tipo de necessidade nutricional dessas plantas, bem como a sua morfologia radicular. No entanto, vale ressaltar que o presente estudo não possui propriedade de fornecer respostas conclusivas sobre tais parâmetros, uma vez que as análises realizadas são apenas nutricionais. Para tal ação, seriam necessários estudos complementares que envolvessem as análises fisiológicas e morfológicas de cada espécie (e não só do gênero das plantas, como é informado nestas análises), a fim de promover a compreensão do melhor desempenho destas plantas nos solos analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdu, N., Abdullahi, A. A., & Abdulkadir, A. (2017). Heavy metals and soil microbes. *Environmental chemistry letters*, 15(1), 65-84.
- Alloway, B.J., (1995). *Heavy Metals in Soils*. London: Blackie Academic & Professional, p. 368.
- Alloway, B. J. (Ed.). (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*, 2019(1), 1-14.
- Ali, H., & Khan, E. (2018). What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'—proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & environmental chemistry*, 100(1), 6-19.

- ANA – Agência Nacional das Águas. (2015). Agência Nacional de Águas: Nota Especial Bacia do Rio Doce. Disponível em: http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/ckfinder/files/EncarteRioDoce_2016.pdf Accessed 28 Nov 2017. Acesso em: 04/11/2020.
- Appenroth, K. J. (2010). What are “heavy metals” in plant sciences? *Acta physiologiae plantarum*, 32(4), 615-619.
- Bánfalvi, G. (2011). Heavy metals, trace elements and their cellular effects. In Cellular effects of heavy metals. *Springer*, Dordrecht, p. 3-28.
- Barbieri, M. (2016). The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *Journal of geology and geophysics*, 5(1), 1-4.
- Bradl, H. B. (2004). Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of colloid and interface science*, 277(1), 1-18.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2009). Elementos da natureza e propriedades dos solos. *Bookman editora*.
- Bondada, B. R., Tu, S., & Ma, L. Q. (2004). Absorption of foliar-applied arsenic by the arsenic hyperaccumulating fern (*Pteris vittata* L.). *Science of the total environment*, 332(1-3), 61-70.
- Bosch, A. C., O'Neill, B., Sigge, G. O., Kerwath, S. E., & Hoffman, L. C. (2016). Heavy metals in marine fish meat and consumer health: a review. *Journal of the Science of food and agriculture*, 96(1), 32-48.
- Borba, R. P., Figueiredo, B. R., & Cavalcanti, J. A. (2004). Arsênio na água subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). *Revista Escola de Minas*, 57(1), 45-51.

- Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., de Campos, I. C., do Carmo, F. F., Silvino, G., ... & Pinto, C. E. F. (2017). Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in ecology and conservation*, 15(3), 145-151.
- Centeno, L. N., Guevara, M. D. F., Cecconello, S. T., de Sousa, R. O., & Timm, L. C. (2017). Textura do solo: Conceitos e aplicações em solos arenosos. *Revista brasileira de engenharia e sustentabilidade*, 4(1), 31-37.
- Chalkiadaki, O., Dassenakis, M., & Lydakis-Simantiris, N. (2014). Bioconcentration of Cd and Ni in various tissues of two marine bivalves living in different habitats and exposed to heavily polluted seawater. *Chemistry and ecology*, 30(8), 726-742.
- Donagemma, G. K., Freitas, P. L. D., Balieiro, F. D. C., Fontana, A., Spera, S. T., Lumbreras, J. F., ... & Bortolon, L. (2016). Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 51(9), 1003-1020.
- Costa, T., de Souza, F. A., Netto, D., de Almeida, L. G., Rocha, H., Viana, J., ... & Araújo, N. (2018). Estabelecimento de espécies arbóreo-arbustivas no rejeito de minério de ferro da barragem de Fundão em Mariana-MG, tratado com calcário, fertilizantes e microrganismos. *Embrapa milho e sorgo - boletim de pesquisa e desenvolvimento (INFOTECA-E)*.
- Dos Reis, D. A., Nascimento, L. P., de Abreu, A. T., Júnior, H. A. N., Roeser, H. M. P., & da Fonseca Santiago, A. (2020). Geochemical evaluation of bottom sediments affected by historic mining and the rupture of the Fundão dam, Brazil. *Environmental science and pollution research*, 27(4), 4365-4375.

- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. (1997). Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: *Embrapa Solos*, p. 212.
- Escobar, H. (2015). Mud tsunami wreaks ecological havoc in Brazil. *Science*, 350,1138-1139.
- Espindola, H. S., Ferreira, N. M., & Mifarreg, I. E. G. (2017). Território da mineração: uma contribuição teórica. *Revista brasileira de geografia*, 62(2), 67-93.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2006). Guidelines for Soil Description. *Food and agriculture organization of the United Nations*. Rome, 1-109.
- Freitas, C. M. D., Barcellos, C., Asmus, C. I. R. F., Silva, M. A. D., & Xavier, D. R. (2019). Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. *Cadernos de saúde pública*, 35(5), 1-7.
- Genestra, M. (2007). Oxy radicals, redox-sensitive signalling cascades and antioxidants. *Cellular signalling*, 19(9), 1807-1819.
- Hyder, O., Chung, M., Cosgrove, D., Herman, J. M., Li, Z., Firoozmand, A., ... & Pawlik, T. M. (2013). Cadmium exposure and liver disease among US adults. *Journal of gastrointestinal surgery*, 17(7), 1265-1273.
- IBAMA. (2015). Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Ministério do Meio Ambiente. Diretoria de Proteção Ambiental e DIPRO e Coordenação Geral de Emergências Ambientais - CGEMA. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, novembro de 2015. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf. Acesso em: 20/06/2018.

- IBAMA. (2019). Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2020/rompimento-da-barragem-de-fundao-documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg>. Acesso em: 03/11/2020.
- IBIO AGB Doce (2014) A bacia. Disponível em: <http://www.ibioagbdoce.org.br/a-bacia/>. Acesso em: 25/11/2020.
- Jackson, M. L (1965). *Soil chemical analysis*. Prentice Hall, p. 498.
- Jaishankar, M., Mathew, B. B., Shah, M. S., Murthy, T. P. K., & Gowda, K. R. S. (2014). Biosorption of few heavy metal ions using agricultural wastes. *Journal of environment pollution and human health*, 2(1), 1-6.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, BB, & Beeregowda, KN (2014). Toxicidade, mecanismo e efeitos na saúde de alguns metais pesados. *Toxicologia interdisciplinar*. 7 (2), 60-72.
- Kabata-Pendias, A. (2004). Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*, 122(2-4), 143-149.
- Krohling, C. A., Eutrópio, F. J., Bertolazi, A. A., Dobbss, L. B., Campostrini, E., Dias, T., & Ramos, A. C. (2016). Ecophysiology of iron homeostasis in plants. *Soil science and plant nutrition*, 62(1), 39-47.
- Lee, G., Bigham, J. M., & Faure, G. (2002). Removal of trace metals by coprecipitation with Fe, Al and Mn from natural waters contaminated with acid mine drainage in the Ducktown Mining District, Tennessee. *Applied geochemistry*, 17(5), 569-581.
- Lepp, N. W. (Ed.). (2012). *Effect of heavy metal pollution on plants: metals in the environment* (Vol. 2). Springer science & business media, 213-239.

- Maciel, L. L. F., de Freitas, W. R., Bull, E. S., Fernandes, C., Horn Jr, A., de Aquino Almeida, J. C., & Kanashiro, M. M. (2020). In vitro and in vivo anti-proliferative activity and ultrastructure investigations of a copper (II) complex toward human lung cancer cell NCI-H460. *Journal of inorganic biochemistry*, 210, 111166.
- Marschner, H. (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.
- Masindi, V., & Muedi, K. L. (2018). Environmental contamination by heavy metals. *Heavy metals*, 10, 115-132.
- Miranda, L. S., & Marques, A. C. (2016). Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna-an example from the staurozoans (Cnidaria). *Biota neotropica*, 16(2), 1-4.
- Mukke, V. K., & Chinte, D. N. (2012). Impact of heavy metal induced alterations in Lipase activity of fresh water crab, *Barytelphusa guerini*. *Journal of chemical and pharmaceutical research*, 4(5), 2763-2766.
- Musilova, J., Arvay, J., Vollmannova, A., Toth, T., & Tomas, J. (2016). Environmental contamination by heavy metals in region with previous mining activity. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 97(4), 569-575.
- Nagajyoti, PC, Lee, KD, & Sreekanth, TVM (2010). Metais pesados, ocorrência e toxicidade para plantas: uma revisão. *Cartas de química ambiental*, 8(3), 199-216.
- Naveedullah N, Hashmi MZ, Yu Ch, Shen H, Duan D, Shen Ch, Lou L, Chen Y (2013) Risk assessment of heavy metals pollution in agricultural soils of siling reservoir watershed in Zhejiang province, China. *Journal of biomedicine and biotechnology*, 2013, 1–10.

- Niazi, N. K., & Burton, E. D. (2016). Arsenic sorption to nanoparticulate mackinawite (FeS): an examination of phosphate competition. *Environmental pollution*, 218, 111-117.
- Peters, J.B. (2005). Wisconsin Procedures for Soil Testing, Plant Analysis and Feed & Forage Analysis: Plant Analysis. Department of Soil Science, 38 College of Agriculture and Life Sciences, University of Wisconsin Extension, Madison, WI.
- Pinto-Coelho, R.M. (2015) Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG). *Arquivos do Museu de história natural e jardim botânico*, 24, 16-43.
- Ramirez, R. (2013). The gastropod *Osilinus atrata* as a bioindicator of Cd, Cu, Pb and Zn contamination in the coastal waters of the Canary Islands. *Chemistry and ecology*, 29(3), 208-220.
- Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. Disponível em: http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770/relatorio_final_ft_03_02_2016_15h5min.pdf. Acesso em: 25/11/2020.
- Rezania, S., Taib, S. M., Din, M. F. M., Dahalan, F. A., & Kamyab, H. (2016). Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of hazardous materials*, 318, 587-599.
- SAMARCO. (2019). Rompimento de Fundão- Entenda o rompimento. Disponível em: <https://www.samarco.com/rompimento-de-fundao/>. Acesso em: 03/11/2020.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of hazardous materials*, 325, 36-58.

- Sherene, T. (2010). Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment. *Biological forum—an international journal*, 2, 112-121.
- SEDRU. (2016). Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. *Secretaria De Estado De Desenvolvimento*.
- Segura, F. R., Nunes, E. A., Paniz, F. P., Paulelli, A. C. C., Rodrigues, G. B., Braga, G. Ú. L., ... & Batista, B. L. (2016). Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental pollution*, 218, 813-825.
- Spiegel, H. (2002). Trace element accumulation in selected bioindicators exposed to emissions along the industrial facilities of Danube Lowland. *Turkish journal of chemistry*, 26(6), 815-824.
- Trugilho, W. S. (2018). *Avaliação da fertilidade de latossolos naturais ou contaminados por rejeito de minério de ferro*. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 71p.