



**LARISSA DOS SANTOS**

**VIABILIDADE NO USO DO FERTILIZANTE  
ALTERNATIVO P4TREE® PARA O SUPRIMENTO DE  
FÓSFORO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE ESPÉCIES  
FLORESTAIS NATIVAS**

**LAVRAS - MG  
2024**

**LARISSA DOS SANTOS**

**VIABILIDADE NO USO DO P4TREE® PARA SUPRIMENTO DE FÓSFORO NA  
PRODUÇÃO DE MUDAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, com área de concentração em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Eduardo Gusmão Pereira  
Orientador

Prof<sup>ª</sup>: Dra. Juliana Cristina Tristão  
Coorientadora

**LAVRAS – MG  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha  
Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados  
informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos, Larissa dos.

Viabilidade no uso do fertilizante alternativo P4TREE®  
para o suprimento de fósforo na produção de mudas de  
espécies florestais nativas / Larissa dos Santos. - 2024.  
40p.

Orientador(a): Eduardo Gusmão Pereira.

Coorientador(a): Juliana Cristina Tristão.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade  
Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Fotossíntese. 2. Mata Atlântica. 3. Urina. I. Pereira,  
Eduardo Gusmão. II. Tristão, Juliana Cristina. III. Título.

**LARISSA DOS SANTOS**

**VIABILIDADE NO USO DO P4TREE® PARA SUPRIMENTO DE FÓSFORO  
NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS**

**FEASIBILITY OF USING P4TREE® FOR PHOSPHORUS SUPPLY IN THE  
PRODUCTION OF NATIVE FOREST SEEDLINGS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, com área de concentração em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA, em 9 de agosto de 2024

Dra. Juliana Cristina Tristão – UFV  
Dr. Marcelo Pedrosa Gomes – UFPR

Prof. Dr. Eduardo Gusmão Pereira  
Orientador

Prof<sup>ª</sup>: Dra. Juliana Cristina Tristão  
Coorientadora

**LAVRAS  
2024**

## AGRACIMENTOS

Felizmente tenho o privilégio de contar com a minha mãe e minha irmã na minha jornada de vida e por isso agradeço imensamente a elas pela oportunidade dada para que eu pudesse escolher o que me fazia feliz, mesmo elas não compartilhando da mesma opinião.

Agradeço a minha psicóloga por todo o suporte em dias difíceis e delicados, e principalmente ao preparo emocional que me possibilitou seguir no meu sonho e enfrentar as adversidades que surgem no dia-dia.

Agradeço a Ada, Bianca, Josias, Isadora e Camilla, os poucos amigos que tenho e pude contar em vários os momentos da minha vida, principalmente quando me deram forças para continuar e finalizar o mestrado.

Agradeço imensamente ao meu orientador pela paciência, persistência e esperança que iria dar certo, mesmo quando nosso experimento colapsou. Ao Gusmão, agradeço por me mostrar como lidar com frustrações, como gerenciar pessoas e, principalmente, como a caminhada pelo conhecimento é longa e dura, mas sempre vale a pena. Agradeço a ele por ter acreditado em mim ao longo desses anos juntos e me dando inúmeras oportunidades que eu mesma achava não ser possível.

Agradeço ao LASP por esses anos juntos, foi um lugar onde aprendi muito sobre ciências, vida, pessoas e o mundo acadêmico. Foi um espaço onde pude errar e aprender. Agradeço também aos membros dos laboratórios GRUTAM e QUITAM, pelo desenvolvimento, fornecimento e manuseio do P4TREE® e também a empresa Pedras Congonhas, na pessoa do Dr. Ottávio Carmignano.

Agradeço as pessoas que conheci ao longo do mestrado e ao programa de pós-graduação em Fisiologia Vegetal da UFLA, por me dar subsídio para concluir. Agradecimento especial para a Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela oportunidade, estrutura, exigência e competência para desenvolvimento e conclusão do mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro do projeto da Rede Refert, na qual esta dissertação está inserida.

Muito obrigada!

*“A vida é longa e repleta de um número infinito de decisões. Meu destino irá me encontrar”*

## RESUMO

Os fertilizantes fosfatados alternativos vêm ganhando destaque na pesquisa científica devido a necessidade de aproveitamento dos nutrientes de forma sustentável. O P4TREE® é uma nova tecnologia de adsorção de fósforo (P) derivado do contato do serpentinito modificado com a urina humana, com potencial para ser utilizada como fertilizante na produção de mudas florestais destinadas à recuperação de áreas degradadas. Nossos objetivos foram: (i) avaliar desenvolvimento das espécies nativas da Mata Atlântica, *Parapiptadenia rigida* (Bentham) Brenan e *Peltophorum dubium* (spreng.) Taub, em diferentes doses de P; (ii) determinar o melhor método de aplicação do P4TREE®, bem como avaliar sua ecotoxicidade; (iii) avaliar a viabilidade do P4TREE® no fornecimento de P e na melhoria do estado nutricional das espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica. No primeiro experimento em casa de vegetação, plântulas das espécies arbóreas foram adubadas com diferentes doses de P (sem adição de P – MAP 0%; MAP 25%; MAP 50% e MAP 100%). Após os testes de dessorção do P presente no P4TREE®, fizemos um ensaio ecotoxicológico para avaliar a possível toxicidade e determinar qual o melhor método de aplicação do P4TREE®. A partir desses resultados fizemos um novo experimento com a aplicação de P4TREE® sólido incorporado ao substrato. Ambas as espécies apresentaram baixo requerimento nutricional. As doses de P não influenciaram nos aspectos morfofuncionais, concentração de P nos tecidos vegetais, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* avaliados. A dessorção do P4TREE® em solução de NaOH, resultou na liberação de 10 mg P L<sup>-1</sup> de solução. Entretanto, o P4TREE® em solução de NaOH inibiu a germinação das sementes e acarretou em morte das mudas das espécies nativas quando aplicado via fertirrigação. Observamos que a melhor opção de uso é a aplicação do P4TREE® sólido incorporado no substrato. Entretanto, ambas as espécies tiveram crescimento comprometido quando a fonte de P foi o P4TREE®, o que não ocorreu com o uso do serpentinito. *P. dubium* apresentou maior sensibilidade ao P4TREE® do que *P. rigida*, resultando em menor altura, área foliar, diâmetro, taxa fotossintética e rendimento quântico máximo do fotossistema II. Concluímos que o P4TREE® afetou negativamente o crescimento do *P. dubium*, mas não afetou a área foliar, altura, diâmetro, massa seca da folha e colmo da espécie *P. rigida*. Contudo, quando utilizamos o serpentinito, o *P. dubium* apresentou melhores características morfofuncionais, indicando que possivelmente há algum componente presente na urina e/ou no processo de formação do P4TREE® que possa estar causando uma fitotoxicidade. Nosso trabalho sugere que investigações adicionais do P4TREE® como fonte de P, devem avaliar o tempo de exposição a urina e o controle do pH alcalino.

**Palavras-chave:** economia circular; fotossíntese; Mata Atlântica; sustentabilidade; urina.

## ABSTRACT

Alternative phosphate fertilizers have been gaining prominence in scientific research due to the need for sustainable nutrient utilization. P4TREE<sup>®</sup> is a novel phosphorus (P) adsorption technology derived from modified serpentinite interacting with human urine, with potential application as a fertilizer for forest seedlings aimed at restoring degraded areas. Our objectives were: (i) to assess the development of native species from the Atlantic Forest, *Parapiptadenia rigida* (Bentham) Brenan and *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub, under different P doses; (ii) to determine the optimal method of P4TREE<sup>®</sup> application and evaluate its ecotoxicity; (iii) to evaluate the feasibility of P4TREE<sup>®</sup> in supplying P and improving the nutritional status of native Atlantic Forest tree species. In the first greenhouse experiment, seedlings of tree species were fertilized with different P doses (no added P - MAP 0%; MAP 25%; MAP 50%; and MAP 100%). Following desorption tests, an ecotoxicological assay was conducted to assess potential toxicity and determine the best P4TREE<sup>®</sup> application method. Based on these results, a subsequent experiment was conducted using solid P4TREE<sup>®</sup> incorporated into the substrate. Both species exhibited low nutritional requirements. P doses did not influence morphofunctional aspects, P concentration in plant tissues, gas exchange, or chlorophyll a fluorescence as evaluated. Desorption of P4TREE<sup>®</sup> in NaOH solution released 10 mg P L<sup>-1</sup> of solution. However, P4TREE<sup>®</sup> in NaOH solution inhibited seed germination and led to death of native seedlings when applied via fertigation. Solid P4TREE<sup>®</sup> incorporated into the substrate was found to be the optimal application method. However, both species exhibited compromised growth when P4TREE<sup>®</sup> was the P source, contrasting with serpentinite. *P. dubium* showed higher sensitivity to P4TREE<sup>®</sup> than *P. rigida*, resulting in reduced height, leaf area, diameter, photosynthetic rate, and maximum quantum yield of photosystem II. We concluded that P4TREE<sup>®</sup> negatively affected *P. dubium* growth but did not affect leaf area, height, diameter, leaf dry mass, and stem dry mass of *P. rigida*. However, when serpentinite was used, *P. dubium* exhibited better morphofunctional characteristics, suggesting that components in urine and/or the P4TREE<sup>®</sup> formation process may cause phytotoxicity. Our findings suggest that further investigations into P4TREE<sup>®</sup> as a P source should consider urine exposure time and control of alkaline pH.

**Keywords:** Atlantic Forest; circular economy; photosynthesis; sustainability; urine.



## INDICADORES DE IMPACTO

A tecnologia P4TREE<sup>®</sup> tem a premissa de absorver fósforo (P) da urina humana e ser utilizado como uma fonte alternativa de P na produção de espécies arbóreas nativas. Esta tecnologia é uma alternativa para reutilização dos P presente na urina humana, evitando o acúmulo de P em corpos d'água e, conseqüentemente, evitando a eutrofização da água. O P4TREE<sup>®</sup> está inserido no projeto RedeFert, que tem por objetivo desenvolver novas tecnologias em fertilizantes sustentáveis para diferentes sistemas de produção, com a proposta de abordar tecnologias para transformação química de fontes alternativas de nutrientes, como o nitrogênio, fósforo, magnésio, cálcio e zinco. O desenvolvimento desse projeto contribuiu para as investigações iniciais dos métodos de aplicação do P4TREE<sup>®</sup> e concluir como potencial fonte alternativa de P. A produção do P4TREE<sup>®</sup> teve grande impacto social pois a urina utilizada foi coletada no carnaval de 2019, tendo a contribuição dos foliões e também a divulgação do produto e pesquisa. Outra vertente de impacto social e econômico atingido com esse trabalho, foi concluir que as espécies arbóreas nativas utilizadas no experimento não são exigentes nutricionalmente de P, podendo haver redução na quantidade de fertilizante fosfatado utilizado na fertirrigação de viveiros nativos. Essa dissertação traz resultados que contribuem para novas investigações sobre o P4TREE<sup>®</sup> visando uma produção sustentável de fertilizantes e contribuindo para um uso eficiente e reutilização de P que são excretados ao meio ambiente.

## IMPACT INDICATORS

The P4TREE<sup>®</sup> technology is based on the premise of absorbing phosphorus (P) from human urine to be used as an alternative source of P in the production of native tree species. This technology provides an alternative for reusing the P present in human urine, preventing the accumulation of P in water bodies and consequently avoiding water eutrophication. P4TREE<sup>®</sup> is part of the RedeFert project, which aims to develop new technologies in sustainable fertilizers for different production systems, focusing on technologies for the chemical transformation of alternative nutrient sources such as nitrogen, phosphorus, magnesium, calcium, and zinc. The development of this project has contributed to the initial investigations of P4TREE<sup>®</sup> application methods and confirmed its potential as an alternative source of P. The production of P4TREE<sup>®</sup> had a significant social impact, as the urine used was collected during the 2019 carnival, with contributions from revelers and also raising awareness about the product and research. Another aspect of social and economic impact achieved through this work was the conclusion that the native tree species used in the experiment are not nutritionally demanding in terms of P, which could lead to a reduction in the amount of phosphated fertilizer used in the fertigation of native nurseries. This dissertation presents results that contribute to further investigations on P4TREE<sup>®</sup>, aiming for sustainable fertilizer production and promoting efficient use and reuse of P that is excreted into the environment.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
2.1. O FÓSFORO EM PLANTAS .....	12
2.2. FERTILIZANTES ALTERNATIVOS .....	13
2.3. URINA HUMANA COMO FERTILIZANTE .....	14
2.4. TECNOLOGIA P4TREE® .....	14
2.5. ESPÉCIES ARBÓREAS.....	15
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	17
3.1. ESPÉCIES VEGETAIS E CONDIÇÕES DE CULTIVO .....	17
3.2. AVALIAÇÃO DOS REQUERIMENTOS NUTRICIONAIS DAS ESPÉCIES NATIVAS E FERTIRRIGAÇÃO .....	17
3.3. OBTENÇÃO DO P4TREE® E CARACTERIZAÇÃO.....	18
3.4. QUANTIFICAÇÃO DO P DISPONÍVEL APÓS A DESSORÇÃO E TESTE ECOTOXICOLÓGICO .....	18
3.5. ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM APLICAÇÃO DO P4TREE® EM ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA .....	20
3.6. VARIÁVEIS FOTOSSINTÉTICAS .....	20
3.7. ATRIBUTOS MORFOFUNCIONAIS .....	21
3.8. CONCENTRAÇÃO DE P NAS FOLHAS E RAÍZES.....	22
3.9. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	22
<b>4. RESULTADOS</b> .....	23
4.1. DOSES CRESCENTE DE MAP (%) .....	23
4.2. VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO P4TREE® E SERPENTINITO.....	27
4.3. INCORPORAÇÃO DO P4TREE® E SERPENTINITO AO SUBSTRATO .....	28
<b>5. DISCUSSÃO</b> .....	35
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	38
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

A interferência humana vem afetando a distribuição natural, biomassa, biodiversidade e endemismo da Mata Atlântica, bioma brasileiro considerado um dos maiores hotspots da biodiversidade mundial (DE LIMA et al., 2020). A estratégia de recuperação de áreas degradadas da Mata Atlântica pode variar de acordo com a resiliência do ecossistema, histórico da área e contexto da paisagem. A estratégia ativa consiste na intervenção humana utilizando o método de plantio de mudas para acelerar o processo de restauração ambiental (HOLL; AIDE, 2011). A produção dessas mudas ocorre em viveiros nativos que utilizam de manejos agronômicos para melhorar a qualidade e aclimatação em campo. O uso de fertilizantes na produção é uma das etapas do processo de manejo, sendo utilizado principalmente fertilizantes minerais fosfatados.

Os fertilizantes fosfatados provêm da rocha fosfática, sendo um material não renovável e com distribuição desproporcional em todo o mundo, onde as maiores reservas estão localizadas no Marrocos e no Saara Ocidental. Esse monopólio de exportação é muito crítico, pois o fornecimento de fósforo (P) fica sujeito às instabilidades do mercado e conflitos geopolíticos (ANLAUF, 2023). O Brasil é altamente dependente da importação de fertilizantes fosfatados e, segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), no período de janeiro a abril de 2024, o país importou cerca de 10.035 toneladas de fertilizantes intermediários (Pesquisa Setorial – ANDA, 2024).

Buscando minimizar a dependência externa do Brasil em relação à disponibilidade e preço de fertilizantes importados, em 2021 o Governo Federal criou o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF). O PNF tem como premissa “fortalecer políticas de incremento da competitividade da produção e da distribuição de fertilizantes no Brasil de forma sustentável” - Decreto nº 10.605, de 22 de janeiro de 2021. Dentre as diretrizes propostas pelo PNF, podemos destacar: a busca em estimular e ampliar a pesquisa em fontes competitivas de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , para reduzir a dependência da importação; competição de diferentes fontes e origens de matérias-primas, fertilizantes e nutrientes destinados à agropecuária nacional; estimular e promover a capacitação de recursos humanos para atuar nas áreas de pesquisas, desenvolvimento, mineração, produção, transformação e outros ramos relacionados à nutrição de plantas, de forma a contribuir com a competitividade do Brasil no setor; e estimular a inovação de produtos e tecnologias visando novas fontes de nutrientes para as plantas de maneira diversa, competitiva e sustentável (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, 2022).

Algumas fontes alternativas de fertilizantes fosfatados vêm sendo estudadas com o objetivo de buscar uma gestão sustentável do uso de P. A urina humana possui cerca de  $0,7 \text{ g L}^{-1}$  de P (PRADHAN; HOLOPAINEN; HEINONEN-TANSKI, 2009), por isso alguns fertilizantes alternativos que utilizam a urina humana têm por objetivo fazer uma reciclagem do P presente nesse resíduo para que possa ser aproveitado como insumo agrícola, visto que normalmente são descartados diretamente ao meio ambiente, gerando contaminação ambiental (HARDER et al., 2019; MARTIN et al., 2020; RANIRO et al., 2023). A tecnologia P4TREE<sup>®</sup> tem o propósito de adsorver P da urina humana e ser aplicado como fonte alternativa de P. O material utilizado para a síntese do P4TREE<sup>®</sup> é o serpentinito, uma rocha que possui propriedades de adsorção de metais após tratamento térmico e é composta pelos minerais lizardita, talco e magnetita (CARMIGNANO et al., 2020; FERREIRA et al., 2019).

Em um estudo anterior com aplicação do P4TREE<sup>®</sup> como fonte alternativa de P, Moreira (2022) concluiu que a tecnologia é capaz de disponibilizar P no solo e as plantas conseguiram absorver esse nutriente. Entretanto, a alta basicidade do material interferiu no desenvolvimento das espécies florestais estudadas (MOREIRA, 2022). Contudo, não foram apresentados resultados conclusivos sobre o teste de ecotoxicidade, a viabilidade do uso do P4TREE<sup>®</sup> na fertirrigação e o seu impacto sobre a fisiologia de espécies vegetais nativas da Mata Atlântica.

Este trabalho tem como objetivos: (i) avaliar desenvolvimento das espécies nativas da Mata Atlântica, *Parapiptadenia rigida* (Bentham) Brenan e *Peltophorum dubium* (spreng.) Taub, em diferentes doses de P; (ii) determinar o melhor método de aplicação do P4TREE<sup>®</sup>, bem como avaliar a ecotoxicidade; (iii) avaliar a viabilidade do P4TREE<sup>®</sup> no fornecimento de P e na melhoria do estado nutricional das espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica. Nossa hipótese propõe que o P disponibilizado pelo P4TREE<sup>®</sup> supre parcialmente a demanda nutricional de ambas as espécies da família Fabaceae, obtendo valores de altura, comprimento da raiz, diâmetro do colmo, área foliar, trocas gasosas, fluorescência, teores de clorofila e quantidades de P em níveis semelhantes as plantas que foram fertirrigadas com fertilizante comercial.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. O FÓSFORO EM PLANTAS

Um dos macronutrientes mais exigidos no crescimento e desenvolvimento das plantas é o fósforo (P), sendo vital para o desenvolvimento e essencial na composição da estrutura de membranas, divisão celular, fotossíntese, respiração, síntese de biomoléculas e formação de moléculas de alta energia (MALHOTRA et al., 2018). As raízes das plantas absorvem P por difusão, mas a sua disponibilidade na solução do solo varia de acordo com a dessorção e pH, concentração de metais e ânions, fontes de P (BARROW; HARTEMINK, 2023; HINSINGER, 2001; MALHOTRA et al., 2018) e tipo de solo (HOLZ et al. 2020). O P chega até o xilema pela via simplástica e requer um transporte ativo do xilema até o vacúolo, principal local de armazenamento de fosforo inorgânico (Pi) na célula (ULLRICH; NOVACKY, 1990). O P é um nutriente móvel nas plantas, sendo redirecionado como Pi das folhas mais velhas para as folhas jovens. No entanto, a concentração de Pi depende do pH do compartimento celular, forma química e a propriedade funcional do P (MALHOTRA et al., 2018). A alocação do Pi nas partes vegetais e o consumo do Pi armazenado no vacúolo celular, varia de acordo com o estágio de crescimento e disponibilidade do P no ambiente para absorção radicular, sendo necessária para uso eficiente de P na manutenção das taxas fotossintéticas e intermediários fotossintéticos, como os mRNAs e compostos do Ciclo de Calvin-Benson-Bassaham (HAN; WHITE; CHENG, 2022).

Em regiões empobrecidas de Pi disponível para a absorção radicular, as plantas desenvolvem estratégias que permite melhor aquisição de P, manutenção e mobilização interna, como forma adaptativa para manter o crescimento e reprodução (DISSANAYAKA et al., 2021). A melhor aquisição de Pi do solo pode ocorrer devido as respostas locais referente a alteração na arquitetura radicular com aumento de pelos radiculares, maior afinidade com transportadores de Pi do solo, secreção de compostos mobilizadores de P pelas raízes como a atividade das enzimas fosfatases (SHEN et al., 2011) e, por respostas sistêmicas como a melhor eficiência de uso do P interno, melhorando a aquisição, reciclagem e mobilização do P dentro da planta, permitindo um equilíbrio nutricional interno ao todo da planta (CHIEN et al., 2018; ISIDRA-ARELLANO; DELAUX; VALDÉS-LÓPEZ, 2021).

A alocação de P na planta pode variar de acordo com a disponibilidade P no solo, podendo influenciar nas frações de P foliar, massa foliar por área (CHIERA; THOMAS; RUFTY, 2002), eficiência fotossintética no uso de P (HIDAKA; KITAYAMA, 2013) e na

quantidade de amido e sacarose foliar (LIU et al., 2021). O P foliar pode ser dividido funcionalmente como: P metabólico; P de ácido nucleico; P estrutural e P residual (MO et al., 2019). Em áreas degradadas, onde a disponibilidade de P no solo é baixa, as plantas podem apresentar P metabólico em maiores concentrações devido a importância dos seus componentes no ciclo de Calvin-Benson-Bassham e manutenção de taxas altas de fotossíntese (MO et al., 2019).

As plantas possuem mecanismos de alocação de P foliar que podem variar de acordo com disponibilidade deste nutriente no solo e o tipo de espécie vegetal (GUILHERME PEREIRA et al., 2018). Essa alocação de P em diferentes partes da folha nos permite compreender estratégias utilizadas pela planta relacionada com a reprodução, crescimento e tolerância ao estresse, em solos empobrecidos de P (HIDAKA; KITAYAMA, 2011).

## **2.2. FERTILIZANTES ALTERNATIVOS**

O P é aplicado no solo através dos fertilizantes fosfatados. Normalmente, uma pequena parte do que foi aplicado fica disponível para suprir as necessidades da planta e por isso os fertilizantes fosfatados são aplicados no solo em quantidade acima da real necessidade da cultura. Isso ocorre devido a fixação do P na fração não lábil do solo e por possíveis perdas por lixiviação (EL ATTAR et al., 2022).

No entanto, os fertilizantes fosfatados são originados de rochas fosfáticas e o tempo de vida útil dessas reservas é muito discutido pelos pesquisadores. Estima-se que nos próximos 50 a 100 anos as reservas irão se esgotar, levando ao ápice da demanda de fósforo e ameaçando a segurança alimentar (CORDELL; WHITE, 2011).

Desta forma, tornou-se uma preocupação global buscar fontes de P que possam ser utilizadas como fertilizantes de forma equivalente ou superior aos métodos tradicionais. Podemos citar o uso de biochar (CARNEIRO et al., 2021); escória siderúrgica (YU et al., 2022); fertilizante organomineral a base de cama de frango (DE MELO BENITES et al., 2022) e urina (MARTIN et al., 2023). O uso da urina como fertilizante foi bastante significativa na redução dos impactos que podem ser causados no ambiente, mas em contrapartida, a volatilização da amônia e o alto consumo de eletricidade são os pontos críticos (MARTIN et al., 2023). Destacamos aqui a importância da investigação do uso do P4TREE® como adsorvente de P da urina humana e seu alto potencial como fonte alternativa de P.

### 2.3. URINA HUMANA COMO FERTILIZANTE

A economia circular contribui para reduzir o impacto do crescente desequilíbrio entre a demanda social e a quantidade de água disponível. O tratamento de efluentes para reutilização da água e dos nutrientes dissolvidos faz parte da etapa crítica da economia circular da água, que visa aumentar a vida útil dos processos de uso, reuso e recuperação (UDAYABHASKAR et al., 2022). Na maioria das vezes, a urina é diluída em águas residuais e descartadas em corpos d'água, causando poluição ambiental (MARTIN et al., 2020).

Embora a urina humana represente uma pequena parte das águas residuais, ela possui alta concentração de nutrientes que podem ser utilizados como fonte alternativa de fertilizantes agrícolas (KARAK; BHATTACHARYYA, 2011b; ZUO et al., 2023). A maior parte da urina humana é composta por nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Para evitar o descarte desses nutrientes com importância agrícola, são feitos alguns tratamentos nos efluentes como: acidificação, alcalinização, nitrificação, mistura de substratos orgânicos sólidos e precipitação de P como estruvita (MARTIN et al., 2020).

A precipitação da estruvita é a principal forma de extração de P da urina, sendo muito utilizada no Japão para tratamento de efluentes (UENO; FUJII, 2010). A estruvita é um ortofosfato, composta por amônio e fosfato em concentrações molares iguais (BASSETT; BEDWELL, 1933). A estruvita consiste em um precipitado formado pela supersaturação de Mg e remoção de CO<sub>2</sub> da solução, em pH 6,5-8,5 (KORCHEF et al., 2022). No entanto, este processo de formação da estruvita é caro e deve ser buscado alternativas de recuperação de P em efluentes (THANT ZIN; KIM, 2021).

### 2.4. TECNOLOGIA P4TREE<sup>®</sup>

Em busca de obter novas aplicações para o serpentinito extraído de sua mina, a empresa Pedras Congonhas, a empresa Brandt Meio Ambiente e os pesquisadores do Grupo de Tecnologias Ambientais (GRUTAM), sob orientação do professor Rochel Lago, do Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), desenvolveram a tecnologia P4TREE<sup>®</sup> (MOREIRA, 2022)

O objetivo do desenvolvimento do P4TREE<sup>®</sup> é que ele fosse um material capaz de adsorver P de efluentes industriais ou domésticos. Desta forma, vários testes foram desenvolvidos no GRUTAM para determinar a composição adequada de P4TREE<sup>®</sup> para maior capacidade adsortiva de fosfato (MOREIRA, 2022).

A primeira aplicação da tecnologia foi feita em 2018, quando a Empresa Municipal de Turismo de Belo Horizonte S/A (Belotur) teve interesse em firmar parceria com a UFMG para testar o produto. A aplicação ocorreu durante o Carnaval de Belo Horizonte, onde conduziram os testes com um plano de trabalho intitulado “Composição para Adsorção de Fósforo e/ou Nitrogênio de Efluentes Líquidos, Processos, Produtos e Usos” e “Sistema Capturador de Nutrientes da Urina”. Neste mesmo ano, o P4TREE<sup>®</sup> foi apresentado ao Jardim Botânico da Fundação de Parques Municipais e Zoobotânica (FPMZB), com o intuito de se realizar testes na produção de plantas. Em 2019, a parceria entre FPMZB e a UFMG resultou em uma autorização que permitia a FPMZB realizar teste para a produção de mudas florestais utilizando o P4TREE<sup>®</sup>, intitulado como “Termo de Autorização para Teste de Tecnologia obtida de Patente” (CRUVINEL; SANTOS; BOFFA, 2020; MOREIRA, 2022).

Devido à pandemia do COVID-19, não foi realizada aplicações do P4TREE<sup>®</sup> em 2021. Em 2023, com o intuito de se realizar novos testes com o P4TREE<sup>®</sup>, nós do Laboratório de Fisiologia do Estresse Abiótico (LASP), UFV/CAF, sob orientação do professor Dr. Eduardo Gusmão Pereira, em parceria com o GRUTAM, recebemos autorização para fazer testes do P4TREE<sup>®</sup> com espécies nativas da Mata Atlântica. O material enviado para ser utilizado nessa dissertação não foi caracterizado, por isso não sabemos a composição do material e a quantidade de fósforo total.

## 2.5. ESPÉCIES ARBÓREAS

### Angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida*)

O angico-vermelho é uma espécie da família Fabaceae-Mimosoideae, é uma planta decídua, heliófita, pioneira. Ocorre em matas abertas, menos densas e secundárias. Possui folhas compostas e paripinadas, com 3 a 9 pares de pinas opostas. Possui folíolos sésseis de 10 mm de comprimento e pecíolo com 4cm de comprimento. Ocorre em vários tipos de solos, sendo mais abundante em solos bem drenados. Possui vagem com sementes viáveis e não apresentam dormência. A produção de mudas ocorre com o semeio diretamente no recipiente e a emergência pode ocorrer entre 5 a 10 dias, após o semeio. O seu desenvolvimento em campo é rápido (CARVALHO, 2003; LORENZI, 1992).

### Canafístula (*Peltophorum dubium*)

A canafístula é uma espécie da família Fabaceae-Caesalpinoideae, é uma planta decídua, heliófita, pioneira. Possui folhas compostas, bipinadas e cor verde-escura. Possui



flores amarelo-vivas ou alaranjadas, com até 2 cm de comprimento. Ocorre em solos argilosos úmidos e profundos de beira de rios, ocorre em floresta primária densa e em formações secundárias. Floresce durante os meses de dezembro-fevereiro. Possui vagens com sementes, as sementes apresentam dormência tegumentar, podendo ser superada por escarificação mecânica, corte do tegumento na região oposta à de emergência da radícula ou corte do tegumento na região radicial. Para a produção de mudas, as sementes são semeadas diretamente nos recipientes, sua emergência pode ocorrer entre 15 a 30 dias após o semeio. Possui desenvolvimento rápido (CARAVALHO, 2003; LORENZI, 1992)

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. ESPÉCIES VEGETAIS E CONDIÇÕES DE CULTIVO

Os experimentos foram realizados em casa de vegetação do Instituto de Ciências Biológicas, na Universidade Federal de Viçosa, campus Florestal. Foram utilizadas espécies da família Fabaceae, sendo mudas de angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida* (Benth) Brenan) e canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub), fornecidas pela empresa Da Serra Reflorestamento LTDA. Ambas as espécies possuem crescimento rápido, nativas da Mata Atlântica e utilizada em área de reflorestamento ambiental.

A condução de desenvolvimento das mudas seguiu o padrão estabelecido na empresa. As plântulas das espécies vieram com o primeiro par de folhas desenvolvidos e em bandejas de plugs. Após uma semana em plugs, foram transplantadas em tubetes de 180 cm<sup>3</sup>. O substrato Carolina II Classe V CE 0,7 foi utilizado para o semeio das espécies. É composto por turfa de *Sphagnum*, vermiculita expandida, calcário dolomítico, gesso agrícola e fertilizante NPK (traços); potencial hidrogeniônico (pH): 5,5 +/- 0,5; Condutividade elétrica (CE): 0,7 +/- 0,3; densidade: 145 kg m<sup>-3</sup>; capacidade de retenção de água (CRA): 55%; umidade máxima: 50%; reatividade: produto estável e inerte, não tóxico e sólido.

#### 3.2. AVALIAÇÃO DOS REQUERIMENTOS NUTRICIONAIS DAS ESPÉCIES NATIVAS E FERTIRRIGAÇÃO

As plântulas transplantadas em tubetes de 180 cm<sup>3</sup> foram aclimatadas por 30 dias, sob sombrite 50% e em seguida iniciou-se a fertirrigação com as diferentes doses de fosfato monoamônico (MAP), compondo os tratamentos MAP0% (sem adição de P), MAP25%, MAP50% e MAP100%. A quantidade de MAP variou de acordo com os tratamentos, sendo estimado por tubete 0,19 g para a dose de 25% de MAP, 0,38 g para a dose de 50% de MAP e 0,76 g para a dose de 100% de MAP.

O volume de solução utilizado na fertirrigação foi determinado a partir da capacidade de campo. A capacidade de campo foi feita com quatro repetições, pelo método do funil. Inicialmente, foi determinado a massa do substrato (47,27 g), a partir dessa quantidade foram separadas quatro amostras de massa conhecida (10 g) e um volume de água conhecido (50 mL). Todo o volume de água foi vertido sobre o substrato que estava no funil e após 15 minutos, foi verificado o volume final na proveta. Desta forma, foi possível determinar o volume de água que ficou retido no substrato. Foi feita uma média entre as repetições e

determinado o volume de solução nutritiva que devemos utilizar em cada tubete. Considerando a capacidade de campo, foi estimado um volume de 140 mL de solução nutritiva por tubete e ao todo cerca de 14 L de solução.

Além do MAP, as fontes dos demais nutrientes foram os fertilizantes comerciais e as soluções nutritivas foram compostas por: sulfato de amônia, uréia, cloreto de potássio, sulfato de magnésio e nitrato de cálcio. Por tubete, foi estimado cerca de 0,3 g de sulfato de amônia; 0,14 g de uréia; 0,14 g de cloreto de potássio; 0,22 g de sulfato de magnésio e 0,16 g de nitrato de cálcio. A determinação da quantidade de cada fertilizante foi feita de acordo com as quantidades utilizadas no viveiro Da Serra Reflorestamento LTDA, empresa parceira responsável pelo fornecimento das mudas. O pH de todas as soluções foram aferidos entre 5,5-6,5. A fertirrigação teve duração de 61 dias, sendo aplicada três vezes na semana. A irrigação foi feita diariamente, de acordo com a necessidade da planta.

### **3.3. OBTENÇÃO DO P4TREE® E CARACTERIZAÇÃO**

O material utilizado por Moreira (2022) e fornecido pelo Grupo de Tecnologias Ambientais (GRUTAM) já havia passado pelo processo de contato com a urina. A implantação da tecnologia P4TREE® ocorreu no carnaval de 2020, em 110 banheiros químicos durante 4 dias. A instalação do P4TREE® foi feita uma hora antes do início do fluxo de pessoas e a coleta foi feita após não haver mais uso dos banheiros, não foi possível determinar o volume e tempo em que o material ficou exposto a urina. Todos os saches retirados foram colocados em bombas de 50 L e levados ao laboratório para esterilização. A esterilização foi realizada com a aplicação de hipoclorito de sódio, deixando todos os saches submersos. Após o contato com o hipoclorito de sódio, ocorreu a esterilização térmica a 120°C por 72 horas. Em seguida, os saches foram lavados em água corrente para remoção do hipoclorito de sódio e, quando totalmente secos, foram levados para a empresa Pedras Congonhas para trituração até a formação de um pó, utilizado nos experimentos.

### **3.4. QUANTIFICAÇÃO DO P DISPONÍVEL APÓS A DESSORÇÃO E TESTE ECOTOXICOLÓGICO**

Para determinar a quantidade de P disponível para ser utilizado na fertirrigação, foram feitos testes prévios de dessorção com água, HCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>), NaOH (1,0 mol L<sup>-1</sup>), KCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>) (ALMANASSRA et al., 2021; LI et al., 2016) e fósforo solúvel em ácido cítrico 2%, método espectrofotométrico do ácido molibdovanadofosfórico (MAPA, 2017). Todos os testes

foram feitos em triplicata. O teste de dessorção utilizando o NaOH ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ) foi o que apresentou melhor dessorção de fósforo para a solução.

Para o teste de dessorção com NaOH ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ), foi adicionado 0,5 g de amostra de P4TREE® em 50 mL de solução de NaOH ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ) e agitado, por 24 horas em 150 rpm à  $25^\circ\text{C}$ . Após esse período, 15 mL da amostra foi centrifugada por 10 minutos, a 3600 rpm (BAIRD et al., 2017). Em seguida, o sobrenadante foi coletado por uma seringa de 20 mL e filtrada, utilizando filtro MicroLab Scientific Sterile Syringe Filter, poro tamanho  $22 \mu\text{m}$  e diâmetro de 3 mm. Para que a determinação de quantidade de P disponível estivesse dentro da curva de calibração, foi necessário fazer a diluição de quatro vezes da amostra. Por isso, em um balão de 10 mL, foram adicionados 2,5 mL da amostra,  $\frac{3}{4}$  do balão foi preenchido com HCl ( $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ), adicionado 1,5 mL da solução colorante e completado o volume do balão com HCl ( $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ). A sequência estabelecida é de extrema necessidade, porque quando o ácido é adicionado após a solução colorante não é possível identificar a concentração de fósforo disponível, pois a solução permanece translúcida. Da mesma forma, quando utilizamos ácido clorídrico de concentração diferente da mencionada, também não conseguimos realizar a leitura.

Para determinação do P na solução de NaOH, foi utilizado a solução colorante azul de molibdato (100 mL) composta por: 50 mL de ácido sulfúrico ( $2,59 \text{ mol L}^{-1}$ ); 5 mL de solução de tartarato de antimônio e potássio ( $0,041 \text{ mol L}^{-1}$ ); 15 mL de molibdato de amônio ( $0,032 \text{ mol L}^{-1}$ ) e 30 mL de solução de ácido ascórbico ( $0,099 \text{ mol L}^{-1}$ ). A curva padrão foi feita utilizando quatro pontos, sendo eles  $0 \text{ mg L}^{-1}$  de P;  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de P;  $2 \text{ mg L}^{-1}$  de P e, sucessivamente até  $6 \text{ mg L}^{-1}$  de P. A leitura foi feita em espectrofotômetro, absorvância 880 nm. A dessorção do P4TREE® em solução de NaOH, resultou na liberação de  $10 \text{ mg P L}^{-1}$  de solução.

No teste ecotoxicológico foram dispostas vinte sementes de alface (*Lactuca sativa*) sobre o papel germitest na placa de Petri, com cinco repetições em cada tratamento. Foram cinco tratamentos, sendo composto por: T1 – controle, T2 – MAP, T3 – P4TREE® líquido (após dessorção), T4 – Serpentinó e T5 – P4TREE® sólido em contato com urina (sem dessorção). A quantidade de MAP utilizado no teste ecotoxicológico foi referente ao MAP 100% ( $181 \text{ mg P}$ ) e o P4TREE® líquido foi após a dessorção com NaOH ( $10 \text{ mg P}$ ). O teste foi realizado por nove dias em incubadora refrigerada BOD, fotoperíodo de doze horas e temperatura constante de  $25^\circ\text{C}$ .

### 3.5. ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM APLICAÇÃO DO P4TREE® EM ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA

Para montagem do experimento com aplicação do P4TREE® em fertirrigação a partir da solução em NaOH, as plântulas foram cultivadas da mesma forma descrita anteriormente (tópicos 3.1 e 3.2). O transplântio ocorreu após o período de aclimação de 45 dias dentro da casa de vegetação, coberto com sombrite devido a diferença de temperatura entre o local de origem e o local definitivo. A irrigação foi feita diariamente de acordo com a necessidade da planta. As aplicações do P4TREE® e do MAP foram feitas por fertirrigação, em que os demais sais foram diluídos nas respectivas soluções. O pH do P4TREE® foi corrigido testando dois ácidos, HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> foi adicionado em menor quantidade e por isso foi escolhido para a neutralização. Foram estabelecidos os seguintes tratamentos: sem adição de P; MAP (181 mg P); P4TREE® (10 mg P); MAP (10 mg P) e P4TREE® + MAP (181 mg P).

Um segundo experimento foi montado com a aplicação do P4TREE® sólido diretamente no substrato de cultivo, no momento em que as plantas das bandejas de plugs foram passadas para os tubetes. O experimento foi composto por três tratamentos, sendo: MAP100%; P4TREE® sólido e Serpentinó. Nos tratamentos P4TREE® sólido e Serpentinó foram adicionados 62,5g de P4TREE® ou de serpentinó no momento do transplântio. Após trinta e cinco dias aclimatadas nos tubetes, iniciou-se a fertirrigação conforme descrito anteriormente, no qual o tratamento com adição de P é o MAP 100% e os tratamentos com P4TREE® e Serpentinó foram sem adição de P. Todos os outros sais que compõem a fertirrigação foram adicionados em todos os tratamentos.

### 3.6. VARIÁVEIS FOTOSSINTÉTICAS

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas no último dia dos experimentos com as diferentes doses de P e com aplicação do P4TREE® sólido, durante o período da manhã, com auxílio de um analisador de gases no infravermelho, modelo LI-6400xt (Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, EUA), câmara 6400-40 LCF. A luz foi fornecida em uma densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) de 1500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A área foliar ( $\text{cm}^2$ ) foi corrigida de acordo com o tamanho dos folíolos utilizando o software Image J. As avaliações foram realizadas com o auxílio de sistema de controle de CO<sub>2</sub> (modelo 6400-01, Li-Cor Inc.), em concentração de 400  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  e temperatura foliar de 25 °C. As variáveis de trocas gasosas avaliados foram: taxa fotossintética líquida ( $A_n$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ). Simultaneamente também foram avaliadas as variáveis de

fluorescência da clorofila *a*: taxa aparente de transporte de elétrons (ETR) e rendimento quântico efetivo do FSII ( $\Phi_{\text{FSII}}$ ) (GENTY et al., 1996). A análise de respiração ( $R_d$ ), fluorescência inicial ( $F_0$ ) e fluorescência máxima ( $F_m$ ) foram realizados a noite, entre 21 h e às 23 h. Os valores de  $F_0$  e  $F_m$  obtidos foram utilizados para a determinação da eficiência quântica máxima do fotossistema II (FSII), ( $F_v/F_m$ ) (GENTY; BRIANTAIS; BAKER, 1989).

As curvas de saturação de  $\text{CO}_2$  ( $A_n/C_i$ ) foram realizadas usando diferentes níveis de  $\text{CO}_2$  (400, 300, 200, 100, 50, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200 e 1300  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), em temperatura do bloco de 25°C. A estabilização das leituras em cada concentração foi de no mínimo 60 segundos e no máximo até 120 segundos. As variáveis analisadas foram: taxa máxima de carboxilação da rubisco ( $V_{\text{Cmax}}$ ), taxa máxima de transporte de elétrons ( $J_{\text{max}}$ ) e taxa máxima de uso de triose-fosfato (TPU) (SHARKEY et al., 2007).

Para as análises do experimento com MAP e P4TREE<sup>®</sup> em solução, as medições de fluorescência da clorofila *a* foram feitas usando fluorômetro de pulso modulado Mini-PAM (Heinz Walz, Effeltrich, Germany). Para as medidas no escuro as pinças do equipamento foram na segunda folha totalmente expandida e aclimatadas no escuro por 30 minutos, obtendo os valores de  $F_0$  e  $F_m$ , foram utilizados luz de medição de 0.15  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e pulso de luz saturante de 12000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Os valores obtidos foram utilizados para a determinação da  $F_v/F_m$  (GENTY; BRIANTAIS; BAKER, 1989). As mesmas folhas foram submetidas à radiação fotossistematicamente ativa (PAR), com intensidade de 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , sendo possível determinar a ETR,  $\Phi_{\text{FSII}}$  e rendimento quântico de dissipação regulada de energia não fotoquímica do FSII ( $\Phi_{\text{NPQ}}$ ) (GENTY et al., 1996).

### 3.7. ATRIBUTOS MORFOFUNCIONAIS

No último dia dos experimentos com doses de P e aplicação do P4TREE<sup>®</sup> sólido e Serpentinó, foram coletados materiais para determinação da massa fresca da raiz e parte aérea, utilizando uma balança de precisão, 0,0001 g. Em seguida, foi determinada a área foliar através do programa Image J, a partir de fotos capturadas via aplicativo CamScan e, posteriormente, digitalizadas. A parte aérea e a raiz foram secas em estufa de circulação forçada a 75 °C, até a estabilização do peso, e a determinação da massa foi feita utilizando balança de precisão, 0,0001 g. O comprimento da parte aérea e raiz foi feito com régua graduada em milímetros (mm) e centímetros (cm), o diâmetro do colmo foi determinado com o auxílio de um paquímetro manual, em milímetros (mm). A taxa de crescimento relativo foi feita em relação à altura das plantas, utilizando a equação  $\text{TCR} = (\ln(A_f) - \ln(A_o))/D$ , sendo ln:

logaritmo neperiano, Af: altura final, Ao: altura inicial e D: intervalo em dias entre as medições de altura (HUNT, 1979).

### **3.8. CONCENTRAÇÃO DE P NAS FOLHAS E RAÍZES**

A quantificação de P nas folhas e raízes foi feita no departamento de ciência dos solo na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa/MG. Para a determinação dos teores de nutrientes nas folhas e raízes, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada, por cerca de 72h em temperatura de 65°C. Em seguida foram moídas em moinhos de faca de aço inox e digeridas pelo método de digestão nítricoperclórica (SARRUGE; HAAG, 1974). Após a digestão, o P foi quantificado utilizando espectrômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP- OES; Perkin Elmer Modelo Optima 8300 DV). O equipamento foi calibrado com solução multielementar na mesma matriz das amostras, com concentração entre 0,8 a 80 mg L<sup>-1</sup> de P.

### **3.9. ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Todos os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado (DIC). A análise estatística foi feita de acordo com cada abordagem experimental. Para a variação nas doses de P, foi analisado em esquema fatorial 2x4, com cinco repetições, sendo duas espécies e quatro tratamentos: sem adição de P; 25% de MAP (0.19g de MAP); 50% de MAP (0.38g de MAP) e 100% de MAP (0.76 g de MAP). O teste de ecotoxicidade foi montado em esquema fatorial 1x5, com cinco repetições, sendo sementes de alface e cinco fontes de P: T1 – controle, T2 – MAP, T3 – P4TREE<sup>®</sup> líquido, T4 – Serpentinó e T5 – P4TREE<sup>®</sup> sólido. A aplicação do P4TREE<sup>®</sup> líquido foi analisada em esquema fatorial 2x5, com cinco repetições, sendo duas espécies e quatro tratamentos: sem adição de P; MAP (181 mg P); P4TREE<sup>®</sup> (10 mg P); MAP (10 mg P) e P4TREE<sup>®</sup> + MAP (181 mg P). A aplicação do P4TREE<sup>®</sup> sólido foi analisada em esquema fatorial 2x3, com cinco repetições, sendo duas espécies e três tratamentos: T1 – MAP100%; T2 – P4TREE<sup>®</sup> e T3 – Serpentinó.

A análise de variância utilizada foi ANOVA bidirecional (ANOVA two-way), com 5% de significância. A comparação das médias foi feita através de teste Tukey. A normalidade e homogeneidade dos resíduos foi feita através do teste de Shapiro-Wilk. Os testes estatísticos foram realizados com o auxílio do Software R, através da interface R Studio Version R 4.3.3. A comparação entre as doses de P foi feita por regressão quadrática pelo Software SigmaPlot 14.0.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. DOSES CRESCENTE DE MAP (%)

Nossos resultados mostraram que o aumento nas doses de MAP não afetou significativamente o crescimento das plântulas de ambas as espécies no período avaliado (96 dias). Com exceção ao comprimento e massa seca da raiz, a canafístula apresentou maior área foliar, altura, diâmetro e taxa de crescimento relativo, massa seca da folha, colmo e total em relação ao angico-vermelho (Tabela 1).

Tabela 1 – Área foliar, em centímetros quadrado; altura, em centímetros; diâmetro, em milímetros; comprimento da raiz, em centímetro; taxa de crescimento relativo (TCR), em milímetros por milímetros por dia; massa seca da folha, em gramas (MS folha); massa seca do colmo, em gramas (MS colmo); massa seca da raiz, em gramas (MS raiz) e massa seca total, em gramas (MS total). Os valores são a média e o erro padrão de cinco repetições. Em espécies de angico-vermelho (*P. rigida*) e canafístula (*P. dubium*), em diferentes doses de fósforo, sendo sem adição de P, 25%, 50% e 100% MAP. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos, conforme teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras maiúscula comparam as espécies. Letras minúsculas comparam os tratamentos em cada espécie.

(Continua)

	Angico-vermelho				Canafístula			
	Sem adição de P	MAP 25%	MAP 50%	MAP 100%	Sem adição de P	MAP 25%	MAP 50%	MAP 100%
Área foliar (cm <sup>2</sup> )	88,60 ±27,30 Ba	79,50 ±24,95 Ba	58,67 ±11,31 Ba	145,35 ±75,82 Ba	343,66 ±44,92 Aa	472,29 ±43,03 Aa	428,19 ±53,92 Aa	340,61 ±60,40 Aa
Altura (cm)	10,80 ±1,33 Ba	10,70 ±1,11 Ba	12,00 ±1,70 Ba	11,00 ±1,81 Ba	14,80 ±0,94 Aa	15,90 ±0,64 Aa	17,10 ±1,61 Aa	14,20 ±1,29 Aa
Diâmetro (mm)	2,02 ±0,22 Ba	2,28 ±0,14 Ba	2,51 ±0,27 Ba	2,21 ±0,19 Ba	4,52 ±0,43 Aa	3,87 ±0,23 Aa	3,42 ±0,77 Aa	3,70 ±0,39 Aa
Comprimento da raiz (cm)	14,30 ±4,76 Aa	14,40 ±0,91 Aa	14,40 ±0,62 Aa	14,60 ±0,53 Aa	14,00 ±0,47 Aa	15,10 ±1,54 Aa	13,60 ±0,29 Aa	14,50 ±0,63 Aa
TCR (mm mm <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )	0,003 ±0,001 Ba	0,003 ±0,001 Ba	0,005 ±0,002 Ba	0,005 ±0,001 Ba	0,013 ±0,001 Aa	0,014 ±0,001 Aa	0,014 ±0,001 Aa	0,013 ±0,001 Aa
MS folha (g)	0,30±0,10 Ba	0,35±0,08 Ba	0,25±0,07 Ba	0,28±0,09 Ba	0,93±0,21 Aa	1,08±0,12 Aa	1,13±0,19 Aa	0,91±0,21 Aa



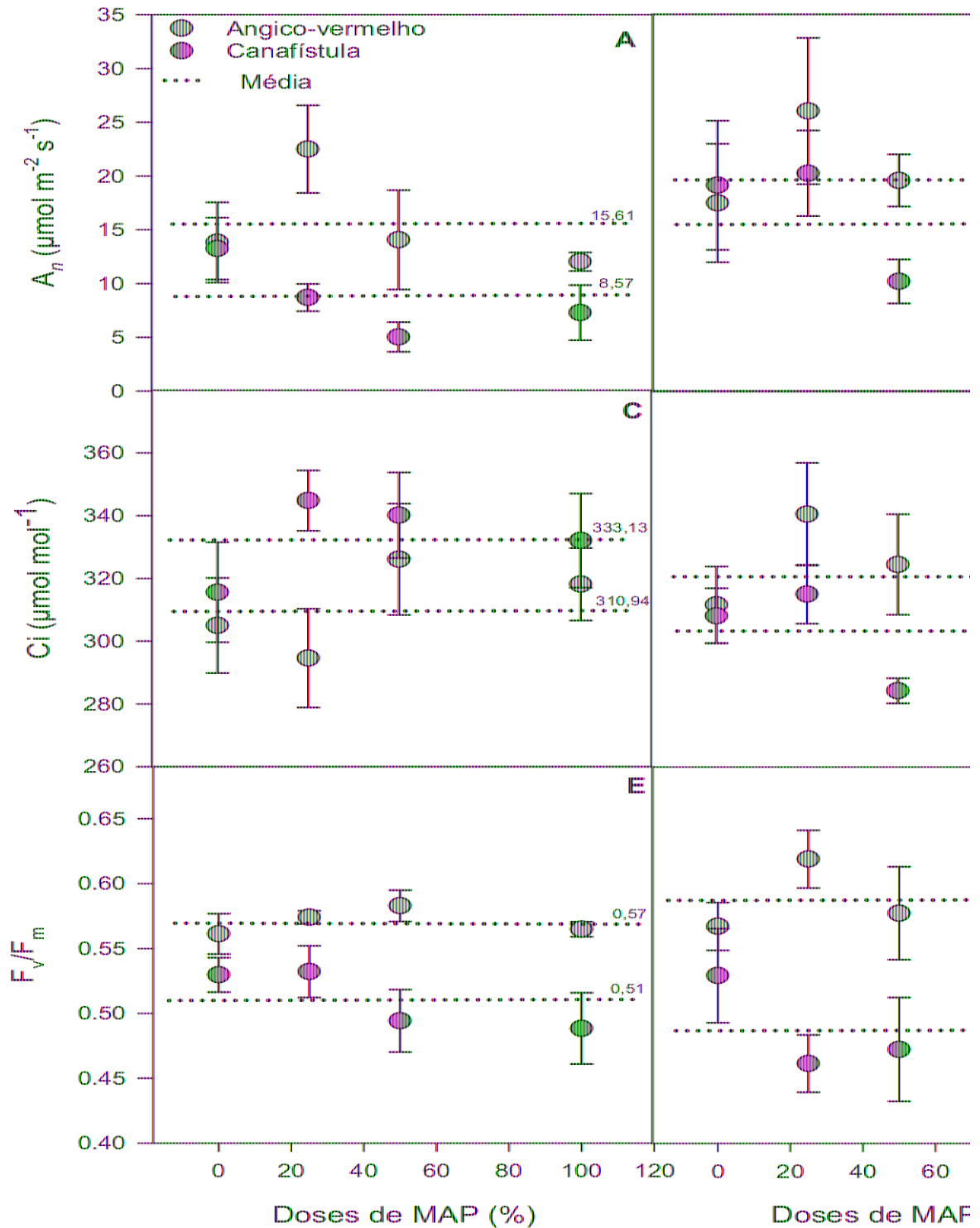
(Continuação)

MS	0,14±0,	0,16±0,	0,18±0,0	0,16±0,0	0,77±0,	0,57±0,	0,70±0,	0,51±0,
colm	03	03	4	6	17	07	08	10
o (g)	Ba	Ba	Ba	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa
MS	0,52±0,0	0,65±0,1	0,54±0,	0,70±0,2	0,59±0,	0,45±0,	0,56±0,	0,38±0,1
raiz	6	1	17	3	17	07	09	0
(g)	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa
MS	0,96±0,1	1,17±0,	0,97±0,	1,14±0,3	2,29±0,	2,10±0,	2,39±0,	1,80±0,3
total	5	20	27	7	54	25	32	8
(g)	Ba	Ba	Ba	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa

Fonte: Do autor (2024).

A variação nas doses de MAP não afetou as respostas fotossintéticas ( $A_n$ ,  $g_s$ ,  $C_i$ ,  $E$ , ETR e  $F_v/F_m$ ) em ambas as espécies (Figura 1). Quando comparamos as espécies, o angico-vermelho apresentou maior  $A_n$  em relação a canafístula nas doses de 25%, 50% e 100% de MAP, no tratamento sem adição de P, foram iguais (Figura 1A). Ambas as espécies apresentaram valores estatisticamente iguais em  $g_s$  (Figura 1B). A canafístula apresentou maior  $C_i$  em relação ao angico-vermelho (Figura 1C). O angico-vermelho apresentou os maiores valores de  $F_v/F_m$ ,  $E$  e ETR (Figura 1E, D e F, respectivamente) em relação à canafístula.

Figura 1 – Variáveis fotossintéticas.

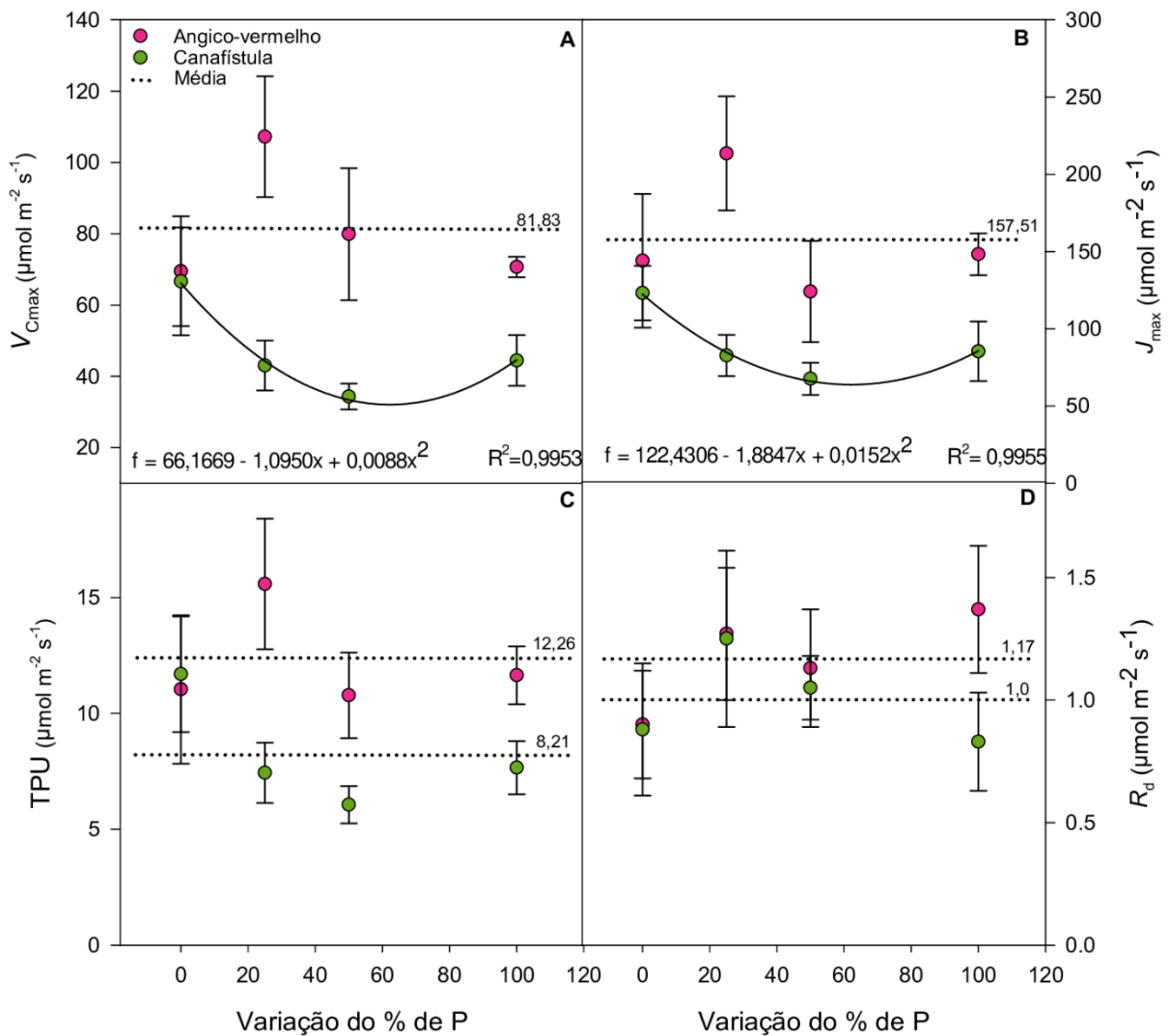


(A) Taxa fotossintética líquida ( $A_n$ ); (B) condutância estomática ( $g_s$ ); (C) concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ); (D) transpiração (E); (E) eficiência quântica máxima do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ); (F) taxa aparente de transporte de elétrons (ETR) em angico-vermelho (*P. rigida*) e canafístula (*P. dubium*), em diferentes doses de fósforo, sendo sem adição de P, 25%, 50% e 100% MAP. Os valores são a média e o erro padrão de cinco repetições. A linha pontilhada representa a média dos tratamentos para cada espécie.

Fonte: Do autor (2024).

A canafístula reduziu os valores de  $V_{C_{max}}$  e  $J_{max}$  com o aumento do percentual de MAP (Figura 2A e B, respectivamente), no entanto, não houve alteração em TPU e  $R_d$  entre os tratamentos (Figura 2C e D, respectivamente). O angico-vermelho não apresentou alteração em  $V_{C_{max}}$ ,  $J_{max}$ , TPU e  $R_d$  (Figura 2A, B, C e D, respectivamente). Quando comparamos as espécies, o angico-vermelho apresentou os maiores valores de  $V_{C_{max}}$ ,  $J_{max}$  e TPU, porém com valores de  $R_d$  estatisticamente iguais.

Figura 2 – Etapas de carboxilação da rubisco; taxa de transporte de elétrons; taxa máxima de uso de triose-fosfato e respiração noturna.



(A) Taxa máxima de carboxilação da rubisco ( $V_{C_{max}}$ ); (B) taxa máxima de transporte de elétrons ( $J_{max}$ ); (C) taxa máxima de uso de triose-fosfato (TPU); (D) respiração noturna ( $R_d$ ). Em angico-vermelho (*P. rigida*) e canafístula (*P. dubium*), em diferentes doses de fósforo, sendo sem adição de P, 25%, 50% e 100% MAP. Os valores são a média e o erro padrão de cinco repetições. A linha pontilhada representa a média dos tratamentos.

Fonte: Do autor (2024).

## 4.2. VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO P4TREE® E SERPENTINITO

O teste ecotoxicológico foi feito para verificar qual a viabilidade de aplicação do P4TREE® em diferentes tratamentos. A média do tamanho da radícula por tratamento foi: Sem adição de P – 1,74 mm; MAP – 1,70 mm; P4TREE® em solução de NaOH – não germinou; Serpentinoto – 3,12 mm; P4TREE® sólido – 1,60 mm. Nossos resultados mostraram que as sementes não germinaram com o P4TREE® dessorvido em solução de NaOH, sendo o único tratamentos estatisticamente diferente (Figura 3A).

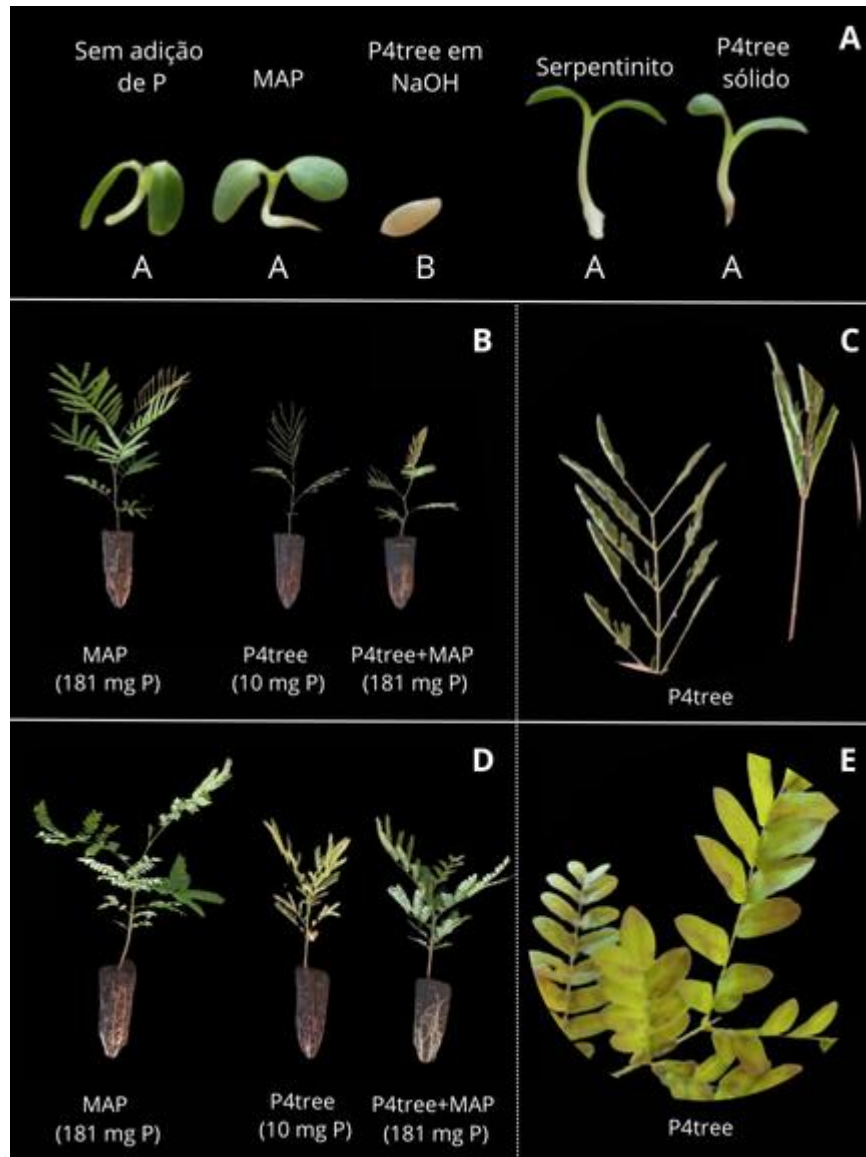
Visto que a aplicação do teste ecotoxicológico foi realizada utilizando sementes de planta modelo, buscamos compreender se a aplicação da solução do P4TREE® em NaOH como fertirrigação seria viável em mudas das espécies nativas. A aplicação do P4TREE® em solução de NaOH como fonte de P acarretou na morte das plantas após quatro dias da primeira fertirrigação. Contudo, como observado através das variáveis de fluorescência da clorofila *a* (Tabela 2) a canafístula foi mais sensível aos efeitos do P4TREE® em relação ao angico-vermelho, devido ao menor valor de  $F_v/F_m$  em ambos os tratamentos com P4TREE®. Em ambas as espécies, o  $\phi_{FSII}$  foi menor nos dois tratamentos com P4TREE®. Os valores de  $\phi_{NPQ}$  foram iguais em todas as espécies e em todos os tratamentos.

Tabela 2 – Eficiência quântica máxima do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ); rendimento quântico de dissipação regulada de energia não fotoquímica do FSII ( $\phi_{NPQ}$ ); rendimento quântico efetivo do FSII ( $\phi_{FSII}$ ) em angico-vermelho (*P. rigida*) e canafístula (*P. dubium*) com tratamento sem adição de P, 100% MAP (181 mg P), P4TREE® (10 mg P), MAP (10 mg P) e P4TREE®+MAP (181 mg P). Os valores são a média e o erro padrão de cinco repetições. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos, conforme teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras maiúscula comparam as espécies. Letras minúsculas comparam os tratamentos em cada espécie.

	Angico-vermelho					Canafístula				
	Sem adição de P	MAP (181 mg P)	P4TRE E® (10 mg P)	MAP (10 mg P)	P4TRE E® +MAP (181 mg P)	Sem adição de P	MAP (181 mg P)	P4TRE E® (10 mg P)	MAP (10 mg P)	P4TRE E® +MAP (181 mg P)
$F_v/F_m$	0,74± 0,01A ab	0,78± 0,01 Aa	0,69± 0,00Ab c	0,76± 0,01 Aa	0,64± 0,02Ac	0,77± 0,01 Aa	0,77± 0,01 Aa	0,53± 0,03Bb	0,01 Aa	0,75± 0,56± 0,02Bb
$\phi_{NPQ}$	0,51± 0,04A a	0,52± 0,06 Aa	0,63± 0,05Aa	0,52± 0,06 Aa	0,55± 0,06Aa	0,58± 0,06 Aa	0,53± 0,03 Aa	0,65± 0,02Aa	0,04 Aa	0,64± 0,03Aa
$\phi_{FSII}$	0,14± 0,02A b	0,22± 0,04 Aa	0,11± 0,01Ac	0,30± 0,03 Aa	0,16± 0,02Ab c	0,19± 0,02 Ab	0,28± 0,02 Aa	0,08± 0,01Ac	0,04 Aa	0,30± 0,01Ab c

Fonte: Do autor (2024).

Figura 3 – Teste ecotoxicológico realizado com sementes de alface; aplicação do MAP; P4TREE® em solução de NaOH e P4TREE®+MAP e detalhes do efeito da salinidade causada pelo P4TREE®.



(A) Teste ecotoxicológico realizado com sementes de alface; (B) angico-vermelho após aplicação do MAP; P4TREE® em solução de NaOH e P4TREE®+MAP; (C) Detalhes do efeito da salinidade causada pelo P4TREE® nas folhas de angico-vermelho; (D) canafístula após aplicação do MAP; P4TREE® em solução de NaOH e P4TREE®+MAP; (E) Detalhes do efeito da salinidade causada pelo P4TREE® nas folhas de canafístula.

Fonte: Do autor (2024).

### 4.3. INCORPORAÇÃO DO P4TREE® E SERPENTINITO AO SUBSTRATO

As plantas de angico-vermelho foram estatisticamente iguais em área foliar, altura, diâmetro massa seca da folha, colmo e total em todos os tratamentos (Tabela 3). No entanto,

com a aplicação do P4TREE<sup>®</sup>, esta espécie apresentou os menores valores de comprimento da raiz, massa seca da raiz e a TCR, sendo estatisticamente diferente dos outros tratamentos. A massa seca da raiz apresentou diferença estatística entre os tratamentos, sendo maior nas plantas do tratamento serpentinito, seguido do tratamento MAP 100%.

As plantas de canafístula, foram estatisticamente iguais em área foliar, altura, diâmetro, comprimento da raiz e taxa de crescimento relativo (TCR) no tratamento de MAP 100% e serpentinito (Tabela 3). No tratamento do P4TREE<sup>®</sup>, esta espécie apresentou os menores valores em todas as variáveis avaliadas, sendo estatisticamente diferente em relação aos outros tratamentos. Em relação a massa seca, todos os tratamentos foram estatisticamente diferentes, sendo que as plântulas do tratamento do Serpentinito apresentaram os maiores valores de massa seca da folha, colmo, raiz e total, seguido do tratamento MAP 100% e as plantas do tratamento com P4TREE<sup>®</sup> apresentaram os menores valores de massa seca.

Quando comparamos as espécies, o angico-vermelho e a canafístula foram estatisticamente iguais no comprimento da raiz em todos os tratamentos e, no tratamento do P4TREE<sup>®</sup>, todas as variáveis morfofuncionais avaliados foram estatisticamente iguais em ambas as espécies (Tabela 3). Nos tratamentos MAP100% e Serpentinito, as plantas de canafístula apresentaram os maiores valores da massa seca da folha, colmo e taxa de crescimento relativo (TCR) e menor massa seca da raiz em comparação com o angico-vermelho. No tratamento do P4TREE<sup>®</sup>, as plantas de angico-vermelho e canafístula foram estatisticamente iguais em massa seca da folha, colmo e total. Em relação a massa seca total, com exceção do tratamento de Serpentinito da espécie angico-vermelho, todos os tratamentos foram estatisticamente iguais em ambas as espécies.

Tabela 3- Área foliar, altura, diâmetro, comprimento da raiz, taxa de crescimento relativo (TCR), massa seca da folha (MS folha), massa seca do colmo (MS colmo), massa seca da raiz (MS raiz), massa seca total (MS total) em espécies de em angico-vermelho (*P. rigida*) e canafístula (*P. dubium*), em tratamento com MAP 100%, P4TREE<sup>®</sup> sólido e Serpentinito. Os valores são a média e o erro padrão de cinco repetições. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos, conforme teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras maiúscula comparam as espécies. Letras minúsculas comparam os tratamentos em cada espécie.

(Continua)

Angico-vermelho			Canafístula		
MAP 100%	P4TREE <sup>®</sup>	Serpentinito	MAP 100%	P4TREE <sup>®</sup>	Serpentinito
		o			o

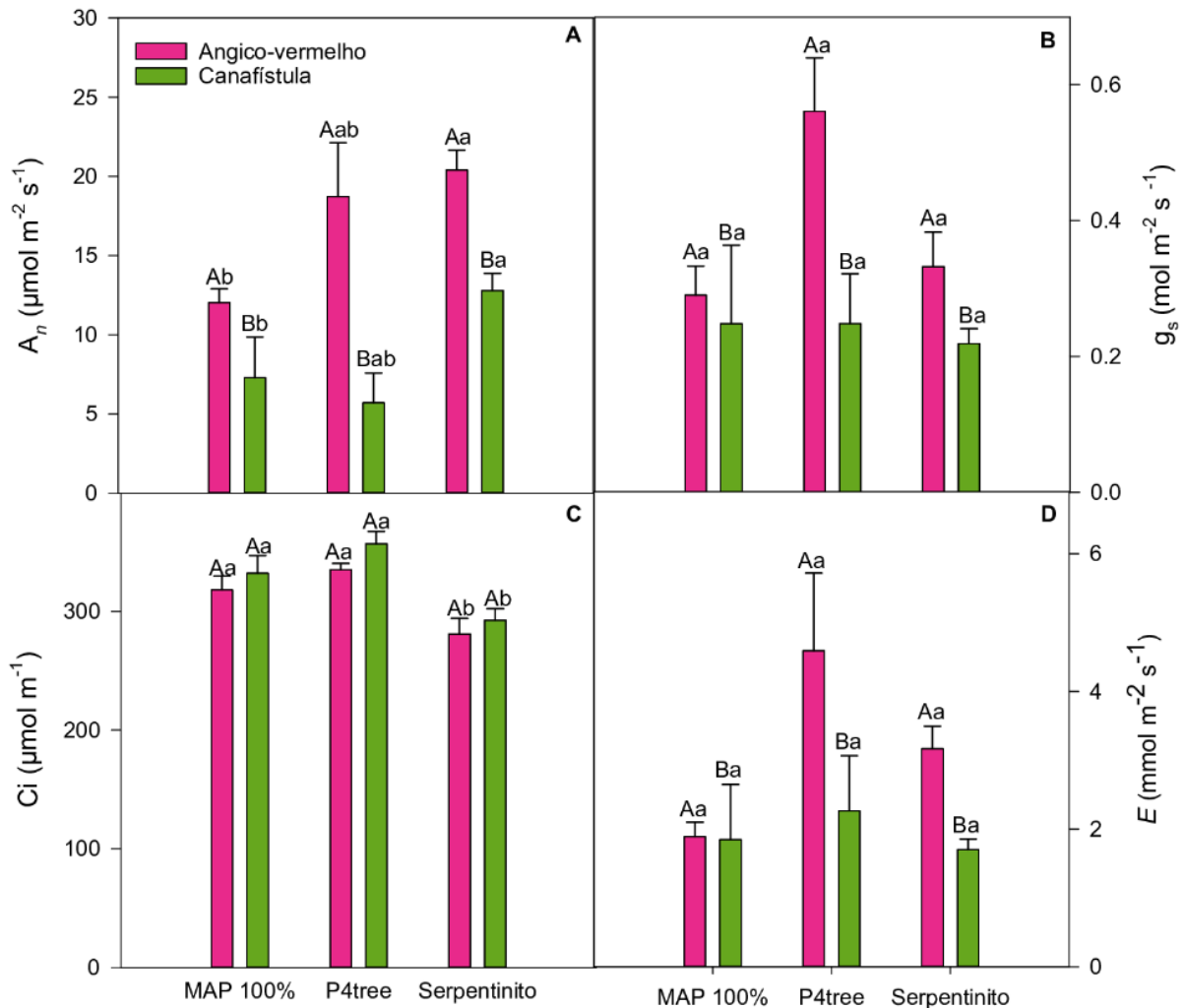
(Continuação)

Área foliar (cm <sup>2</sup> )	145,35±75,82 Ba	31,71±8,31 Aa	64,14±13,44 Ba	340,61±60,40 Aa	17,91±10,08 Ab	486,23±58,05 Aa
Altura (cm)	11,00±1,81 Aa	8,40±0,58 Aa	11,10±1,04 Ba	14,20±1,29 Aa	6,00±0,57 Ab	14,60±0,81 Aa
Diâmetro (mm)	2,21±0,19 Ba	1,38±0,37 Aa	1,59±0,39 Ba	3,70±0,39 Aa	0,81±0,04 Ab	2,75±0,68 Aa
Comprimento da raiz (cm)	14,60±0,53 Aa	13,30±0,30 Ab	14,70±0,62 Aa	14,50±0,63 Aa	12,30±0,51 Ab	14,10±0,64 Aa
TCR (mm.mm <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )	0,0053±0,0012 Ba	0,0014±0,0004 Ab	0,0037±0,0013 Bab	0,0129±0,0010 Aa	0,0029±0,0011 Ab	0,0128±0,0008 Aa
MS folha (g)	0,28±0,09 Ba	0,30±0,06 Aa	0,52±0,12 Ba	0,91±0,21 Ab	0,06±0,02 Ac	1,82±0,23 Aa
MS colmo (g)	0,16±0,06 Ba	0,10±0,02 Aa	0,14±0,03 Ba	0,51±0,10 Ab	0,06±0,01 Ac	0,76±0,10 Aa
MS raiz(g)	0,70±0,23 Aab	0,61±0,08 Ab	0,88±0,20 Aa	0,38±0,10 Bab	0,07±0,01 Bb	0,63±0,08 Ba
MS total (g)	1,14±0,37 Aa	1,01±0,15 Aa	1,54±0,33 Ba	1,80±0,37 Ab	0,20±0,15 Ac	3,21±0,33 Aa

Fonte: Do autor (2024).

As plantas de angico-vermelho apresentaram maiores valores de  $A_n$  em relação à canafístula. Em ambas as espécies, o tratamento com Serpentinito resultou nos maiores valores de  $A_n$  e os menores valores nas plantas com MAP 100% (Figura 4A). Em relação ao  $C_i$ , as plantas de ambas as espécies dos tratamentos com MAP 100% e P4TREE® foram estatisticamente iguais (Figura 4C). Independente do tratamento, as plantas de ambas as espécies apresentaram valores estatisticamente iguais para  $g_s$  e  $E$  (Figura 4B e D).

Figura 4 - Taxa fotossintética líquida; condutância estomática; concentração interna de CO<sub>2</sub> e transpiração.



(A) Taxa fotossintética líquida ( $A_n$ ); (B) condutância estomática ( $g_s$ ); (C) concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ); (D) transpiração ( $E$ ) em angico-vermelho (*P. rigida*) e canafístula (*P. dubium*), em tratamento com MAP 100%, P4TREE<sup>®</sup> sólido e Serpentinito. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos, conforme teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras maiúscula comparam as espécies. Letras minúsculas comparam os tratamentos em cada espécie.

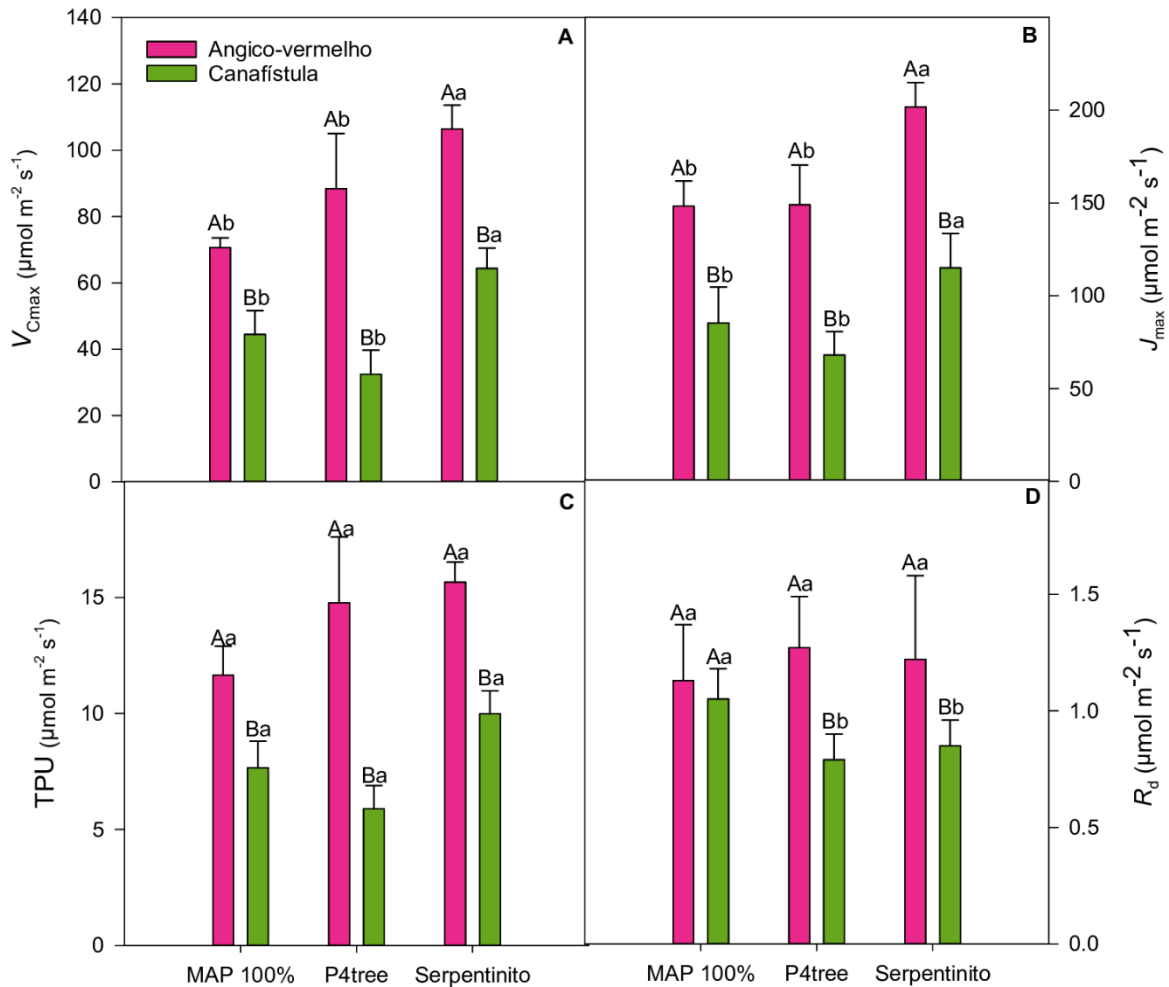
Fonte: Do autor (2024).

As plantas de angico-vermelho e canafístula apresentaram os maiores valores de  $V_{C_{max}}$  e  $J_{max}$  nos tratamentos com Serpentinito, sendo estatisticamente diferente dos outros tratamentos (Figura 5A e B, respectivamente). Em todos os tratamentos, as plantas de canafístula e angico vermelho foram estatisticamente iguais em TPU (Figura 5C). No tratamento com MAP 100%, a canafístula apresentou o maior valor de  $R_d$ , sendo estatisticamente diferente dos outros tratamentos (Figura 5D). A  $R_d$ , do angico vermelho foi estatisticamente igual em todos os tratamentos (Figura 5D).



Quando comparamos as espécies, o angico-vermelho apresentou os maiores valores de  $V_{C_{max}}$ ,  $J_{max}$  e TPU, em relação a canafístula (Figura 5A, B e C, respectivamente). Em  $R_d$ , ambas as espécies foram estatisticamente iguais quando tratadas com MAP 100%, contudo, nos tratamentos com P4TREE® e Serpentinito as plantas de angico-vermelho apresentaram valores maiores em relação a canafístula (Figura 5D).

Figura 5 - Taxa máxima de carboxilação da rubisco; taxa máxima de transporte de elétrons; taxa máxima de uso de triose-fosfato e respiração.



(A) Taxa máxima de carboxilação da rubisco ( $V_{C_{max}}$ ); (B) taxa máxima de transporte de elétrons ( $J_{max}$ ); (C) taxa máxima de uso de triose-fosfato (TPU); (D) respiração ( $R_d$ ) em angico-vermelho (*P. rigida*) e canafístula (*P. dubium*), em tratamento com MAP 100%, P4TREE® sólido e Serpentinito. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos, conforme teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras maiúscula comparam as espécies. Letras minúsculas comparam os tratamentos em cada espécie.

Fonte: Do autor (2024).

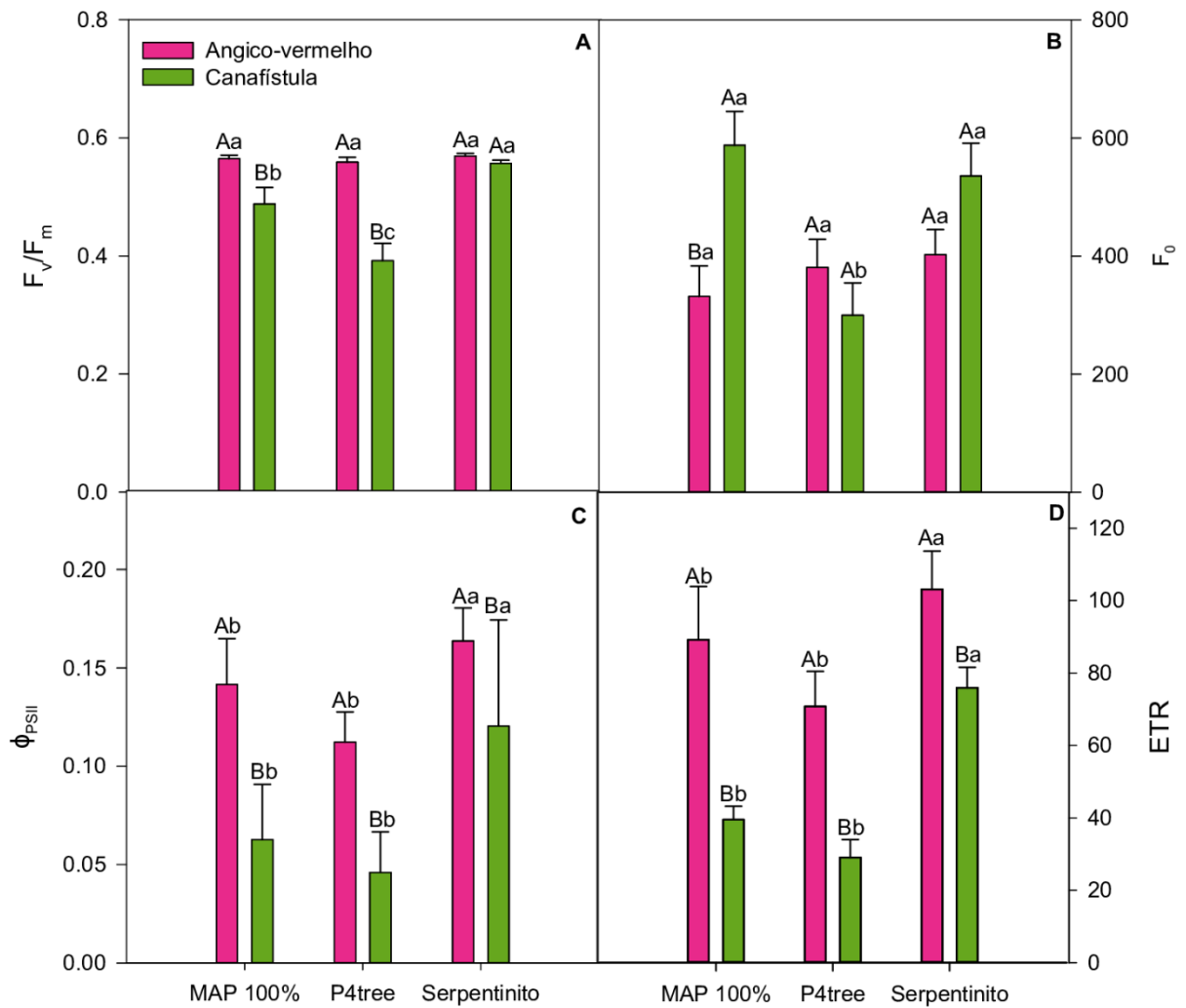
O angico-vermelho foi estatisticamente igual em todos os tratamentos em  $F_v/F_m$  e  $F_0$  (Figura 6A e B, respectivamente). Esta espécie apresentou os maiores valores de  $\Phi_{PSII}$  e ETR

no tratamento com Serpentinó, sendo estatisticamente diferente dos outros tratamentos (Figura 6C e D, respectivamente).

A canafístula obteve os maiores valores de  $F_v/F_m$  no tratamento com Serpentinó, seguido do MAP 100% e, os menores valores foram do tratamento com P4TREE<sup>®</sup>, enquanto não houve alteração significativa para o angico vermelho (Figura 6A). As plantas de canafístula do tratamento com MAP 100% e Serpentinó, foram estatisticamente iguais em  $F_0$ , sendo o tratamento com P4TREE<sup>®</sup> o menor valor observado (Figura 6B). Esta espécie apresentou os maiores valores de  $\Phi_{PSII}$  e ETR no tratamento com Serpentinó, sendo estatisticamente diferente dos outros tratamentos (Figura 6C e D, respectivamente).

Quando comparamos as espécies, o angico-vermelho foi superior a canafístula em  $F_v/F_m$  nos tratamentos com MAP 100% e P4TREE<sup>®</sup>, no entanto, foram estatisticamente iguais quando tratadas com Serpentinó (Figura 6A). Ambas as espécies foram estatisticamente iguais em  $F_0$  quando tratadas com P4TREE<sup>®</sup> e Serpentinó, mas quando tratada com MAP 100%, o angico-vermelho apresentou valores superior a canafístula (Figura 6B). O angico-vermelho obteve valores maiores em relação a canafístula em  $\Phi_{PSII}$  e ETR (Figura 6C e D, respectivamente).

Figura 6 – Eficiência quântica máxima do fotossistema II; fluorescência inicial; rendimento quântico efetivo do FSII e taxa aparente de transporte de elétrons.



(A) Eficiência quântica máxima do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ); (B) fluorescência inicial ( $F_0$ ); (C) rendimento quântico efetivo do FSII ( $\phi_{PSII}$ ); (D) taxa aparente de transporte de elétrons (ETR). Em espécies de angico-vermelho (*P. rigida*) e canafístula (*P. dubium*), em tratamento com MAP 100%, P4TREE<sup>®</sup> sólido e Serpentinito. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos, conforme teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras maiúscula comparam as espécies. Letras minúsculas comparam os tratamentos em cada espécie.

Fonte: Do autor (2024).

## 5. DISCUSSÃO

Devido à baixa exigência nutricional de *Peltophorum dubium* e *Parapiptadenia rigida* durante os estágios iniciais de desenvolvimento, a variação das doses de P não afetou as características morfofuncionais, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* em ambas as espécies. Esse experimento mostrou que a quantidade de fertilizante fosfatado utilizado em viveiros de espécies nativas pode ser reduzida no manejo dessas espécies, devido à baixa exigência nutricional das mesmas. Em contraste com nossos resultados, CRUZ et al., (2011) mostraram que doses crescentes de macronutrientes, principalmente P, acarreta em aumento significativo no crescimento das mudas de canafístula em 120 dias após a semeadura. ABREU et al., (2022) mostraram aumento no crescimento, produção de biomassa e qualidade das mudas em decorrência do aumento de P utilizando o  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  como fonte de P (22,7% de P). Embora em nosso trabalho utilizamos fosfato monoamônico ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), obtivemos resultados diferentes dos encontrados por SCHUMACHER; CECONI; SANTANA (2004), onde concluíram que quando utilizado o  $\text{CaHPO}_4$  como fonte de P, em doses de  $450 \text{ mg kg}^{-1}$  P observa-se melhor resposta de crescimento do *P. rigida*.

Embora as exigências nutricionais das espécies nativas são baixas, acreditávamos que a utilização do P4TREE<sup>®</sup> em solução nutritiva seria uma alternativa para reduzir a basicidade natural do material e o pH não afetaria no suprimento de outros nutrientes. Contudo, a dessorção de P do P4TREE<sup>®</sup> em solução de NaOH promoveu uma alta concentração de sais na fertirrigação e ocasionou o choque salino nas plantas. O choque salino pode ser caracterizado pela adição repentina e abrupta de alta concentração de  $\text{Na}^+$  no substrato de desenvolvimento da planta, levando a mortalidade das plantas decorrente da plasmólise da célula vegetal (SHAVRUKOV, 2013). Os efeitos nocivos da salinidade na fluorescência da clorofila *a* podem ser observados pelos valores mais baixos de  $F_v/F_m$  e  $\Phi_{\text{FSII}}$ , devido a inibição do transporte de elétrons no FSII (DOĞRU, 2020; SUDHIR; MURTHY, 2004). Os resultados observados no teste ecotoxicológico corroboram com as informações mencionadas, visto que as sementes do tratamento com P4TREE<sup>®</sup> em solução tiveram a sua germinação inibida. A inibição da germinação ocorreu devido ao estresse salino-alcálico ocasionado pelo aumento de pH e alta concentração de  $\text{Na}^+$  decorrente do uso de NaOH, sob elevada salinidade, a interação com o pH alto torna-se mais danoso para a germinação das sementes (HITTI; MACPHERSON; LEFSRUD, 2023; LIN et al., 2014).

As plantas de canafístula que se desenvolveram em substrato com P4TREE<sup>®</sup> sólido foram mais sensíveis do que as plantas de angico vermelho, pois apresentaram menor  $F_v/F_m$ . A

menor eficiência quântica máxima do FSII pode ter ocorrido devido a algum metabólito ou composto nocivo para as plantas presente na urina (KARAK; BHATTACHARYYA, 2011a; MARTIN et al., 2020). A toxicidade resultou em danos no complexo antena e, conseqüentemente, menor uso de energia para a fotossíntese, como pode ser visto em uma redução em  $A_n$  e nos aspectos morfofuncionais nas plantas expostas ao tratamento com P4TREE<sup>®</sup>. Não foi possível quantificar a clorofila *a*, *b* e total devido à falta de massa vegetal nas plantas do tratamento com P4TREE<sup>®</sup>, sendo visualmente observado clorose e necrose nas plantas de canafístula. A quantificação das clorofilas poderia nos confirmar o porquê observamos menor  $F_v/F_m$  nessas plantas, visto que as clorofilas são pigmentos fotossintéticos que contribuem para a conversão da energia resultante da absorção da luz solar em energia química para os fotossistemas (LAISK et al., 2014; WIENTJES; VAN AMERONGEN; CROCE, 2013). Embora o tratamento com P4TREE<sup>®</sup> não tenha causado danos fisiológicos nas plantas de angico vermelho, não contribuiu para aumento em altura, diâmetro, comprimento da raiz e massa seca, assim como para a canafístula.

Os maiores valores de massa seca na folha, colmo e total das plantas de canafístula quando cresceram em substrato com Serpentinó, estão relacionados ao maior  $\Phi_{FSII}$  que acarretou em maior  $A_n$  e eficiência no processo de fixação de carbono, como visto nas variáveis relacionadas com o Ciclo de Calvin-Benson-Bassham. Para o angico-vermelho, o Serpentinó adicionado ao substrato proporcionou melhores resultados em trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, taxa máxima de carboxilação da rubisco e taxa máxima de transporte de elétrons, mas não proporcionou maiores valores em atributos morfofuncionais. Acreditamos que isso ocorreu devido ao período de avaliação das plantas que ainda estavam no início do desenvolvimento vegetativo, com baixo requerimento nutricional, sendo o angico-vermelho uma espécie de crescimento rápido, mas que foi muito sensível ao calor durante o desenvolvimento do experimento. Os melhores resultados ao tratamento com Serpentinó pode ser atribuído a capacidade deste remineralizador em ser utilizado como corretivo do solo, aumentando o pH (TEIXEIRA et al., 2010), e contribui para o aumento de K, Ca, Mg e também de P (0,02% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (ALOVISI et al., 2023, 2019), proporcionando maiores condições de desenvolvimentos das espécies avaliadas, visto que elas possuem pouca exigência nutricional. O angico-vermelho é uma opção de espécie para plantio em áreas contaminadas com cobre (Cu), pois quando combinado corretivos do solo como calcário, silicato de cálcio (Ca), composto orgânico e zeólita, as concentrações de Cu no solo são reduzidas e o desenvolvimento desta espécie culmina em maior massa seca, manutenção dos

pigmentos fotossintéticos, melhora o estado nutricional, aumenta a concentração de P disponível e reduz as espécies reativas de oxigênio (BICALHO DA SILVA et al., 2018). Além do uso em revegetação de áreas contaminadas, o angico-vermelho pode ser utilizado em sistemas agroflorestais devido a disposição da sua copa permitir maior transmissividade da radiação solar sobre as culturas e a característica caducifolia desta espécie, podendo ser consorciado com o ciclo da cultura agrícola em questão, como trigo e aveia, por exemplo (CARON et al., 2019; SGARBOSSA et al., 2020).

## 6. CONCLUSÃO

O baixo requerimento nutricional durante o crescimento inicial das espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica (*Peltophorum dubium* e *Parapiptadenia rígida*) não proporcionaram aumento significativo nas características morfofuncionais, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* em função das diferentes doses de P. O *P. dubium* teve o seu crescimento afetado quando utilizamos o P4TREE<sup>®</sup> como fonte de P. Acreditamos que há algum composto presente na urina que é nocivo para o desenvolvimento da planta. Contudo, para *P. rígida* a altura, diâmetro, área foliar, massa seca da folha e colmo não foram afetados com a aplicação do P4TREE<sup>®</sup>. Mostramos com esse trabalho o potencial no uso do P4TREE<sup>®</sup>, principalmente pela capacidade de adsorção de P e sugerimos nova investigação do tempo de exposição do material a urina para a produção do P4TREE<sup>®</sup>, visto que o material utilizado nesse experimento foi feito durante o carnaval e sem cuidados quanto ao tempo de exposição e quantidade de material em contato com os sachês. Confirmamos com esse trabalho que a melhor estratégia de aplicação do P4TREE<sup>®</sup> está na forma sólida e misturado ao substrato. Entretanto, o Serpentinó, material base para a produção do P4TREE<sup>®</sup>, proporciona condições ideais para o desenvolvimento das mudas, principalmente para a espécie canafístula.

## 7. REFERÊNCIAS

- ABREU, G. M. et al. Fertilização fosfatada e fungos micorrízicos arbusculares na produção de mudas de *Peltophorum dubium*. **Madera y Bosques**, v. 28, n. 3, p. e2832344, 15 dez. 2022.
- ALMANASSRA, I. W. et al. A state of the art review on phosphate removal from water by biochars. **Chemical Engineering Journal**, v. 409, p. 128211, abr. 2021.
- ALOVISI, A. A. et al. Chemical Attributes of Soil and Response of Wheat to Serpentinite in Direct Seeding System. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 6, p. 460, 15 maio 2019.
- ALOVISI, A. A. et al. Chemical properties of soils submitted to the application of a bioactivator and basalt and serpentinite powders. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 10, p. 811–819, out. 2023.
- ANLAUF, A. An extractive bioeconomy? Phosphate mining, fertilizer commodity chains, and alternative technologies. **Sustainability Science**, v. 18, n. 2, p. 633–644, 1 mar. 2023.
- BAIRD, RODGER. et al. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd. ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017.
- BARROW, N. J.; HARTEMINK, A. E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. **Plant and Soil**, v. 487, n. 1–2, p. 21–37, 1 jun. 2023.
- BASSETT, H.; BEDWELL, W. L. 210. Studies of phosphates. Part I. Ammonium magnesium phosphate and related compounds. **Journal of the Chemical Society (Resumed)**, n. 0, p. 854–871, 1 jan. 1933.
- BICALHO DA SILVA, I. C. et al. Growth, biochemical response and nutritional status of Angico-Vermelho (*Parapiptadenia rigida* (Bentham) Brenan) under the application of soil amendment in Cu-contaminated soil. **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, n. 14, p. 1380–1388, 6 dez. 2018.
- CARAVALHO, P. E. R. Espécies Arbóreas Brasileiras. Em: **Embrapa Florestas**. [s.l.] Embrapa Informação Tecnológica, 2003. v. 1p. 1039.
- CARMIGNANO, O. R. R. D. et al. Serpentinites: Mineral Structure, Properties and Technological Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 31, n. 1, p. 2–14, 10 jan. 2020.
- CARNEIRO, J. S. DA S. et al. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. **Science of The Total Environment**, v. 760, p. 143955, 15 mar. 2021.
- CARON, B. O. et al. Agroforestry systems and understory harvest management: the impact on growth and productivity of dual-purpose wheat. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, n. 4, 2019.
- CHIEN, P. S. et al. Sensing and Signaling of Phosphate Starvation: From Local to Long Distance. **Plant and Cell Physiology**, v. 59, n. 9, p. 1714–1722, 1 set. 2018.
- CHIERA, J.; THOMAS, J.; RUFTY, T. Leaf initiation and development in soybean under phosphorus stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 368, p. 473–481, 1 mar. 2002.
- CORDELL, D.; WHITE, S. Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security. **Sustainability 2011, Vol. 3, Pages 2027-2049**, v. 3, n. 10, p. 2027–2049, 24 out. 2011.



- CRUVINEL, E. H. DE P.; SANTOS, I. C. DA C.; BOFFA, M. V. P4TREE® technology application at the Belo Horizonte Carnival. **Applied Tourism**, v. 5, n. 2, p. 33–38, 14 ago. 2020.
- CRUZ, C. A. F. E et al. Efeito de macronutrientes sobre o crescimento e qualidade de mudas de canafístula cultivadas em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 983–995, out. 2011.
- DE LIMA, R. A. F. et al. The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. **Nature Communications** 2020 **11:1**, v. 11, n. 1, p. 1–16, 11 dez. 2020.
- DE MELO BENITES, V. et al. Organomineral Fertilizer Is an Agronomic Efficient Alternative for Poultry Litter Phosphorus Recycling in an Acidic Ferralsol. **Frontiers in Agronomy**, v. 4, p. 785753, 17 maio 2022.
- DISSANAYAKA, D. M. S. B. et al. Recent insights into the metabolic adaptations of phosphorus-deprived plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 2, p. 199–223, 2 fev. 2021.
- DOĞRU, A. The effect of salt shock on photosystem II and antioxidant activity in two maize genotypes. **Cereal Research Communications**, v. 49, n. 2, p. 255–266, 1 jun. 2020.
- EL ATTAR, I. et al. Phosphorus Availability and its Sustainable Use. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 2022 **22:4**, v. 22, n. 4, p. 5036–5048, 1 set. 2022.
- FERREIRA, L. et al. CARACTERIZAÇÃO DE SERPENTINITO ANTES E APÓS CALCINAÇÃO A 1200°C. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 16, n. 3, p. 363–369, 8 out. 2019.
- GENTY, B. et al. Fate of excitation at PS II in leaves. The non-photochemical side. **Plant Physiol. Biochem.**, v. 0, p. 86-, 1996.
- GENTY, B.; BRIANTAIS, J. M.; BAKER, N. R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects**, v. 990, n. 1, p. 87–92, 27 jan. 1989.
- GUILHERME PEREIRA, C. et al. Eudicots from severely phosphorus-impooverished environments preferentially allocate phosphorus to their mesophyll. **New Phytologist**, v. 218, n. 3, p. 959–973, 1 maio 2018.
- HAN, Y.; WHITE, P. J.; CHENG, L. Mechanisms for improving phosphorus utilization efficiency in plants. **Annals of Botany**, v. 129, n. 3, p. 247–258, 11 fev. 2022.
- HARDER, R. et al. Recycling nutrients contained in human excreta to agriculture: Pathways, processes, and products. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 8, p. 695–743, 18 abr. 2019.
- HIDAKA, A.; KITAYAMA, K. Allocation of foliar phosphorus fractions and leaf traits of tropical tree species in response to decreased soil phosphorus availability on Mount Kinabalu, Borneo. **Journal of Ecology**, v. 99, n. 3, p. 849–857, 1 maio 2011.
- HIDAKA, A.; KITAYAMA, K. Relationship between photosynthetic phosphorus-use efficiency and foliar phosphorus fractions in tropical tree species. **Ecology and Evolution**, v. 3, n. 15, p. 4872–4880, 1 dez. 2013.
- HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. **Plant and Soil**, v. 237, n. 2, p. 173–195, 2001.

- HITTI, Y.; MACPHERSON, S.; LEFSRUD, M. Separate Effects of Sodium on Germination in Saline–Sodic and Alkaline Forms at Different Concentrations. **Plants**, v. 12, n. 6, p. 1234, 8 mar. 2023.
- HOLL, K. D.; AIDE, T. M. When and where to actively restore ecosystems? **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 10, p. 1558–1563, 15 maio 2011.
- HOLZ, M. et al. The effect of root hairs on rhizosphere phosphatase activity. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 183, n. 3, p. 382–388, 1 jun. 2020.
- HUNT, R. Plant Growth Analysis: The Rationale Behind the Use of the Fitted Mathematical Function. **Annals of Botany**, v. 43, n. 2, p. 245–249, fev. 1979.
- ISIDRA-ARELLANO, M. C.; DELAUX, P. M.; VALD°S-L°PEZ, O. The Phosphate Starvation Response System: Its Role in the Regulation of Plant–Microbe Interactions. **Plant and Cell Physiology**, v. 62, n. 3, p. 392–400, 17 jul. 2021.
- KARAK, T.; BHATTACHARYYA, P. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 4, p. 400–408, fev. 2011a.
- KARAK, T.; BHATTACHARYYA, P. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 4, p. 400–408, 1 fev. 2011b.
- KORCHEF, A. et al. Recovery of High Concentrations of Phosphorus and Ammonium through Struvite Crystallization by CO<sub>2</sub> Repelling. **Crystal Research and Technology**, v. 57, n. 11, p. 2200123, 1 nov. 2022.
- LAISK, A. et al. Action spectra of photosystems II and I and quantum yield of photosynthesis in leaves in State 1. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1837, n. 2, p. 315–325, fev. 2014.
- LI, M. et al. Phosphate adsorption on metal oxides and metal hydroxides: A comparative review. **Environmental Reviews**, v. 24, n. 3, p. 319–332, set. 2016.
- LIN, J. et al. Effects of Various Mixed Salt–Alkaline Stress Conditions on Seed Germination and Early Seedling Growth of *Leymus chinensis* from Songnen Grassland of China. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 42, n. 1, 3 jun. 2014.
- LIU, J. et al. High Soil Available Phosphorus Favors Carbon Metabolism in Cotton Leaves in Pot Trials. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, n. 3, p. 974–985, 1 jun. 2021.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 1<sup>a</sup> ed. Nova Odessa, SP: Editora Plantarum LTDA, 1992.
- MALHOTRA, H. et al. Phosphorus nutrition: Plant growth in response to deficiency and excess. **Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance**, p. 171–190, 20 ago. 2018.
- MAPA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Secretaria de Defesa Agropecuária**. Brasília, DF: Assessoria de Comunicação Social / Mapa e Superintendência de Marketing e Comunicação /CONAB, 2017.
- MARTIN, T. M. P. et al. Human urine-based fertilizers: A review. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1838214>, v. 52, n. 6, p. 890–936, 2020.
- MARTIN, T. M. P. et al. Comparative study of environmental impacts related to wheat production with human-urine based fertilizers versus mineral fertilizers. **Journal of Cleaner Production**, v. 382, p. 135123, 1 jan. 2023.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **O Plano Nacional de Fertilizantes.**

Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/o-plano-nacional-de-fertilizantes>>. Acesso em: 13 fev. 2024.

MO, Q. et al. Foliar phosphorus fractions reveal how tropical plants maintain photosynthetic rates despite low soil phosphorus availability. **Functional Ecology**, v. 33, n. 3, p. 503–513, 1 mar. 2019.

MOREIRA, R. T. S. Tecnologia P4TREE<sup>®</sup> para recuperação de fósforo de urina e seu uso como fertilizante: um estudo de caso de teste de tecnologia em uma parceria hélice tríplice. 6 jun. 2022.

**Pesquisa Setorial - ANDA.** Disponível em: <[https://anda.org.br/pesquisa\\_setorial/](https://anda.org.br/pesquisa_setorial/)>. Acesso em: 5 ago. 2023.

PRADHAN, S. K.; HOLOPAINEN, J. K.; HEINONEN-TANSKI, H. Stored human urine supplemented with wood ash as fertilizer in tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivation and its impacts on fruit yield and quality. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 16, p. 7612–7617, 2009.

RANIRO, H. R. et al. New investments in phosphorus research and training are paramount for Brazilian long-term environmental and food security. **Environment Systems and Decisions**, v. 43, n. 3, p. 504–508, 1 set. 2023.

SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. **Análises químicas em plantas.** Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1974.

SCHUMACHER, M. V.; CECONI, D. E.; SANTANA, C. A. Influência de diferentes doses de fósforo no crescimento de mudas de angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida* (Bentham) Brenan). **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 149–155, fev. 2004.

SGARBOSSA, J. et al. Morphology, growth and yield of black oats cultivated in agroforestry systems in southern Brazil. **Agricultural Systems**, v. 184, p. 102911, set. 2020.

SHARKEY, T. D. et al. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves. **Plant, Cell & Environment**, v. 30, n. 9, p. 1035–1040, 1 set. 2007.

SHAVRUKOV, Y. Salt stress or salt shock: which genes are we studying? **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 1, p. 119–127, 1 jan. 2013.

SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, 1 jul. 2011.

SUDHIR, P.; MURTHY, S. D. S. Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis. **Photosynthetica** 2004 42:4, v. 42, n. 4, p. 481–486, dez. 2004.

TEIXEIRA, A. M. DOS S. et al. Estudo do uso de Serpentinó como corretivo de solos agrícolas. **Ii Simpósio De Minerais Industriais Do Nordeste**, 2010.

THANT ZIN, M. M.; KIM, D. J. Simultaneous recovery of phosphorus and nitrogen from sewage sludge ash and food wastewater as struvite by Mg-biochar. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, p. 123704, 5 fev. 2021.

UDAYABHASKAR, R. et al. Environmental, Economic, and Social Aspects of Human Urine Valorization through Microbial Fuel Cells from the Circular Economy Perspective. **Micromachines** 2022, Vol. 13, Page 2239, v. 13, n. 12, p. 2239, 16 dez. 2022.

UENO, Y.; FUJII, M. Three Years Experience of Operating and Selling Recovered Struvite from Full-Scale Plant. <https://doi.org/10.1080/09593332208618196>, v. 22, n. 11, p. 1373–1381, 1 nov. 2010.

ULLRICH, C. I.; NOVACKY, A. J. Extra- and Intracellular pH and Membrane Potential Changes Induced by  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $H_2PO_4^-$ , and  $NO_3^-$  Uptake and Fusicoccin in Root Hairs of *Limnobium stoloniferum*. **Plant Physiology**, v. 94, n. 4, p. 1561–1567, 1 dez. 1990.

WIEN TJES, E.; VAN AMERONGEN, H.; CROCE, R. Quantum Yield of Charge Separation in Photosystem II: Functional Effect of Changes in the Antenna Size upon Light Acclimation. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 117, n. 38, p. 11200–11208, 26 set. 2013.

YU, H. et al. Sustainable phosphorus supply by phosphorus recovery from steelmaking slag: a critical review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106203, 1 maio 2022.

ZUO, Z. et al. The advantage of a two-stage nitrification method for fertilizer recovery from human urine. **Water Research**, v. 235, p. 119932, 15 maio 2023.