

ANA CAROLINA MARTINS ROCHA

**EFEITOS DO REJEITO DE MINERAÇÃO DE LÍTIO E DO DÉFICIT HÍDRICO NO
CRESCIMENTO INICIAL E PARÂMETROS FOTOSSINTÉTICOS em *Dimorphandra
exaltata* Schott.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: João Paulo de Souza

**FLORESTAL- MINAS GERAIS
2023**

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

T

R672e
2023

Rocha, Ana Carolina Martins, 1992-
Efeito do rejeito de mineração de lítio e déficit hídrico no
crescimento inicial e parâmetros fotossintéticos em
Dimorphandra exaltata Schott / Ana Carolina Martins Rocha. –
Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (45 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexo.

Orientador: João Paulo de Souza.

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

Referências bibliográficas: f. 34-44.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.428>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Dimorphandra exaltata* - Crescimento - Efeito dos
fluoretos. 2. Fluoreto de lítio. 3. Biomassa vegetal.
4. Fluorescência. 5. Clorofila - Índices. I. Souza, João Paulo de,
1981-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Biologia Geral. Programa de Pós-Graduação em Ecologia.
III. Título.

CDD 22. ed. 583.74

ANA CAROLINA MARTINS ROCHA

**EFEITOS DO REJEITO DE MINERAÇÃO DE LÍTIO E DO DÉFICIT HÍDRICO NO
CRESCIMENTO INICIAL E PARÂMETROS FOTOSSINTÉTICOS em *Dimorphandra
exaltata* Schott.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 julho de 2023

Assentimento:

Ana Carolina Martins Rocha
Autor

João Paulo de Souza
Orientador

AGRADECIMENTOS

Ao meu Pai Celestial pela vida maravilhosa que Ele me dá, por todas as oportunidades e pelas pessoas tão especiais que me ajudaram a chegar até aqui;

Aos meus guias espirituais por segurarem minha mão em todos os momentos;

Aos meus pais, minha irmã e minha sobrinha, por me lembrarem do verdadeiro sentido do amor;

Aos meus amigos, pela paciência e consolo nos momentos certos;

Ao meu orientador João Paulo de Souza pela positividade, resiliência e paciência com minhas dificuldades;

À Universidade Federal de Viçosa, por ser meu lar e fonte de conhecimento, agradeço pela oportunidade de realizar a pós-graduação;

Às parceiras e aos parceiros, pela força e auxílio durante os trabalhos. Em especial aos colegas Gustavo Oliveira e Gabriela Brito, por me lembrarem que existem amizades dentro da pós-graduação. Agradeço o apoio, troca de conhecimento e ajuda nos trabalhos braçais;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo recurso financeiro deste projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos que me sustentou durante esta pesquisa.

À Companhia Brasileira de Lítio (CBL) pela recepção da UFV em seus domínios, e pela disponibilização do silicato de alumínio que possibilitaram este estudo.

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

Infinidamente grata.

"O estudo, a busca da verdade e da beleza são domínios em
que nos é consentido sermos crianças por toda a vida."

(Albert Einstein)

RESUMO

ROCHA, Ana Carolina Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, 27 de julho de 2023. **Efeito do rejeito de mineração de lítio e déficit hídrico no crescimento inicial e parâmetros fotossintéticos em *Dimorphandra exaltata* Schott.** Orientador: João Paulo de Souza.

A mineração é essencial para o desenvolvimento de um país, mas a atividade ocasiona inúmeros impactos negativos ao meio ambiente, como a supressão da flora nativa e perdas no funcionamento dos serviços ecossistêmicos. Tendo em vista que a disponibilidade hídrica é um dos principais fatores causadores de estresse nas plantas, o estudo das respostas vegetais quando submetidas ao mesmo pode fornecer informações sobre mecanismos adaptativos das plantas. O objetivo do presente trabalho foi o de investigar os efeitos do rejeito de mineração de lítio (RML) e do déficit hídrico sobre o crescimento inicial, morfologia e parâmetros fotossintéticos em *Dimorphandra exaltata* Schott, uma espécie ameaçada de extinção. Foram utilizados 24 vasos para plantio, 12 destes foram preenchidos com RML e 12 com solo. Após 190 dias do início do experimento, as plantas foram subdivididas em quatro grupos devido ao déficit hídrico em: solo \times déficit hídrico, solo \times irrigação diária, RML \times déficit hídrico e RML \times irrigação diária. As plantas foram mantidas nessas condições por 50 dias. Foram realizadas análises físico-químicas dos substratos, avaliação de parâmetros de crescimento das plantas, produção de biomassa, teor de clorofila e fluorescência da clorofila *a*. Plantas em RML apresentaram menores índices de clorofila, taxa de transporte de elétrons, eficiência fotoquímica potencial do fotossistema II e menor comprimento radicular. O déficit hídrico promoveu maior altura do caule e maior alocação de biomassa para as raízes, porém menor número de folhas. Em ambos os substratos, as plantas cultivadas sob déficit hídrico apresentaram maior massa seca de caule do que as plantas irrigadas diariamente. As plantas no solo, em ambos os tratamentos hídricos, apresentaram maior massa seca da raiz e massa seca total do que as plantas no RML em déficit hídrico. A menor alocação de biomassa para as raízes resultou em menor razão raiz/parte aérea nas plantas em RML sob déficit hídrico. Nossos resultados demonstram que plantas jovens de *D. exaltata* apresentaram menor alocação de biomassa para o sistema radicular, principalmente sob déficit hídrico. Assim, mesmo com área foliar semelhante (plantas no solo e no RML), as plantas no RML não conseguem realizar fotossíntese nos mesmos níveis do que as plantas no solo, o que resulta em menor produção de matéria seca. Nossos resultados indicam que a espécie estudada não seja indicada para a recuperação de áreas degradadas, notadamente pela alta mortalidade e

crescimento lento.

Palavras-chave: Biomassa. Crescimento. Fluorescência da clorofila *a*. Índice de clorofila.

ABSTRACT

ROCHA, Ana Carolina Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 27, 2023.
Effect of lithium mining tailings and water deficit on initial growth and photosynthetic parameters in *Dimorphandra exaltata* Schott. Adviser: João Paulo de Souza.

Mining is essential for a country's development, but the activity causes numerous negative impacts on the environment, such as the suppression of native flora and losses in the functioning of ecosystem services. Bearing in mind that water availability is one of the main factors causing stress in plants, studying plant responses when subjected to it can provide information on plant adaptive mechanisms. The aim of this study was to investigate the effects of lithium mining tailings (LMT) and water deficit on the initial growth, morphology and photosynthetic parameters of *Dimorphandra exaltata* Schott, an endangered species. Twenty-four pots were used for planting, 12 of which were filled with LMT and 12 with soil. After 190 days from the start of the experiment, the plants were subdivided into four groups due to water deficit: soil × water deficit, soil × daily irrigation, LMT × water deficit and LMT × daily irrigation. The plants were kept in these conditions for 50 days. Physico-chemical analysis of the substrates, evaluation of plant growth parameters, biomass production, chlorophyll content and chlorophyll a fluorescence were carried out. Plants in LMT showed lower chlorophyll indices, electron transport rate, photochemical potential efficiency of photosystem II and shorter root length. Water deficit led to greater stem height and greater allocation of biomass to the roots, but fewer leaves. In both substrates, the plants grown under water deficit had greater stem dry mass than the plants irrigated daily. The plants in soil, in both water treatments, had greater root dry mass and total dry mass than the plants in LMT under water deficit. The lower allocation of biomass to the roots resulted in a lower root/shoot ratio in plants in LMT under water deficit. Our results show that young *D. exaltata* plants have less biomass allocated to the root system, especially under water deficit. Thus, even with similar leaf area (plants on the ground and in the LMT), the plants in the LMT are unable to carry out photosynthesis at the same levels as the plants on the ground, which results in lower dry matter production. Our results indicate that the species studied is not suitable for restoring degraded areas, particularly due to its high mortality and slow growth.

Keywords: Biomass. Growth. Chlorophyll *a* fluorescence. Chlorophyll index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Precipitação e temperaturas médias do município de Florestal, Minas Gerais15

Figura 2: Índices de clorofilas *a*, *b* e total em plantas de *Dimorphandra exaltata* em solo (barras pretas) e em rejeito de mineração de lítio (RML, barras brancas). As barras representam as médias e as linhas acima dos gráficos o desvio padrão. Letras maiúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos23

Figura 3: Eficiência fotoquímica efetiva do FSII (A), taxa de transporte de elétrons (B) e eficiência fotoquímica potencial do FS II (C e D) dos indivíduos de *Dimorphandra exaltata* em solo (barras pretas) e em rejeito de mineração de lítio (barras brancas). Letras maiúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos. Letras minúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes regimes hídricos24

Figura 4: Morfometria vegetativa ao longo do tempo em *Dimorphandra exaltata*, crescendo em distintos substratos (solo vs RML) e regimes hídricos (irrigadas vs déficit hídrico). Legenda: ● = solo e irrigação diária até os 190 dias; ○= rejeito de mineração de lítio e irrigação diária até os 190 dias; ▼= solo sob irrigação diária; ■= solo sob déficit hídrico; Δ= rejeito de mineração de lítio sob irrigação diária; e □= rejeito de mineração de lítio sob déficit hídrico. As letras diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos (substrato e regime hídrico)..... 26

Figura 5: Comprimento da raiz (A) dos indivíduos de *Dimorphandra exaltata* crescendo em solo (barras pretas) e em RML (barras brancas), sob déficit hídrico ou irrigação diária. Letras maiúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos. Letras minúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes regimes hídricos27

Figura 6: Comprimento das raízes de *D. exaltata* sob déficit hídrico. À esquerda planta cultivada em RML e à direita planta cultivada em solo27

Figura 7: Produção de MSC (A), MST (B), MSR (C) e RRPA (D) de *D. exaltata* cultivada em diferentes níveis de disponibilidade hídrica (irrigação e déficit hídrico). A figura A compara plantas de *Dimorphandra exaltata* sob déficit hídrico (barra preta) e irrigação diária (barra branca); as figuras B, C e D comparam plantas de *Dimorphandra exaltata* em solo (barras pretas) e em RML (barras brancas). Letras maiúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos. Letras minúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes regimes hídricos..... 28

Figura 8: Plantas de *D. exalata* aos 239 dias de experimento. Plantas em RML com irrigação controle (A), plantas em solo normal com irrigação controle (B), plantas em RML sob déficit hídrico (C) e plantas em solo normal sob déficit hídrico (D) 29

Figura 9: Conteúdo de água no substrato (CAS) de indivíduos de *Dimorphandra exaltata* crescendo em solo (barras pretas) e em rejeito de lítio (barras brancas), sob déficit hídrico ou irrigadas diariamente. Letras maiúsculas acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos. Letras minúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes regimes hídricos 30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultado da análise físico-química dos substratos utilizados para o experimento, solo e rejeito de mineração de lítio. pH: potencial hidrogeniônico em H₂O; H + AL: acidez potencial; SB: soma de bases, N: nitrogênio, P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, C: carbono, Na: sódio, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, Zn: zinco, Al: alumínio, B: boro, CTC: capacidade de troca catiônica, MO = matéria orgânica, Li: lítio.

..... 21

Tabela S1: Variáveis morfofisiológicas medidas nas plantas de *Dimorphandra exaltata* crescendo no solo e em rejeito da mineração de lítio, irrigadas ou sob déficit hídrico que não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) ANEXO

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS | 15 |
| Local de estudo e material vegetal | 15 |
| Delineamento experimental | 15 |
| Índices de clorofila e fluorescência da clorofila a | 17 |
| Morfometria vegetativa | 18 |
| Determinação da massa seca | 18 |
| Conteúdo de água no solo e na folha | 19 |
| Análises estatísticas | 20 |
| 3 RESULTADOS | 20 |
| Análise físico-química dos substratos | 20 |
| Índice de clorofila e fluorescência da clorofila a | 22 |
| Morfometria vegetativa | 25 |
| Massa seca | 28 |
| Conteúdo de água no solo e na folha | 29 |
| 4 DISCUSSÃO | 30 |
| 5 REFERÊNCIAS | 34 |
| 6 APÊNDICE A | 45 |

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma fonte de poluição ambiental devido à produção de rejeitos que apresentam metais pesados a partir do processamento das rochas (Mensah et al. 2015; Prasetya et al., 2022). O impacto das atividades da mineração no ambiente terrestre resultam na diminuição da cobertura verde, contaminação do solo, redução da quantidade e qualidade dos recursos hídricos e perda parcial ou total da fauna e flora (Ramos, 2005; Santos, 2017). As alterações citadas podem resultar em uma redução da capacidade de ajustamento das plantas a essas novas condições ambientais (Pires et al., 2003). Análises de solos em áreas de mineração no Irã registraram contaminação extrema com metais pesados (Cd, Pb, Cu e Zn), o que pode acarretar drenagem ácida, contaminação de solos e aquíferos, bem como a incorporação desses elementos na cadeia trófica (Tahmasebi et al., 2020; Silva et al., 2004). Os rejeitos da mineração, em sua maior parte, possuem elevado teor de metais solubilizados, poucos nutrientes e, por conseguinte, baixa atividade microbiana (Tahmasebi et al., 2020). Cruz et al. (2020), registraram que a limitação do crescimento das plantas sobre os rejeitos é devido à falta de nutrientes para o desenvolvimento nesse substrato. Esses resultados corroboram os obtidos por Segura et al. (2016), onde os rejeitos de mineração analisados foram quimicamente mais pobres e menos férteis do que os solos sem atividades de mineração.

Nos últimos vinte anos, o interesse econômico pelo lítio foi desencadeado por sua utilização em inovações tecnológicas (Dorn & Gundermann, 2022). Apesar da exploração mineral de lítio não gerar cavas (áreas abertas para extração do minério), sua mineração gera rejeito, e seu principal componente é o silicato de alumínio. De acordo com dados cedidos pela Companhia Brasileira de Lítio (CBL), a composição química do silicato de alumínio é formada principalmente por sílica (SiO₂), 65%. A análise físico-química completa do rejeito inclui principalmente óxidos (óxido de alumínio com 25%, óxido de lítio em 1,2%, óxido de ferro e óxido de sódio em 0,8%). Ao serem absorvidos pelas plantas estes elementos, lítio, ferro e sódio, podem desencadear respostas fisiológicas e alterações em níveis estruturais e ultraestruturais (Wójcik et al., 2005). Pesquisas com plantas cultivadas em substratos com alta concentração de metais mostram que, entre as alterações mais importantes estão os danos aos lipídeos de membrana, proteínas, pigmentos e ácidos nucleicos, que se expressam na redução do crescimento e em alterações morfológicas (Marques et al. 2000, Lux et al. 2004).

Pesquisas sobre os efeitos do lítio sobre o desenvolvimento de espécies vegetais ainda são escassas, mas dados sobre a presença de outros metais no solo demonstram sua influência

sobre o desenvolvimento vegetal. Os danos devido aos metais, como a redução da região meristemática da raiz e do comprimento e diâmetro dos elementos de vasos no xilema, assim como danos ao aparato fotossintético podem ocasionar a morte dos organismos que crescem nesses substratos (Lux et al., 2004). Sridhar et al. (2005), observaram redução no tamanho das células do parênquima paliçádico e da epiderme foliar de *Brassica juncea* (L.) cultivadas em solo contaminado com Zinco (Zn) e Cádmiio (Cd). No estudo de Wójcik et al. (2005), a contaminação do solo por Cd resultou na formação de espaços intercelulares no córtex radicular de *Thlaspi caerulescens* L., em consequência da degeneração de células e morte celular. Estudos com rejeito de minério de ferro demonstraram que o substrato interferiu no crescimento de três espécies florestais nativas da Mata Atlântica, da família Bignoniaceae (*Cybistax antisyphilitica* (Mart.), *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) e *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC)). As plantas cultivadas em rejeito reduziram o comprimento da parte aérea, o teor de clorofila e sua área foliar (Cruz et al., 2020). Plantas jovens de *Chloris gayana* (Kunth), na África do Sul, crescendo sobre rejeitos de mineração de ferro, reduziram o crescimento inicial, tanto da parte aérea quanto da radicular (Lukashe et al., 2020). Enquanto plantas de *Vetiveria zizanioides* (L.) reduziram a produção de biomassa, o potencial hídrico foliar, os índices de clorofila e fotossíntese quando foram cultivadas em solos contaminados com metais (Pang et al. 2003).

Sabendo-se das limitações impostas pelas características das áreas de mineração e seus depósitos de rejeitos, é necessária a busca por espécies tolerantes às condições impostas pelos ambientes degradados (Wong, 2003). Além de sua sobrevivência, tais espécies devem se estabelecer e reproduzir, para então permitir a sucessão ecológica e contribuir para a fertilidade do solo e redução do potencial poluidor (Singh et al., 2002). Estudos demonstraram que as famílias de plantas mais utilizadas nesse processo são Poaceae, Cyperaceae e Fabacea (Mendes Filho et al., 2010; Garcia et al., 2016; Ferreira et al., 2012), pois as espécies dessas famílias, devido ao curto ciclo de vida e à capacidade de troca de cátions (CTC) toleram altas concentrações de metais pesados (Jacobi et al, 2008). Uma das estratégias de reabilitação de solos contaminados com metais pesados e, assim, possibilitar o retorno da funcionalidade e estabilidade do ecossistema, é a fitorremediação (Greipsson, 2011). A fitorremediação em áreas de mineração é uma atividade para proteção ambiental e manejo dos ecossistemas para as gerações futuras (Glick, 2010). A técnica consiste na utilização de plantas que retiram do solo os contaminantes (Pollard et al., 2002; Li et. al., 2003; Macnair, 2003; Behmer et al., 2005; Greipsson, 2011).

No nordeste de Minas Gerais, onde existem áreas de mineração de lítio, há uma zona

predominante de Floresta Atlântica (Myers et al., 2000). Dentro do gênero *Dimorphandra*, existem espécies como *Dimorphandra exaltata* Schott (Silva, 1986) (Muniz et al., 2020), que é endêmica de Mata Atlântica (Fernandez et al., 2021). *Dimorphandra exaltata* é uma espécie ameaçada de extinção, de acordo com a Portaria MMA Nº 148, de 7 de junho de 2022 (Brasil, 2022) apresentando reduzido número de indivíduos na natureza. Segundo Muniz et al. (2019), essa espécie apresenta baixa variabilidade genética, estando em risco de declínio populacional em sua área de ocorrência. A espécie acima, é nativa do bioma onde ocorre a extração do mineral, e o entendimento dos efeitos do rejeito de mineração de lítio sobre espécies vegetais endêmicas é pertinente e colaborativo com as futuras ações de fitorremediação e reflorestamento. Devido ao risco de extinção, *D. exaltata* pode ser mais prejudicada devido à perturbações ambientais, como os efeitos do rejeito de mineração e contaminação com metais devido às atividades mineradoras.

As espécies vegetais são frequentemente expostas a condições de múltiplos fatores estressores, que podem limitar seu crescimento e desenvolvimento, comprometendo sua sobrevivência (Freitas, 2018). Dessa forma, evidencia-se a necessidade de compreender as mudanças nos processos fisiológicos e de crescimento vegetativo provocadas pelas características do substrato e disponibilidade hídrica, para auxiliar na recuperação de áreas degradadas pela mineração de lítio (Souza, 2004). O fator limitante no uso de espécies vegetais tolerantes a substratos contaminados por rejeitos de mineração ainda é o reduzido número de pesquisas, o que dificulta a identificação de espécies eficazes na fitorremediação (Silva et al., 2019). Com o avanço da mineração e conseqüente degradação dos ecossistemas do entorno, estudos que contemplem as respostas ecofisiológicas de espécies vegetais aos substratos contaminados são importantes para o processo de recuperação de áreas degradadas.

O objetivo do presente trabalho foi o de investigar os efeitos do rejeito de mineração de lítio (RML) e do déficit hídrico sobre o crescimento inicial, morfologia e fisiologia de *D. exaltata*, uma espécie arbórea em risco de extinção nativa da Mata Atlântica. Tendo em vista que os rejeitos de mineração apresentam baixa disponibilidade nutricional, nossa hipótese inicial é de que plantas jovens de *Dimorphandra exaltata* crescendo sobre RML apresentarão diminuição de seu crescimento vegetativo (parte aérea e subterrânea), menor conteúdo de clorofilas (*a* e *b*) e menor eficiência fotoquímica do fotossistema II (FSII) do que às plantas crescendo em solo normal (sem impacto da mineração). Em adição, devido ao RML apresentar diferente capacidade de retenção hídrica, esperamos que plantas de *D. exaltata* crescendo em RML e com restrição hídrica apresentem uma diminuição mais severa do crescimento e fotossíntese, devido ao sinergismo entre o RML e disponibilidade hídrica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

LOCAL DE ESTUDO E MATERIAL VEGETAL

O experimento foi conduzido em módulos de câmaras de topo aberto e na casa de vegetação, na área externa da Casa da Biologia (IBF), no *campus* Florestal da Universidade Federal de Viçosa – UFV (19°52'35.0"S e 44°24'49.1"O), Minas Gerais, Brasil. O município de Florestal apresenta épocas mais chuvosas entre os meses de novembro e março, e secas entre os meses de abril e outubro, com variação de temperaturas mínima de 12 °C à máxima de 30 °C (Figura 1) (CLIMATEMPO, 2023).

Dimorphandra é um gênero neotropical, ocorrendo na Bolívia, Brasil, Colômbia, Guianas, Paraguai, Peru e Venezuela (Lewis *et al.*, 2005; Matos, 2015), pertencente à família Fabaceae e apresentando espécies com distribuição na Mata Atlântica, como *D. exaltata*. Esse domínio fitogeográfico representativo é classificado como *hotspot* da biodiversidade (Mittermeier *et al.*, 2004; Myers *et al.* 2000), devido à sua grande biodiversidade estar sob pressão antrópica.

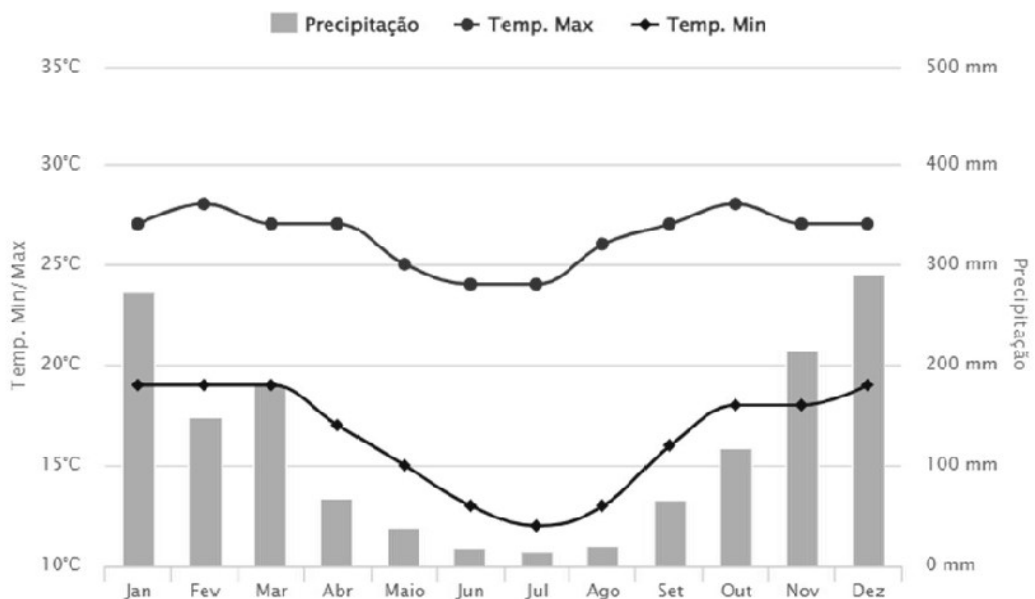


Figura 1: Precipitação e temperaturas médias do município de Florestal, Minas Gerais.

DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ecologia Funcional de Plantas (LEFuP) localizado no *can pus* Florestal da Universidade Federal de Viçosa (MG), com início

no mês de maio de 2022. As sementes de *D. exaltata* utilizadas foram coletadas nas Fazendas do Nativo e Boa Esperança, no município de Florestal na estação reprodutiva de 2021, e estocadas no LEFuP. A produção de plântulas foi realizada a partir de 72 sementes selecionadas de *D. exaltata*, escarificadas mecanicamente com lixa d'água do lado oposto ao hilo (Oliveira et al., 2004). O experimento foi inteiramente casualizado com dois tratamentos (solo e rejeito) e 12 repetições por 120 dias com irrigação normal, sendo que cada parcela foi composta por um vaso com três plantas. Foram utilizados 24 vasos para plantio, 12 destes foram preenchidos com rejeito de mineração de lítio (RML) e 12 com solo. Amostras dos substratos, em três réplicas, foram enviadas para análise na empresa Soloquímica Análises de Solo Ltda (Tabela 1), para determinação da granulometria e composição química. As sementes foram semeadas diretamente nos vasos (três sementes por vaso) com capacidade de 10 l, perfurados para drenagem e preenchidos com 12,5 quilogramas. Os vasos com as sementes foram colocados dentro de oito módulos abertos de câmaras de topo aberto (CTAs), sendo seis vasos em cada CTA. Para eliminar o possível efeito das CTAs, os vasos foram rotacionados bimestralmente entre as CTAs. A emergência e o desenvolvimento foram avaliados diariamente e a emergência do epicótilo foi o critério de constatação da germinação. Ao fim de 60 dias, os vasos foram desbastados, restando uma planta por unidade amostral. Após 190 após do início do experimento (DAE), as plantas foram novamente divididas para investigação dos efeitos do déficit hídrico nos distintos substratos (solo x RML). Assim, as plantas foram divididas aleatoriamente em quatro grupos: solo × déficit hídrico, solo × irrigação diária, RML × déficit hídrico e RML × irrigação diária.

Ao fim do período de irrigação normal e início do experimento de déficit hídrico (189 DAE), as plantas restantes no experimento totalizaram 12 em solo e 7 em RML. O experimento de déficit hídrico foi então conduzido com 6 plantas em solo × déficit hídrico, 6 plantas em solo × irrigação diária, 4 plantas em RML × déficit hídrico e 3 plantas em RML × irrigação diária.

O ciclo de suspensão de irrigação foi realizado da seguinte forma: após o primeiro dia com irrigação, as plantas passaram por um dia sem irrigação. Essas plantas foram irrigadas novamente no terceiro dia após o início do ciclo; após essa irrigação, passaram por mais dois dias sem irrigação e assim aumentando a restrição hídrica sucessivamente, até serem observados sinais claros de estresse hídrico, como murcha das folhas. As plantas permaneceram em ciclo de suspensão de rega por 50 dias.

ÍNDICE DE CLOROFILA E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A

Os índices de clorofila *a*, *b* e total foram medidos em 19 indivíduos de *Dimorphandra exaltata*, 12 em solo comum e 7 em RML, em duas folhas por planta aos 118 dias após o início do experimento. Ao final do experimento (239 DAE), a medição dos índices de clorofila foi repetida nas mesmas plantas, sendo 6 plantas em solo × déficit hídrico, 6 plantas em solo × irrigação diária, 4 plantas em RML × déficit hídrico e 3 plantas em RML × irrigação diária. Foram selecionadas para as medições as folhas totalmente expandidas e sem danos ou sinais de senescência. Os índices de clorofila foram medidos pelo medidor portátil ClorofiLOG (FALKER, CFL1030), entre 7h e 11h da manhã.

A fluorescência da clorofila *a* foi medida aos 118 dias, em duas folhas por planta (mesmas plantas usadas para medir o índice de clorofila). A segunda medida, nas mesmas plantas, foi feita ao final do experimento, aos 239 DAE, em 6 plantas em solo × déficit hídrico, 6 plantas em solo × irrigação diária, 4 plantas em RML × déficit hídrico e 3 plantas em RML × irrigação diária. Foram selecionadas para as medições as folhas totalmente expandidas e sem danos ou sinais de senescência. As medidas das variáveis de fluorescência da clorofila *a* foram realizadas entre 7h e 11h, com o auxílio de um fluorômetro portátil que realiza medição baseada na fluorometria modulada por pulso, chamado PAR-FluorPen FP 110. Os folíolos utilizados foram aclimatados ao escuro por um período de 30 minutos com auxílio de uma pinça de plástico colocada na região central desses folíolos. Inicialmente foi feita a medição do nível mínimo de fluorescência (F_0) durante o período de escuro ($1 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2}\text{s}^{-1}$). O primeiro flash de saturação após adaptação ao escuro mede a fluorescência máxima no estado adaptado ao escuro, por um pulso de luz saturante, de $1200 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (F_m). Com esses resultados pode-se calcular a eficiência fotoquímica potencial do fotossistema II ($F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$). Para as medições dos par\u00e2metros no claro, nas mesmas folhas, ocorre a exposi\u00e7\u00e3o por 40 segundos \u00e0 radia\u00e7\u00e3o fotossinteticamente ativa (PAR) de $1200 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2}\text{s}^{-1}$, para determina\u00e7\u00e3o das vari\u00e1veis: F (fluoresc\u00eancia em *steadystate*, antes do pulso de luz saturante), F_m' (fluoresc\u00eancia m\u00e1xima aclimatado a luz) (Oxborough K., Baker NR, 1997), efici\u00eancia efetiva do fotossistema II ($\Phi_{\text{FSII}} = (F_m' - F)/F_m'$), coeficiente de extin\u00e7\u00e3o n\u00e3o fotoqu\u00edmica da fluoresc\u00eancia (NPQ) ($F_m - F_m'/F_m'$) e taxa de transporte de el\u00e9trons do fotossistema II (TTE) = $\Phi_{\text{FSII}} \times \text{PAR} \times 0,5 \times I_A$, onde 0,5 \u00e9 a propor\u00e7\u00e3o de f\u00f3tons destinados aos dois fotossistemas e I_A \u00e9 a absorv\u00eancia foliar.

MORFOMETRIA VEGETATIVA

O número de folhas, tempo de vida foliar, desenvolvimento foliar, comprimento (cm) e o diâmetro do caule (cm) foram acompanhados semanalmente por todo o período do experimento em todos os tratamentos, totalizando 30 semanas. As folhas foram marcadas antes de sua abertura para a determinação do tempo de expansão foliar (TEF, dias), velocidade de expansão foliar (VEF, $\text{cm}^2 \text{dias}^{-1}$) e o tempo de vida foliar (TVF, dias). Para a quantificação da expansão foliar foram acompanhados os protófilos em *Dimorphandra exaltata*. Em cada tratamento foram acompanhadas semanalmente três folhas por planta, em todas as plantas nos distintos substratos (RML - n= 7, solo - n=12 indivíduos). O intervalo de expansão foliar (IEF) foi determinado depois de cessado o crescimento foliar. Semanalmente o comprimento e a maior largura de cada folha foram determinados com régua milimetrada. Quando as folhas apresentavam o crescimento estabilizado por no mínimo três semanas, foi determinado o IEF (dias). A área foliar estimada (AFE), em cm^2 , foi o resultado do produto entre a largura e o comprimento de cada folha. A velocidade média de expansão foliar (VEF, AFE dividida por TEF, $\text{cm}^2 \text{dia}^{-1}$), foi obtida pela razão entre a área foliar estimada e o tempo em que ocorreu a expansão máxima (IEF), em dias. O final do tempo de vida foliar (TVF) foi considerado quando a folha sofreu abscisão natural da planta.

DETERMINAÇÃO DA MASSA SECA

Após finalizadas as avaliações fisiológicas, 19 indivíduos de *Dimorphandra exaltata*, 12 em solo comum e 7 em RML, sendo 6 em solo com déficit hídrico, 6 em solo com irrigação diária, 4 em RML sob déficit hídrico e 3 em RML com irrigação diária. Foram utilizados em análises destrutivas a fim de quantificar a produção de biomassa relacionada ao crescimento inicial, aos 240 dias. Todas as folhas dos indivíduos foram retiradas à base do pecíolo e, após contagem foram digitalizadas em escaner de mesa, em preto e branco. Após a digitalização das imagens, as folhas foram examinadas no programa ImagePro® Plus (versão 4.5, Media Cybernetics, Silver Spring, EUA), para a determinação da área foliar (AF). Posteriormente as plantas foram retiradas dos vasos e as raízes foram limpas delicadamente em água corrente. O comprimento do caule (CC) foi medido com uma régua milimetrada, da base do caule até o meristema apical e o comprimento da raiz principal (CR) da base do caule até a ponta da raiz principal. O diâmetro do caule (DC) foi determinado na base, com o uso de paquímetro digital milimetrado. As plantas foram segmentadas em raiz, caule e folhas e

dispostas em estufa a 65 °C por 48 horas (Duarte et al., 2018). Após esse período, a matéria seca das folhas (MSF), caule (MSC), raízes (MSR) e total (MST) foram determinadas em balança analítica de calibração interna (balança Shimadzu Corporation, modelo AY220). Com os dados de massa seca e área foliar foram calculados a área foliar específica ($AFE=AF/MSF$, cm^2g^{-1}), índice de área foliar ($IAF=AFT1 + AFT2/0,5$ sem unidade), razão área foliar ($RAF=AFT/MST$, $cm^2 g^{-1}$) e razão raiz parte aérea ($RRPA= MSR/MSC$).

CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO E NA FOLHA

Para medição do teor de água no solo, ao fim dos 50 dias sob déficit hídrico, em cada tratamento, amostras de solo e do RML foram coletadas na profundidade de 0–15 cm, para a determinação da umidade com base em massa (Freitas et al., 2013; EMBRAPA 1997). A cobertura superficial do substrato foi retirada e foi feita uma coleta por unidade amostral (vaso). A coleta do substrato (solo e RML) foi feita com cilindros de PVC, a partir da superfície do solo até 15 centímetros de profundidade. Após a coleta, o peso úmido dos substratos foi determinado em balança analítica de calibração interna (balança Shimadzu Corporation, modelo AY220). As amostras foram embaladas em papel pardo e seco em estufa a 65 °C por 72 horas. Os valores do substrato seco (MS, amostra seca) e úmido foram utilizados para obtenção do conteúdo de água no substrato pela fórmula: umidade gravimétrica (g/g) = (massa úmida – massa seca)/massa úmida.

Para mensuração do conteúdo relativo de água na folha (CRA) foram retiradas uma folha de *D. exaltata*, nos quatro tratamentos: 6 em solo com déficit hídrico, 6 em solo com irrigação diária, 4 em RML sob déficit hídrico e 3 em RML com irrigação diária. O CRA foi determinado após o fim dos 50 dias do tratamento com déficit hídrico e foi obtido usando a relação entre a diferença de peso fresco e seco com a diferença de peso túrgido e seco. O peso fresco foi medido imediatamente após retirada das folhas do pecíolo. Para a aferição do peso túrgido, as folhas foram colocadas para hidratação em submersão em água por 24 horas sob refrigeração (5 °C). Após esse período o excesso de água foi removido da superfície das folhas com papel toalha. O peso seco foi determinado após as folhas serem secas em estufa, à 60 °C por um período de 24 horas (Smart & Bingham, 1974). O conteúdo de água nas folhas foi calculado pela seguinte fórmula: $CRA= (PF-PS/PT-PS)*100$. Em que PF (g) é o peso fresco, PS (g) é o peso seco após 24 horas na estufa a 60 °C e PT (g) é o peso túrgido.

ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foram calculados as médias e o desvio padrão para todas as variáveis morfológicas e fisiológicas. As médias dos dois tratamentos (RML vs solo) foram comparados pelo teste *t* de Student para verificação das diferenças nas plantas nos dois substratos. Os dados foram testados quanto à normalidade através do teste de Shapiro-Wilk e quanto à homogeneidade de variâncias através do teste de Levene. Os conjuntos de dados que não apresentaram distribuição normal foram transformados em logaritmo base 10.

O delineamento experimental das medidas morfométricas até 190 DAE, foi inteiramente casualizado com medidas repetidas com um fator (substrato) e dois níveis (solo × RML). Para as medidas fisiológicas, número de folhas, comprimento (cm) e o diâmetro do caule (cm) o teste *t* de Student foi utilizado para a primeira medida, aos 118 DAE, com um fator (substrato) e dois níveis (solo × RML). De 190 DAE aos 240 DAE, para as medidas fisiológicas, número de folhas, comprimento (cm) e o diâmetro do caule (cm), o delineamento experimental foi analisado com uma ANOVA modelos mistos de dois fatores (substrato e irrigação) e dois níveis em cada fator (Substrato: solo × rejeito de mineração de lítio; e Irrigação: irrigadas × déficit hídrico).

Para investigar as possíveis diferenças nas medidas de área foliar total (AFT), velocidade média de expansão foliar (VEF), área foliar média (AFM), massa seca foliar (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), índice de área foliar (IAF), razão área foliar (RAF), área foliar específica (AFE), razão raiz parte aérea (RRPA), conteúdo de água na folha, teor de água no solo e segunda medição fisiológica utilizou-se a ANOVA de duas vias, com dois fatores (substrato e regime hídrico). O programa R (R CORE TEAM, 2018) foi utilizado para as análises estatísticas. Os gráficos foram feitos de acordo com o resultado da análise estatística usando o programa SigmaPlot (versão 12.0).

3 RESULTADOS

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DOS SUBSTRATOS

O rejeito de mineração de lítio (RML) apresentou maiores valores de pH, o caracterizando como solo alcalino. O RML apresentou taxas de acidez (H +Al), matéria orgânica (MO), fósforo (P) e fósforo remanescente, cobre (Cu), potássio (K), alumínio (Al) e ferro (Fe) abaixo dos níveis considerados padrões para o desenvolvimento vegetal, de acordo

com o padrão de culturas agronômicas (Tabela 1) (Lopes, 1999 & Ribeiro et al., 1999). Os resultados da soma das bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn) e enxofre (S) apresentaram taxas maiores do que os padrões médios no RML, quando comparados com os valores padrão (Tabela 1) (Lopes, 1999 & Ribeiro et al., 1999).

Tabela 1. Resultado da análise físico-química dos substratos utilizados para o experimento, solo e rejeito de mineração de lítio (pH: potencial hidrogeniônico em H₂O; H + Al: acidez potencial; SB: soma de bases, N: nitrogênio, P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, C: carbono, Na: sódio, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, Zn: zinco, Al: alumínio, B: boro, CTC: capacidade de troca catiônica, MO = matéria orgânica, Li: lítio)

| Composição química | Substrato | | |
|------------------------------|--|---------------|---|
| | Rejeito de mineração de lítio Média | Solo Média | Intervalo de concentração de padronização agrônômico* |
| pH em H ₂ O | 7,70 | 5,10 | - |
| Acidez (H+Al) (cmolc/dmt) | 1,50 | 4,00 | 2,5 - 5,0 cmolc/dm ³ |
| SB (cmolc/dm ³) | 130,43 | 2,23 | 2,0 - 5,0 cmolc/dm ³ |
| CTC (cmolc/dm ³) | 131,93 | 6,27 | 4,5 - 10 cmolc/dm ³ |
| MO (dag/kg) | 0,64 | 0,97 | 2,0 - 4,0 dag/kg |
| Macronutrientes | | | |
| P (mg/dm ³) | 1,80 | 1,26 | 9 - 15 mg/dm ³ |
| P remanescente (mg/kg) | 9,10 | 0,83 | 11 - 18 mg/dm ³ |
| Ca (cmolc/dm ³) | 128,30 | 1,80 | 1,5 - 4,0 cmolc/dm ³ |
| Mg (cmolc/dm ³) | 1,10 | 0,30 | 0,5 - 1,0 cmolc/dm ³ |
| N (mg/kg) | 0,583 | 0,630 | 45 - 55 g/kg |
| K (cmolc/dm ³) | 0,26 | 0,10 | 60 - 90 mg/dm ³ |
| Micronutrientes | | | |

| | | | |
|----------------------------------|--------|-------|-------------------------------|
| B (mg/dm³) | 0,46 | 0,19 | 0,35-0,9 mg/dm ³ |
| Na (cmolc/dm³) | 0,76 | 0,05 | - |
| Al (cmolc/dm³) | 0 | 0 | 0,3-1,0 cmolc/dm ³ |
| Cu (mg/dm³) | 0,27 | 0,50 | 0,8-1,8 mg/dm ³ |
| Fe (mg/dm³) | 1,77 | 81,67 | 20-40 mg/dm ³ |
| Mn (mg/dm³) | 67,64 | 9,00 | 5,0-12,0 mg/dm ³ |
| Zn (mg/dm³) | 1,40 | 0,87 | 1,0-2,2 mg/dm ³ |
| S (mg/dm³) | 484,27 | 58,97 | 5,0-10 mg/dm ³ |
| Composição granulométrica | | | |
| Argila (%) | 12,5% | 45% | |
| Areia grossa (%) | 13% | 9,4% | |
| Areia fina (%) | 12,5 % | 6,4% | |
| Silte (%) | 61% | 39,1% | |
| Lítio (%) | 1% | 0,1% | |

*Fonte: Lopes (1999) e Ribeiro et al. (1999).

ÍNDICE DE CLOROFILA E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A

As plantas aos 118 DAE cultivadas no solo ou no RML não apresentaram diferenças significativas para os índices de clorofila *a*, *b* e total ($p > 0,05$, Figura 2). Aos 239 DAE, as plantas em solo apresentaram maiores índices de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total do que em RML (efeito simples do substrato, $p < 0,05$, Figura 2). As plantas não apresentaram diferenças significativas da razão de clorofila *a/b* quando cultivadas em diferentes substratos e regimes hídricos ($p > 0,05$, Tabela S1).

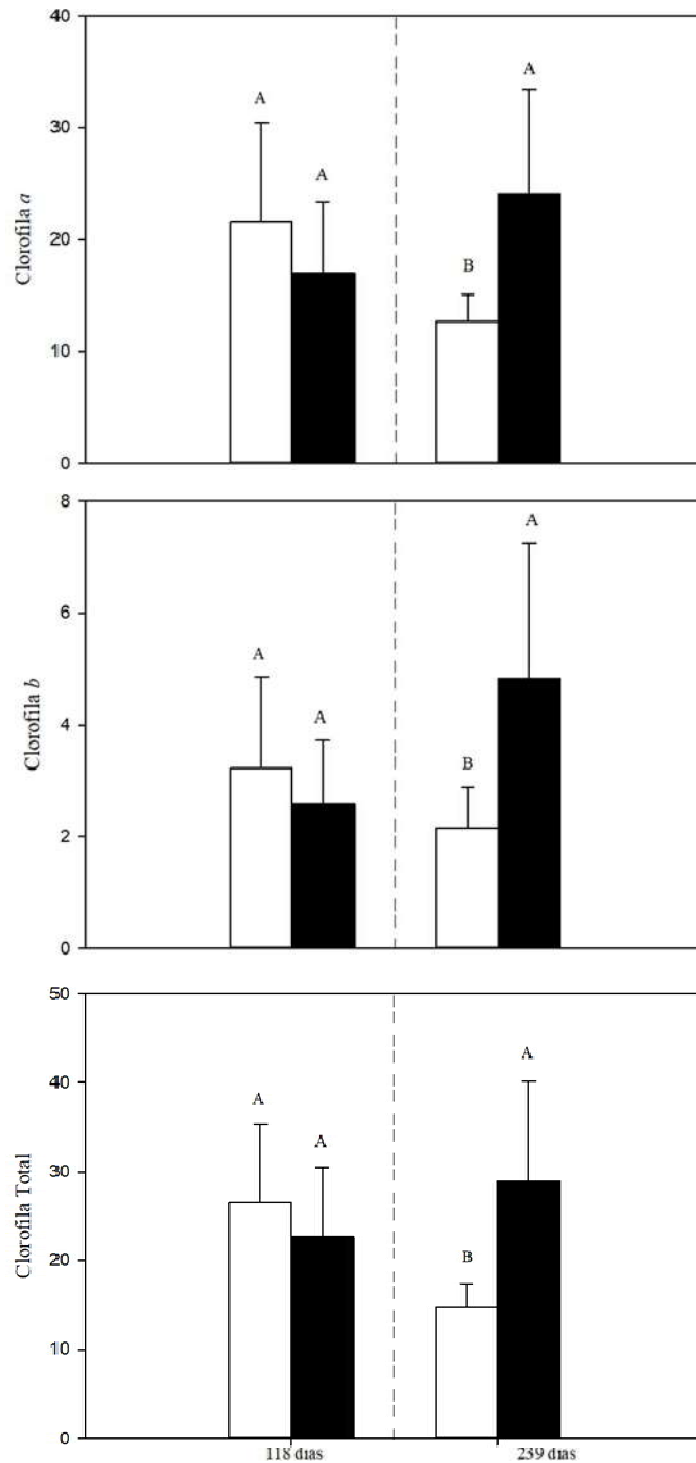


Figura 2: Índices de clorofilas *a*, *b* e total em plantas de *Dimorphandra exaltata* em solo (barras pretas) e em rejeito de mineração de lítio (RML, barras brancas). As barras representam as médias e as linhas acima dos gráficos o desvio padrão. Letras maiúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos.

Plantas no solo e irrigadas apresentaram maior Φ_{FSII} e TTE do que plantas no RML irrigadas ($p < 0,05$, interação solo vs água, Figura 3A e 3B). Porém, plantas no solo e RML sob déficit hídrico não apresentaram diferenças dos valores de Φ_{FSII} e TTE. Plantas no RML e sob déficit hídrico apresentaram maiores valores de Φ_{FSII} e TTE do que plantas irrigadas diariamente ($p < 0,05$, interação solo vs água, Figura 3A e 3B). Plantas sob déficit hídrico apresentaram maior F_v/F_m do que plantas irrigadas diariamente ($p < 0,05$, efeito simples do regime hídrico, Figura 3D). Ainda sobre F_v/F_m , plantas cultivadas em solo apresentaram maior índice do as plantas em RML ($p < 0,05$, efeito simples do substrato, Figura 3C). As plantas em todos os tratamentos não apresentaram diferenças significativas quanto ao NPQ ($p > 0,05$, Tabela S1).

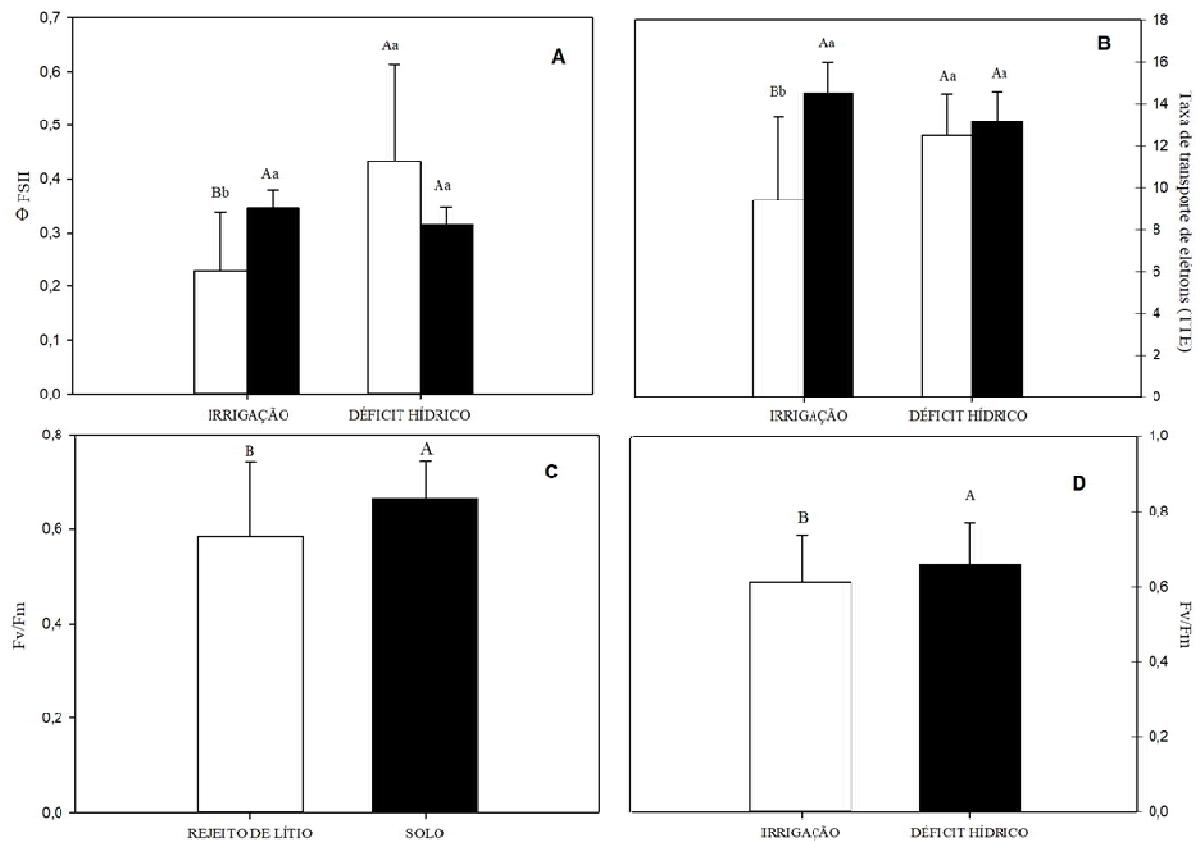


Figura 3: Eficiência fotoquímica efetiva do FS II (A), taxa de transporte de elétrons (B) e eficiência fotoquímica potencial do FS II (C e D) dos indivíduos de *Dimorphandra exaltata* em solo comum (barras pretas) e em rejeito de mineração de lítio (barras brancas). Letras maiúsculas acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos. Letras minúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes regimes hídricos.

MORFOMETRIA VEGETATIVA

As plantas de *D. exaltata* em solo e RML não apresentaram diferentes alturas até a 23ª semana do experimento ($p > 0,05$, Figura 4A). A partir da 24ª semana, as plantas cultivadas em solo com déficit hídrico apresentaram maior altura do caule (interação solo vs água, $p < 0,05$, Figura 4A) do que as plantas nos outros tratamentos. As plantas não apresentaram diferenças no diâmetro do caule entre os tratamentos e ao longo do tempo ($p > 0,05$, Figura 4B). As plantas cultivadas em rejeito de mineração de lítio apresentaram maior número de folhas da 15ª a 21ª semanas (efeito simples do substrato, $p < 0,05$, Figura 4C). Da 24ª semana até o fim do experimento, as plantas crescidas em solo sob déficit hídrico apresentaram maior número de folhas (interação solo vs água, $p < 0,05$, Figura 4C) do que as plantas nos outros tratamentos.

As plantas não apresentaram diferenças entre os indivíduos crescendo em solo e em RML com relação à área foliar média, área foliar total, massa seca foliar, índice de área foliar, razão de área foliar e área foliar específica ($p > 0,05$, Tabela S1).

Indivíduos no solo, irrigados ou sob déficit hídrico, apresentaram maior comprimento radicular do que os indivíduos em RML ($p < 0,05$, interação substrato vs regime hídrico, Figura 5 e 6). Porém, apenas os indivíduos no solo sob déficit hídrico apresentaram maior comprimento radicular do que os indivíduos irrigados diariamente ($p < 0,05$, interação substrato vs regime hídrico, Figura 5).

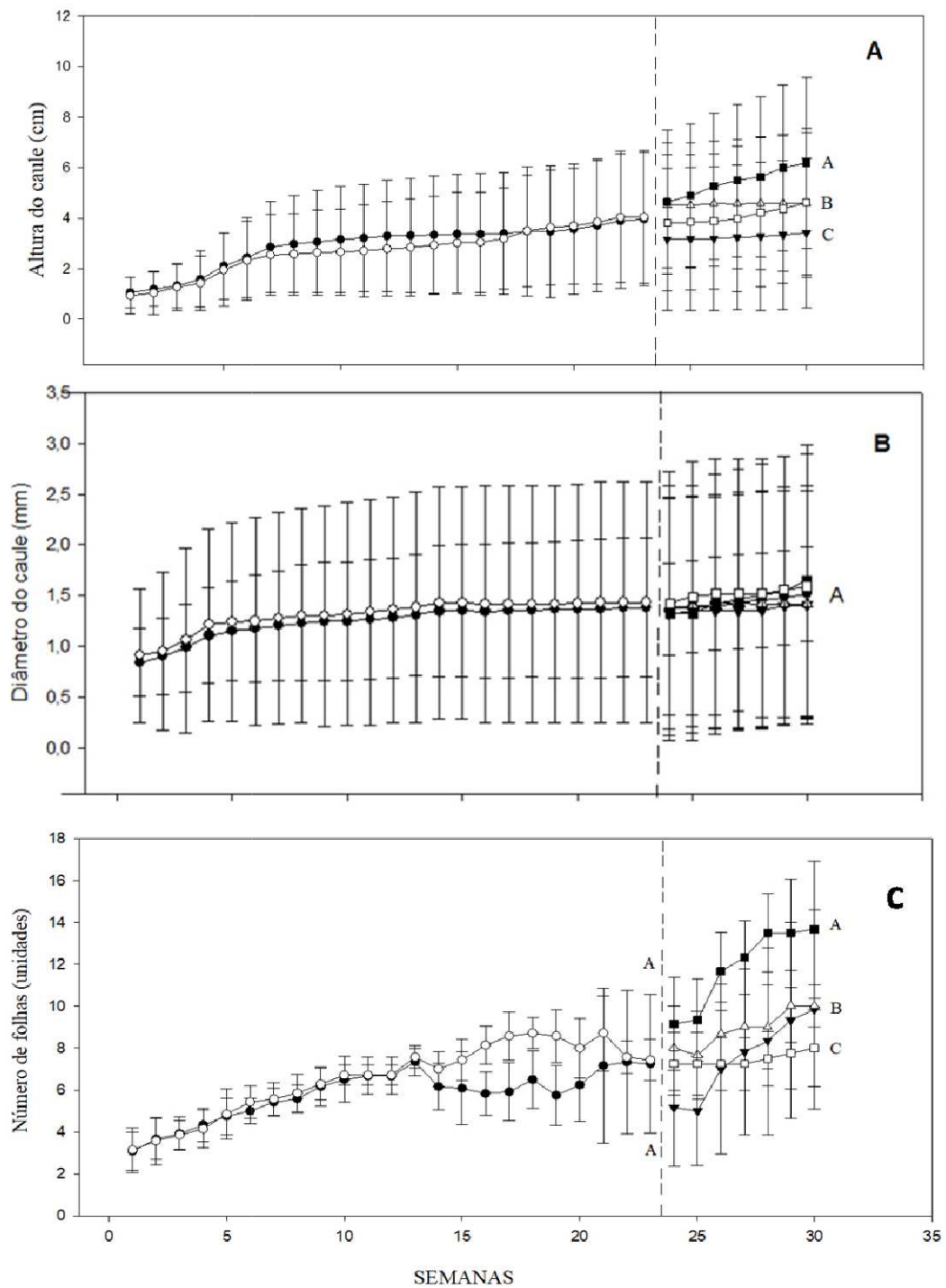


Figura 4: Morfometria vegetativa ao longo do tempo em *Dimorphandra exaltata*, crescendo em distintos substratos (solo vs RML) e regimes hídricos (irrigadas vs déficit hídrico). Legenda: ● = solo e irrigação diária até os 190 dias; ○ = rejeito de mineração de lítio e irrigação diária até os 190 dias; ▼ = solo sob irrigação diária; ■ = solo sob déficit hídrico; △ = rejeito de lítio sob irrigação diária; e □ = rejeito de lítio sob déficit hídrico. As letras diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos (substrato e regime hídrico).

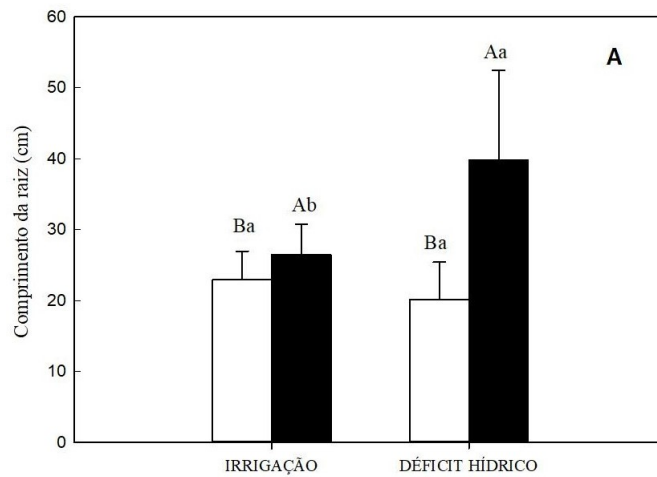


Figura 5: Comprimento da raiz (A) dos indivíduos de *Dimorphandra exaltata* crescendo em solo (barras pretas) e em RML (barras brancas), sob déficit hídrico ou irrigação diária. Letras maiúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos. Letras minúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes regimes hídricos.



Figura 6: Comprimento das raízes de *D. exaltata* sob déficit hídrico. À esquerda planta cultivada em RML, à direita planta cultivada em solo normal.

MASSA SECA

As plantas cultivadas sob déficit hídrico apresentaram maior massa seca do caule do que as plantas irrigadas diariamente (efeito simples do regime hídrico, $p < 0,05$, Figura 7A). Plantas sob déficit hídrico no solo apresentaram maior MSR e MST do que as plantas no RML sob déficit hídrico ($p < 0,05$, interação substrato vs regime hídrico, Figura 7B, 7C e 8). Somente as plantas no solo apresentaram maior MSR e MST sob déficit hídrico do que quando irrigadas ($p < 0,05$, interação substrato vs regime hídrico, Figura 7B, 7C e 8). Plantas de *D. exaltata* no solo sob déficit hídrico apresentaram maior RRPA do que as plantas em RML sob déficit hídrico ($p < 0,05$, interação substrato vs regime hídrico, Figura 7D). Porém, plantas no RML sob déficit hídrico apresentaram menor RRPA do que plantas no RML irrigadas ($p < 0,05$, interação substrato vs regime hídrico, Figura 7D).

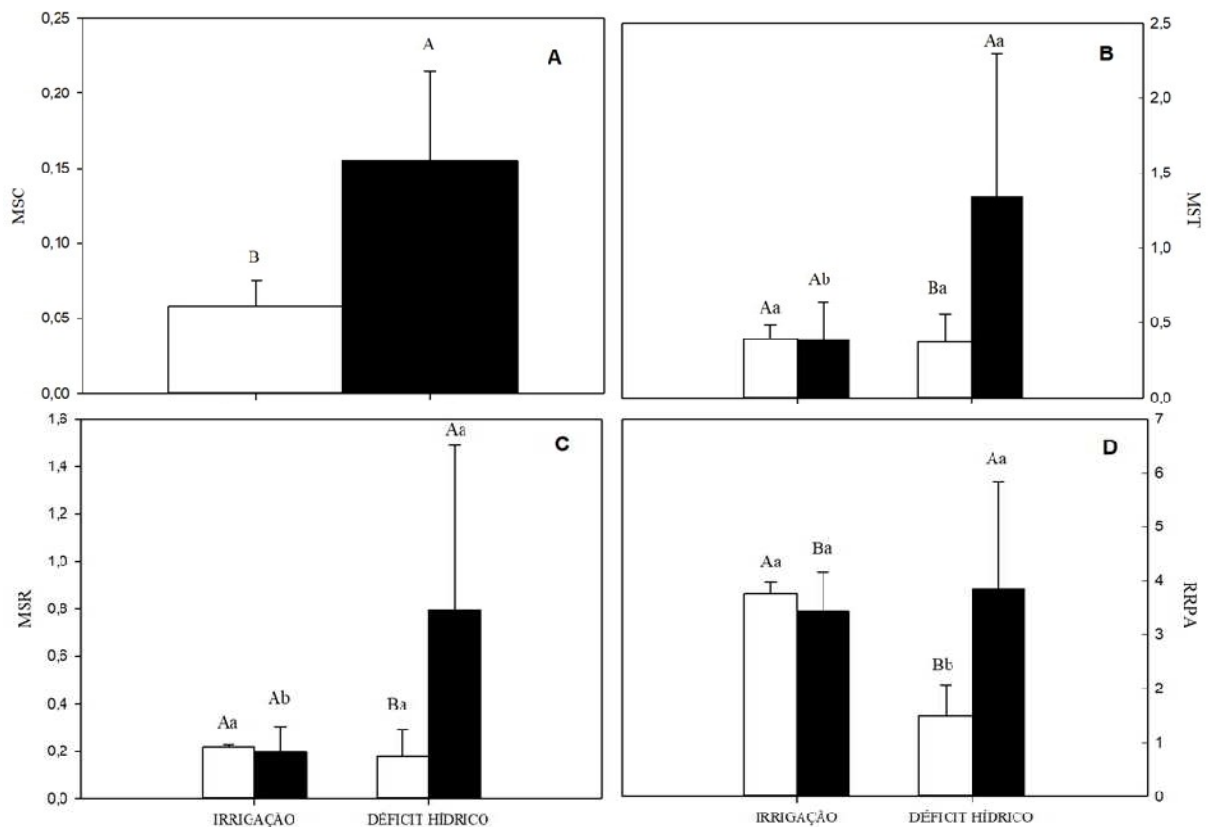


Figura 7: Produção de massa seca do caule (A), massa seca total (B), massa seca da raiz (C) e razão raiz parte aérea (D) de *D. exaltata* cultivada em diferentes níveis de disponibilidade hídrica (irrigação e déficit hídrico). A figura A compara plantas de *Dimorphandra exaltata* sob déficit hídrico (barra preta) e irrigação diária (barra branca); as figuras B, C e D comparam plantas de *Dimorphandra exaltata* em solo (barras pretas) e em RML (barras brancas). Letras maiúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos. Letras minúsculas diferentes acima das barras indicam diferenças significativas

($p < 0,05$) entre os diferentes regimes hídricos.

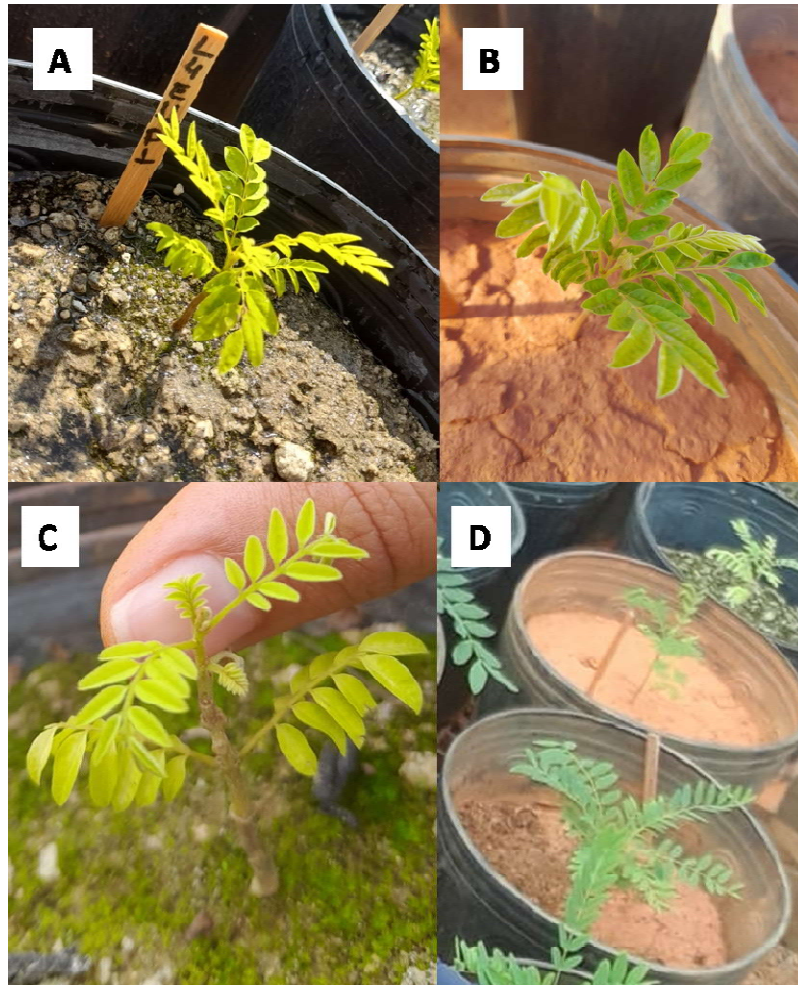


Figura 8: Plantas de *D. exalata* aos 239 dias de experimento. Planta em RML com irrigação(A), planta em solo normal com irrigação (B), planta em RML sob déficit hídrico (C) e plantas em solo normal sob déficit hídrico (D).

CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO E NA FOLHA

Os substratos irrigados diariamente apresentaram maior teor de água do que os substratos em déficit hídrico ($p < 0,05$, interação entre substrato vs regime hídrico, Figura 9). O RML apresentou maior teor de água sob déficit hídrico do que o solo (interação solo vs água, $p < 0,05$, Figura 9). As plantas não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) em relação ao conteúdo relativo de água na folha (Tabela S1).

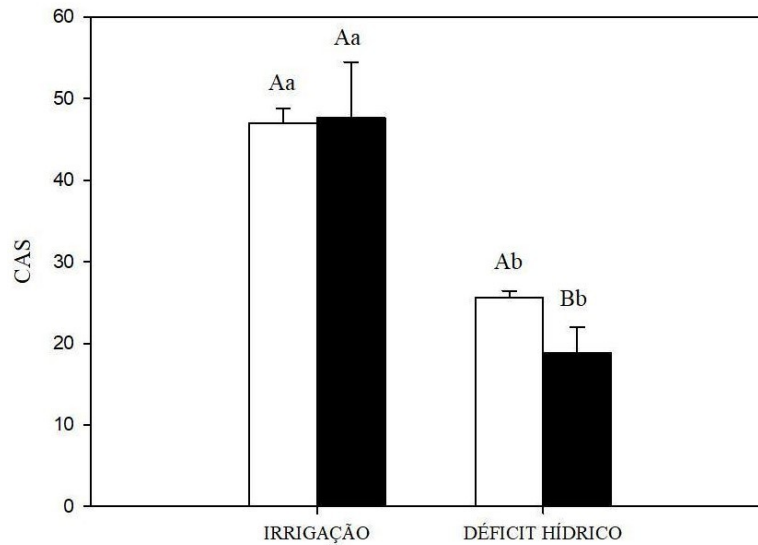


Figura 9: Conteúdo de água no substrato (CAS) onde os indivíduos de *Dimorphandra exaltata* estavam crescendo. Solo = barras pretas, rejeito de minério de lítio = barras brancas, sob déficit hídrico ou irrigadas diariamente. Letras maiúsculas acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes tipos de substratos. Letras minúsculas acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os diferentes regimes hídricos.

4 DISCUSSÃO

O déficit hídrico promoveu maior alocação de biomassa para as raízes das plantas jovens de *D. exaltata* cultivadas em solo, como geralmente ocorre em plantas sujeitas a condições de seca, em que o crescimento da parte aérea é usualmente menor em relação ao crescimento das raízes (Kozłowski & Pallardy, 1997; Fasolin et al., 2019). A massa seca das raízes é reconhecida como um dos indicadores mais eficazes, que melhor determinam o estabelecimento das mudas em campo por influenciar diretamente na absorção de água e nutrientes e ter influência direta sobre o crescimento inicial das mudas após o plantio (Ciavatta et al., 2014). O menor suprimento de água sob déficit hídrico promoveu uma redução no crescimento radicular nas plantas de *D. exaltata* cultivadas em RML, o que pode ser consequência da baixa assimilação líquida de carbono e, conseqüentemente, redução do crescimento dessas plantas. Fatores ambientais afetam o padrão de alocação da biomassa nas plantas (Chambel et al., 2007), pois a planta destina a biomassa preferencialmente ao órgão que captura o recurso limitante ao crescimento (Shipley & Meziane, 2002; Souto et al., 2015; Alves, 2022). Redução da produção de matéria seca em resposta a metais são amplamente relatados na literatura (Kabata-Pendias & Pendias 1992, Sanità-di-Toppo & Gabbrielli 1999,

Marques et al. 2000). Em nosso estudo, as plantas de *D. exaltata* sob déficit hídrico (no solo) investiram mais na produção de raízes para poder explorar o solo na busca por água. Cruz (2018), investigou o efeito do rejeito de minério oriundo do rompimento da barragem de Fundão sobre o crescimento inicial em espécies lenhosas. O crescimento das plântulas dessas espécies foi menor no rejeito, quando comparados ao solo. As plântulas cultivadas em rejeito de minério de ferro acumularam menor biomassa em comparação ao substrato controle. Gomes et al. (2011), em estudo com plantas jovens de salgueiro cultivadas em solo contaminado por metais pesados, observaram menor produção de matéria seca das raízes e da parte aérea e menor crescimento das raízes. Possivelmente devido a estrutura e baixa disponibilidade de nutrientes (valores de pH mais básicos) no RML, as plantas de *D. exaltata* não conseguiram produzir biomassa para as raízes, principalmente em condições de déficit hídrico, o que pode causar maiores taxas de mortalidade nessa condição.

O pH do solo é um fator importante na avaliação do status nutricional das plantas devido à sua associação direta com a disponibilidade de nutrientes (Beheiry et al., 2023). A concentração dos íons de hidrogênio (pH) pode afetar a disponibilidade dos nutrientes para as raízes das plantas ou causar toxicidade química. Os nutrientes geralmente estão disponíveis para absorção das raízes das plantas na faixa de pH 5,0 a 6,5 (Raymundo et al., 2017). Como exemplo, Tisdale et al. (1985) relataram que a disponibilidade de Mn e de Zn pode diminuir cerca de 100 vezes com o aumento de uma unidade de pH, e a disponibilidade de Fe, cerca de 1.000 vezes.

Os valores das taxas de acidez ($H^+ + Al$), MO, P e P remanescente, Cu, K, Al e Fe abaixo da faixa padronizada para culturas agrônômicas (Lopes, 1999 & Ribeiro et al., 1999) encontrados no RML podem ter afetado diretamente no desenvolvimento das plantas. Rajj et al. (1987) destacaram que os teores de matéria orgânica do solo decorrem do equilíbrio de ganhos e perdas de materiais disponíveis na serrapilheira; em geral, valores mais altos são encontrados em solos florestais, já nos solos minerais, como o RML, é comum o seu baixo teor. A disponibilidade de P e de P remanescente (P-rem) é uma ferramenta para avaliar a capacidade de fixação de P no solo, e substituir a análise textural do substrato, visto que sua mensuração acontece pela capacidade de adsorção de fosfatos do solo, que são, por sua vez, dependente da quantidade de MO, da textura e da mineralogia da fração argila (Novais & Smyth, 1999; Novais, 2007). Desta forma, era esperado um menor valor de P-rem, uma vez que o RML é mais arenoso em sua composição.

Os óxidos de Fe e Al são os componentes mineralógicos que exercem maior influência sobre o P-rem, devido à importância na adsorção de fósforo (Lisboa et. al., 2012), assim sua

menor presença no RML afeta diretamente nas taxas de P e P-rem. Diversos estudos mostraram que a menor disponibilidade do P afetou a produção de biomassa de espécies florestais em crescimento inicial (Barros, 2001; Dias *et al.*, 1991; Siqueira e Franco, 1988). Os metais pesados zinco e cobre não interferiram no crescimento das plantas, pois os teores encontrados ficaram abaixo do limite de toxidez: Zn: 100 a 400 mg kg⁻¹; e Cu: 20 a 100 mg kg⁻¹ (Andrade *et al.*, 2009; Kabata-Pendias & Pendias, 2001). De forma contrária, pesquisas demonstraram que a concentração de K abaixo dos padrões médios padronizados (Lopes, 1999 & Ribeiro *et al.*, 1999) não reduziu o crescimento em altura e diâmetro, e nem a produção da matéria seca da parte aérea de espécies florestais, como *Hymenaea courbaril* (L.) (jatobá) (Venturin *et al.*, 1996; Duboc *et al.*, 1996) e *Copaífera langsdorffi* (Benth) (copaíba) (Duboc *et al.*, 1996).

Em contrapartida, os resultados da soma das bases (SB), CTC, Ca, Mg, Mn e S apresentaram taxas maiores do que os padrões médios no RML. As plantas ao serem afetadas por um nutriente em doses de nível tóxico, no caso do RML, Ca, Mn e S, podem apresentar déficit nutricional (como déficits nutricionais de fósforo, potássio, magnésio), uma vez que interferem no processo de absorção, translocação e transporte de nutrientes (Sivaguru & Horst, 1998; Freitas *et al.*, 2006; Miguel *et al.*, 2010). Assim como no RML, estudos de Bitencourt (2014) sobre a recomposição topográfica de áreas mineradas em Candiota-RS, observaram a predominância de Ca e Mg em substrato mineralógico. Borůvka *et al.* (2012) e Limpitlaw *et al.* (1997), observaram maiores teores de Ca e Mg em solos construídos com fragmentos de rochas pós mineração, e atribuíram isso à intemperização das rochas. A maior presença de Ca disponível favorece a capacidade de troca catiônica (CTC) do RML, mas pode inibir a absorção de outros nutrientes, prejudicando o balanço nutricional vegetal (Freitas *et al.*, 2006; Miguel *et al.*, 2010). O desbalanço nutricional parece ser o principal fator na redução do crescimento das plantas cultivadas em RML.

Como resultado da menor alocação de biomassa para as raízes, houve um desbalanço entre a razão raiz parte aérea. Apesar do RML apresentar maior conteúdo de água do que o solo, ainda que em déficit hídrico, as plantas em RML não conseguiram absorver água suficiente para manter seu crescimento. Além de afetar a produção total de biomassa, a disponibilidade hídrica interfere no particionamento entre os órgãos da planta. A massa seca das folhas aumenta com a disponibilidade de nutrientes (Poorter *et al.*, 2012), enquanto plantas cultivadas em ambientes com baixa oferta de recursos mostram maior alocação para as raízes (Brouwer, 1963; Fasolin *et al.*, 2019). Isto se torna evidente ao notar que as plantas

jovens de *D. exaltata* quando em déficit hídrico no RML apresentaram maior biomassa nas raízes e menor MSF. Em uma metanálise realizada por Poorter et al. (2012), com o intuito de entender o padrão de alocação de biomassa, encontraram que plantas cultivadas em substratos com baixa disponibilidade de recursos alocaram mais biomassa nas raízes em detrimento do caule e, principalmente das folhas.

A menor alocação de biomassa para as raízes e RRPA resultou em menor produção de biomassa total em plantas sob déficit hídrico. Substratos com o pH básico, como o RML, afetam a disponibilidade de nutrientes para absorção pelas raízes, influenciando o balanço de nutrientes no corpo das plantas (Laulhere & Briat, 1993; Ferrarezi et al., 2022). Estudos afirmaram que a baixa disponibilidade de alguns nutrientes, principalmente o fósforo (P) e outros nutrientes, pode ser fortemente relacionada ao aumento do pH do solo (Song et al., 2017; Rady et al., 2020; Awad et al., 2021). Guo et al. (2022), demonstrou em estudos com *Petunia hybrida* cultivada em vitro (planta usada como modelo para estudos de biologia do desenvolvimento), que os teores de clorofila diminuíram com o aumento do pH do meio, enquanto o pH mais ácido, (5 a 7) aumentou a absorção de nutrientes e os teores de clorofila.

Plantas no RML apresentaram menor índice de clorofila (*a* e *b*), o que resultou em menor taxa de transporte de elétrons. A redução ocorre em plantas sob estresse, neste caso, o alto pH e consequente dificuldade de absorção de nutrientes (Coelho et al., 2018 & Araújo et al., 2018). Condições edafoclimáticas adversas reduzem o investimento na produção de matéria seca e reduzem a eficiência fotossintética (Carvalho et al., 2012). Menores teores de clorofilas demonstram que o transporte de fotoassimilados acontece de forma menos eficiente (Díez et al., 2017). A clorofila *b* nos cloroplastos é importante, pois como pigmento acessório, é responsável pela captação da energia luminosa, e é transferida para a clorofila *a* por meio da enzima clorofila *a* oxigenase (Xu et al., 2001; Taiz & Zeiger, 2013). Tal conversão promove o sincronismo entre os aceptores na cadeia de transporte de elétrons dos fotossistemas, e aumenta a taxa de transporte de elétrons (Lima et al., 2011).

A menor quantidade de clorofila, aos 239 dias de experimento, imposta principalmente pelo rejeito, interferiu na conversão de luz do fotossistema II (FSII), o que pode ser observado pelo menor valor de Fv/Fm encontrado nas plantas cultivadas em RML. Os resultados deste parâmetro são utilizados para detectar perturbações induzidas pelo estresse no aparato fotossintético, já que a diminuição nos valores de Fv/Fm podem ser consequência de danos causados nos centros de reação do FSII (Baker, 2004, Cruz, 2018). A razão Fv/Fm fornece uma estimativa da eficiência máxima, onde a luz coletada no fotossistema II é convertida em energia química, assim a diminuição dessa via fotoquímica da fotossíntese é refletida na

redução do crescimento das plantas, como observado nas plântulas cultivadas no RML. Desta forma, mesmo com área foliar semelhante (plantas no substrato e no RML), as plantas no RML não conseguem realizar fotossíntese nos mesmos níveis do que as plantas no solo, o que resulta em menor produção de matéria seca.

Corroborando nossa hipótese inicial, as plantas em solo e sob déficit hídrico apresentaram maior alocação de biomassa para as raízes. As plantas cultivadas no solo apresentaram maior produção de biomassa total. O RML apresentou níveis altos de componentes nutricionais elementares, mas seu alto pH e o desbalanço entre os nutrientes disponíveis e escassos pode ter dificultado a absorção desses elementos. A deficiência nessa absorção está intimamente relacionada com a diminuição de seu crescimento vegetativo, menores índices de clorofilas (*a* e *b*) e menor eficiência fotoquímica potencial do fotossistema II (FSII) do que nas plantas crescendo em solo sem impacto da mineração. Plantas em RML e déficit hídrico apresentaram diminuição dos valores de RRPA. As variáveis fotossintéticas seguiram o mesmo padrão das variáveis morfológicas. Assim, mesmo com área foliar semelhante (plantas no solo e no RML), as plantas no RML não conseguem realizar fotossíntese nos mesmos níveis do que as plantas no solo, o que resulta em menor produção de matéria seca. Os resultados aparentemente não indicam que a espécie seja indicada para a recuperação de áreas degradadas, notadamente pela alta taxa de mortalidade e crescimento lento.

5 REFERÊNCIAS

Alves, A. C. Caroco de açaí como substrato e rizobactérias no desenvolvimento de mudas de Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis.). Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, Pará, 2022.

Andrade, M. G. de .; Melo, V. de F.; Gabardo, J.; Souza, L. C. de P.; Reissmann, C. B.. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: I - Fitoextração. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 33(6), 1879–1888, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600037>

Awad, A. A. M.; Sweed, A. A. A.; Rady, M. M.; Majrashi, A.; Ali, E. F. Rebalance the nutritional status and yield of sweet potato plants with high CaCO₃ stress by foliar nutrition

with zinc oxide and ascorbic acid nanoparticles. *Agronomy*, 11, 1443, 2021.

Baker, N. R.; Rosenqvist, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607-1621, 2004.

Barros, J.G. Liming and fertilization to the formation of seedlings of mogno (*Swietenia macrophylla* King) Dissertação de Mestrado, UFAM, Manaus, Amazonas. 64pp, 2001 (in Portuguese).

Beheiry, H. R.; Awad A. A. M.; Hussein H. A. Z. Response of multi-stressed olea europaea trees to soil pH adjustment by acidifying agents: impacts on nutrient uptake and productivity. *Agronomy*; 13 (2): 539. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020539>. 2023.

Behmer, S. T.; Lloyd, C. M.; Raubenheimer, D.; Stewart-Clark, J.; Knight, J.; Leighton, R.S.; Harper, F. A. and Smith, J. A. C. Metal hyperaccumulation in plants: mechanisms of defence against insect herbivores. *Functional Ecology*, 19: 55-66, 2022.

Bitencourt, D.G.B. Dinâmica de acidificação e metais no solo e subsolo de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2014. 125p. Tese de Doutorado. <<http://repositorio.ufpel.edu.br/bitstream/prefix/3050/1/TESE.pdf>>.

Borůvka, L.; Kozák, J.; Mühlhanslová, M.; Donátová, H.; Nikodem, A.; Němeček, K. Effect of covering with natural topsoil as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites. *Journal of Geochemical Exploration*, v.113, p.118-123, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.11.004>>

Brouwer, R. Some aspects of the equilibrium between overground and underground plant parts. *Jaarboek van het Instituut voor Biologisch en Scheikundig onderzoek aan Landbouwgewassen*, 31-39, 1963.

Cardoso, E. J. B. N.; Andreote, F. D. *Microbiologia do solo*. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2016. DOI: Disponível em: <https://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/109>

Chambel, M. R.; Climent, J.; Alía, R. Divergence among species and populations of Mediterranean pines in biomass allocation of seedlings grown under two water regimes. *Annals of Forest Science, Paris*, v. 64, p. 87-97, 2007.

Ciavatta, S. F.; Silva, M. R.; Simões, D. Fertirrigação na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* nos períodos de inverno e verão. *Cerne*, v. 20, n. 2, p. 217-222, 2014.

Cruz, F. V. da S.; Gomes, M. P.; Bicalho, E. M.; Della Torre, F. & Garcia, Q. S. A lama derramada pela Samarco prejudica o crescimento de árvores nativas da Mata Atlântica? *Ecotoxicologia e Segurança Ambiental*, 189, 110021. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.110021, 2020.

Dias, L. E.; Alvarez, V. H. V.; Brienza, J. S. Formation of seedlings of *Acacia mangium* Willd: II: Responses to nitrogen and potassium. *Rev. Árvore* 15: (1) 12-22, 1991 (in Portuguese, with abstract in English).

Díez, M. C.; Moreno, F.; Gantiva, E. Effects of light intensity on the morphology and CAM photosynthesis of *Vanilla planifolia* Andrews. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, vol. 70, n. 1, p. 8023-8033. <https://doi.org/10.15446/rfna.v70n1.61736>, 2017.

Dorn, F. M.; Gundemann, H. Mining companies, indigenous communities and the state: the political ecology of lithium in Chile (Salar de Atacama) and Argentina (Salar de Olaroz-Cauchari). *Journal of Political Ecology*, v. 29, n. 1, 2022.

Duarte, M. M.; Kratz, D.; de Carvalho, R. L. L.; Nogueira, A. C. Influência do estresse hídrico na germinação de sementes e formação de plântulas de angico branco. *Advances in Forestry Science*, 5(3), 375-379, 2018.

Duboc, E.; Venturin, N.; Vale, F.R do; Davide A .C. Nutrition jatoba (*Hymenaea coubaril* L. var. *Stilbocarpa* (Hayne) Lee et Lang). *Cerne*, 2(1): 138-152. 1996 (in Portuguese, with abstract in English).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de solo. Rio de Janeiro, RJ: 1997. 21p.

Fasolin, J. P.; Zucareli, V.; Carbonieri, J.; Nagashima, G. T.; Morais, H.; Caramori, P. H.; Medri, M. E. Variação anatômica e fisiológica do amendoim (cultivar IAPAR 25 Tição) cultivado sob diferentes regimes hídricos. *Acta Iguazu, [S. l.]*, v. 8, n. 3, p. 92–104, 2019. DOI: 10.48075/actaiguaz.v8i3.19583.

Fernandez, E.,Verdi, M., Martinelli, G., Silva,G., Moreira, F. *Dimorphandra exaltata* (amended version of 2021 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2021. Disponível em:<https://www.iucnredlist.org/>.

Freitas, F. A.; Kopp, M. M.; Sousa, R. O.; Zimmer, P. D.; Carvalho, F. I. F.; Oliveira, A. C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. *Revista Ciência Rural, Santa Maria*, v. 36, n. 1, p. 72-79, 2006.

Freitas, L.; Casagrande, J. C.; Oliveira, I., Moreti, T. & Carmo, D. Avaliação de atributos químicos e físicos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. *Enciclopédia Biosfera, 9(17)*, 2013.

Freitas, V. M. B. Qualidade de mudas de *Ormosia arborea* (Vell.) Harms produzidas sob diferentes condições de luminosidade e alagamento. 71 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências Humanas, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2018.

Ferrarezi, R. S. et al. O pH do substrato influencia a absorção de nutrientes e o microbioma da rizosfera das plantas de toranja afetadas por huanglongbing. *Fronteiras em Plant Science* , v. 13, p. 856937, 2022.

Ferreira, P. A. A.; Bomfeti, C. A.; Silva Júnior, R. DA.; Soares, B. L.; Soares, C. R. F. S. & Moreira, F. M. S. Eficiência simbiótica de estirpes de *Cupriavidus necator* tolerantes a zinco, cádmio, cobre e chumbo. *Pesquisa agropecuária brasileira.v.47, n.1, p.85-95, Flexer et al. / Science of the Total Environment 639 (2018) 1188–1204*, 2012.

Garcia, K. G. V.; Gomes, V. F. F.; Almeida, A. M. M.; Mendes Filho, P. F. Micorrizas arbusculares no crescimento de mudas de sabiá em um substrato proveniente da mineração de manganês. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 11, Nº 2, p. 15-

20, 2016.

Glick, B. R. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances*. v. 28, p. 367-374, 2010.

Gomes, M. P.; Marques, T. C. L. L.; de S. e M.; Nogueira, M. de O. G.; Silva, G. H., Castro, E. M. & Soares, Â. M.. (2011). Efeitos dos rejeitos da indústria de zinco na anatomia e crescimento de plantas jovens de *Salix humboldtiana* Willd (salgueiro). *Hoehnea*, 38(1), 135–142. <https://doi.org/10.1590/S2236-89062011000100012>, 2011.

Greipsson, S. Phytoremediation. *Nature Education Knowledge* 3(10):7, 2001.

Guo, G.; Xiao, J.; Jeong B. R. Iron Source and Medium pH Affect Nutrient Absorption and Pigment Content in *Petunia hybrida* 'Madness Red' Grown In Vitro. *International Journal of Molecular Sciences*; 23(16):8943. <https://doi.org/10.3390/ijms23168943>, 2022.

Hansch, R.; Mendel, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl) *Current Opinion in Plant Biology*, 2009.

Ira, M.E.; Lopes, A.S.; Bataglia, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

Kabata-Pendias, A.; Pendias, H. Trace elements in soils an plants. 2 ed. CRC Press, Boca Raton, 2001.

Kozlowski, T. T.; Pallardy, S. G. Physiology of woody plants. San Diego, Academic Press. 411, 1997.

Laulhere, J. P.; Briat, J. F. Release and absorption of iron by plant ferritin: Effects of pH, reduction and chelation. *Biochem. J.* 1993, 290, 693–699.

Lewis, G. P.; Schrire, B. D.; Mackinder, B. A.; Lock, J. M. Legumes of the world. Kew: Royal Botanic Gardens. 577p. 2005.

Li, Y. M.; Chaney, R.; Brewer, E.; Roseberg, R.; Angle, J. S.; Baker, A.; Reeves, R.; Nelkin, J. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations. *Plant Soil* 249, 107–115, 2003.

Lima, M. C.; Amarante, L.; Mariot, M. P.; Serpa, R. Crescimento e produção de pigmentos

fotossintéticos em *Achillea millefolium* L. cultivada sob diferentes níveis de sombreamento e doses de nitrogênio. *Ciência Rural*, vol. 41, n. 1, p. 45-50. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000100008>, 2011.

Limpitlaw, D.; Aken, M.; Kinoni, J.; Mentis, M.; Nell, J.P.; Tanner, P.D. Rehabilitation and soil characterization. In: *International Conference on Coal Research*, 11., 1997, Calgary. *Proceedings...* Calgary: Canadian Organizing Committee, 1997. p.297-309.

<<http://www.limpitlawconsulting.com/97Limpitlaw%20et%20al%201997%20Rehabilitation%20and%20soil%20characterization.pdf>>.

Lisboa, B. B.; Vargas, L. K.; Abichequer, A. D.; Dorneles, E. P.; Capitani, B. Determinação do fósforo remanescente como método alternativo à textura na indicação da classe de disponibilidade de fósforo em três solos. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v. 18, n. 1, p. 81-84, 1 ago. 2012.

Lopes, A. S. *Micronutrientes: filosofia de aplicação e eficiência agrônômica*. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 1999. 72 p. (ANDA. Boletim técnico, 8).

Ludwig, F.; Fernandes, D. M.; Guerrero, A. C.; Bôas, R. L. V. Características dos substratos na absorção de nutrientes e na produção de gérbera de vaso. *Horticultura Brasileira*, 32(2), 184–189. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000200011>, 2014.

Lukashe, N. S.; Mnkeni, P. N. S.; Mupambwa, H. A. Growth and elemental uptake of Rhodes grass (*Chloris gayana*) grown in a soil contaminated with mine residues altered with vermicompost enriched with fly ash. *Environ Sci Pollut Res* 27, 19461–19472. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08354-7>. 2020.

Lux, A.; Sottniková, A.; Opatrná, J.; Greger, M. Differences in structure of adventitious roots in *Salix clones* with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. *Physiologia Plantarum* 120: 537-545, 2004.

Macnair, M.R. The hyperaccumulation of metals by plants. *Advances in Botanical Research* 40, 63–105, 2003.

Marques, T. C. L. L. D. S. E. M.; Moreira, F. M. D. S.; Siqueira, J. O. Crescimento e teor de

metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 35, n. 1, p. 121–132, 2000.

Matos, R. P. Estudos fitogeográficos e modelagem ecológica do gênero *Dimorphandra* Schott (Leguminosae, Caesalpinioideae). 2015.

Mendes Filho, P. F.; Vasconcellos, R. L. F.; Paula, A. M. DE.; Cardoso, E. J. B. N. Evaluating the Potential of Forest Species Under “Microbial Management” for the Restoration of Degraded Mining Areas. Water Air Soil Pollution. v. 208, p. 79–89, 2010

Mensah, A.K.; Mahiri, I. O.; Owusu, O.; Mireku, O.D.; Wireko, I.; Kissi, E. A. Environmental impacts of mining: A study of mining communities in Ghana. Appl Ecol Environ Sci 3: 81-94. DOI: 10.12691/aees-3-3-3, 2015.

Ministério do Meio Ambiente/Gabinete do Ministro. Portaria MMA nº 148, de 7 de Junho de 2022. Edição:108 Seção:1 Páginas:74. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-148-de-7-de-junho-de-2022-40627273>.

Mittermeier, R. A.; Gil, P. R.; Hoffman, M.; Pilgrim, J.; Brooks, T.; Mittermeier C. G.; Lamourex, J.; Fonseca, G. A. B. Hotspots revisited: Earth’s biologically richest and most endangered terrestrial ecorregions. Conservation International, Mexico, 392 pp, 2004.

Muniz, A. C.; Lemos-Filho, J. P.; Souza, H. A.; Marinho, R. C.; Buzatti, R. S.; Heuertz, M.; Lovato, M. B. The protected tree *Dimorphandra wilsonii* (Fabaceae) is a population of inter-specific hybrids: recommendations for conservation in the Brazilian Cerrado/Atlantic Forest ecotone. Ann Bot. 2020 Jun 19;126(1):191-203. doi: 10.1093/aob/mcaa066. PMID: 32277237; PMCID: PMC7304468.

Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., Fonseca G. & Kent, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403: 853–858, 2000.

Novais, R. F.; Smyth, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

Novais, R. F.; Smyth, T. J.; Nunes, F. N. VIII – Fósforo. In: Novais, R. F.; Alvarez, V. V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. (Eds.). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 472-537.

Oliveira, S. C. C.; Ferreira, A. G.; Borghetti, F. "Efeito alelopático de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (Solanaceae) na germinação e crescimento de *Sesamum indicum* L.(Pedaliaceae) sob diferentes temperaturas." *Acta Botanica Brasilica* 18: 401-406. 2004.

Pang X, Zhu Z, Xu F, and others. Evaluation of Control Measures Implemented in an Outbreak of Severe Acute Respiratory Syndrome in Beijing, 2003. *JAMA*. 2003;290(24):3215–3221. doi:10.1001/jama.290.24.3215

Pires, F. R.; Souza, C. M.; Silva, A. A.; Procópio, S. O.; Ferreira, L. R.. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. *Planta Daninha*, 21(2), 335–341, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200020>

Prasetya, D.; Avina, H.; Sulistyarningsih, Y. Physiological and ultrastructural studies of *Jatropha curcas* and *Reutealis trisperma* in response to gold-mine tailings. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 23. 10.13057/biodiv/d230721, 2022.

Pollard, A. J.; Powell, K. D.; Harper, F. A.; Smith, J. A. C. The genetic basis of metal hyperaccumulation in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences* 21, 539–566, 2002.

Poorter, H.; Niklas, K. J.; Reich, P. B.; Oleksyn, J.; Poot, P.; Mommer, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30-50, 2012.

Rady, M. M.; El-Shewy, A. A.; Seif El-Yazal, M. A.; Abd El-Gawwad, I. F. M. Integrated application of soil P solubilizing bacteria and foliar nano P improves *Phaseolus vulgaris* plant performance and components of the antioxidant defense system under calcareous soil conditions. *J. Soil Sci. Plant Nutri*. 2020, 20, 820–839.

Raij, B. van; Quaggio, J.A.; Cantarella, H.; Ferreira, M.E.; Lopes, A.S.; Bataglia, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

Ramos, L. J. Departamento Nacional de Produção Mineral - Minas Gerais – Brasil. 2007. RESOLUÇÃO CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005.

Raymundo, C. E. V. et al. VII Botânica no Inverno - São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Departamento de Botânica, 2017. 332 p. : il.

Renó, N. B.; Vale F. R.; Curi, N.; Siqueira, J.O. Nutritional requirements of four native species In: Brazilian Congress of Soil Science, 24. Goiânia, Resumos., SBCS. p211-212, 1993 (in Portuguese).

Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. V. H. (Ed.). Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

Strasser, R. J.; Srivastava, A.; Tsimilli-Michael, M. Fluorescence transients as a tool to characterize and trace Photosynthetic sample. In: Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation (M. Yunus, U. Pathre and P. Mohanty, eds.), Taylor and Francis, UK, Chapter 25, pp 445-483, 2000.

Sanità-di-Toppi, L.; Gabbrielli, R. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 41: 105-130, 1999.

Santos, J. A. G. Recuperação e Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração. Cruz das Almas, BA: UFRB, 2017.

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

Shipley, B.; Meziane, D. The balance-growth hypothesis and the allometry of leaf and roots biomass allocation. *Functional Ecology*, Londres, v. 16, p. 326-31, 2002.

Silva, M. F. *Dimorphandra* (Caesalpinaceae). *Flora neotropica*, 44:1-128, 1986.

Singh, A. N.; Raghubanshi, A. S.; Singh, J. S. Plantations as a tool for mine spoil restoration. *Current Science*, 82(12): 1436-144, 2002.

Silva, T. J.; Hansted, F. A. S.; Tonello, P. S.; Goveia, D. Fitorremediação de Solos Contaminados com Metais: Panorama Atual e Perspectivas de uso de Espécies Florestais. *Rev. Virtual Quim.*, 2019, 11 (1), 18-34.

Siqueira, J. O.; Franco, A. A. *Biotechnology of soil: fundamentals and prospects Brasília: Ministério da Educação. 235pp. 1998. (in Portuguese).*

Sivaguru, M.; Horst, W. J. The Distal Part of the Transition Zone Is the Most Aluminum-Sensitive Apical Root Zone of Maize. *Plant Physiology, Rockville*, v. 116, p. 155–163, 1998.

Smart, Richard E.; Bingham Gail, E. Estimativas rápidas do conteúdo relativo de água. *Fisiologia vegetal* , v. 53, n. 2, pág. 258-260, 1974.

Song, K.; Xue, Y.; Zheng, X.; Lev, W.; Qiao, H.; Qin, Q.; Yang, J. Effects of continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil. *science Rep.* 2017, 7, 1164.

Souto, A. D. L.; Cavalcante, L. F.; Diniz, B. L. M. T.; Mesquita, F. O.; Nascimento, J. A. M.; Lima Neto, A. J. Água salina e biofertilizante bovino na produção de frutos e alocação de biomassa em noni (*Morinda citrifolia* L.). *Revista Brasileira de Plantas Medicinai*s, 17, 340-349, 2015.

Souza, M. N. *Degradação e recuperação ambiental e desenvolvimento sustentável. Universidade Federal de Viçosa, 2004.*

Sridhar, B. B. M. et al. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea*). *Environmental and Experimental Botany*, v.54, n.2, p.131-141, 2005

Tahmasebi, P.; Taheri, M.; Gharaie, M. H. M. Poluição por metais pesados associada à atividade de mineração na região de Kouh-e Zar, NE do Irã. *Bull Eng Geol Environ* 79 , 1113–1123 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01574-3>

Taiz,L.; Zeiger, E. *Fisiologia Vegetal*. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 954p, 2013

Tisdale, S. I.; Nelson, W. I.; Beaton, J. D. *Soil fertility and fertilizers* 4.ed. New York: Macmillan, 1985. 754p.

Venturin, N.; Duboc, E.; Vale, F.R.; Davide, A.C. Fertilization of seedlings of *Copaifera langsdorffi* (Oil Copaiba). *Cerne* 2(2): 31-47. 1996.

Xu, H.; Vavilin, D.& Vermaas, W. Chlorophyll b can serve as the major pigment in functional photosystem II complexes of cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 98, n. 24, p. 14168-14173, 2001.
<https://dx.doi.org/10.1073%2Fpnas.251530298>

Wójcik, M.; Vangronsveld, J.; D'Haen, J.; Tukiendorf, A. Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens*. *Environmental and Experimental Botany* 53: 163-171, 2005.

Wong, M. H.. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50: 775–780, 2003.

APÊNDICE A

Tabela S1: Variáveis morfofisiológicas medidas nas plantas de *Dimorphandra exaltata* crescendo no solo e em rejeito da mineração de lítio e irrigadas ou sob déficit hídrico que não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$).

| Parâmetros | Substratos | | Regime hídrico | |
|----------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|
| | Solo | Rejeito de lítio | Irrigação | Déficit hídrico |
| Razão clorofila <i>a/b</i> | 5,52 ± 2,77 | 6,41 ± 2,38 | 6,22 ± 2,05 | 5,52 ± 2,56 |
| Diâmetro do caule | 2,6 ± 0,44 | 2,62 ± 0,49 | 2,54 ± 0,40 | 2,68 ± 0,49 |
| Área foliar total | 5,33 ± 3,9 | 5,78 ± 1,74 | 5,24 ± 3,52 | 5,74 ± 3,11 |
| Massa seca foliar | 0,24 ± 0,21 | 0,09 ± 0,07 | 0,12 ± 0,11 | 0,25 ± 0,22 |
| Área foliar média | 0,45 ± 0,23 | 0,64 ± 0,08 | 0,57 ± 0,25 | 0,48 ± 0,17 |
| Índice de área foliar | 4,28 ± 2,65 | 4,12 ± 1,33 | 2,85 ± 1,86 | 5,45 ± 1,77 |
| Razão área foliar | 10,81 ± 12,94 | 17,05 ± 8,45 | 16,09 ± 13,5 | 10,43 ± 9,6 |
| Área foliar específica | 42,87 ± 45,1 | 80,53 ± 41,9 | 70,28 ± 49,6 | 44,55 ± 42,7 |
| Conteúdo de água na folha | 62,19 ± 18,5 | 49,39 ± 8,65 | 48,95 ± 14,74 | 65,15 ± 14,7 |
| NPQ | 0,96 ± 2,28 | 0,84 ± 0,23 | 0,86 ± 0,33 | 0,96 ± 0,33 |