

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROBIOLOGIA**

Jéssica Patrícia Oliveira de Mattos

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE ALUMÍNIO, SILÍCIO E SELÊNIO NA
FISIOLOGIA E BIOQUÍMICA DE *Schinus terebinthifolius* RADDI**

Santa Maria, RS
2019

Jéssica Patrícia Oliveira de Mattos

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE ALUMÍNIO, SILÍCIO E SELÊNIO NA FISIOLOGIA E
BIOQUÍMICA DE *Schinus terebinthifolius* RADDI**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agrobiologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agrobiologia**.

Orientadora: Prof^a Dr^a. Luciane Almeri Tabaldi

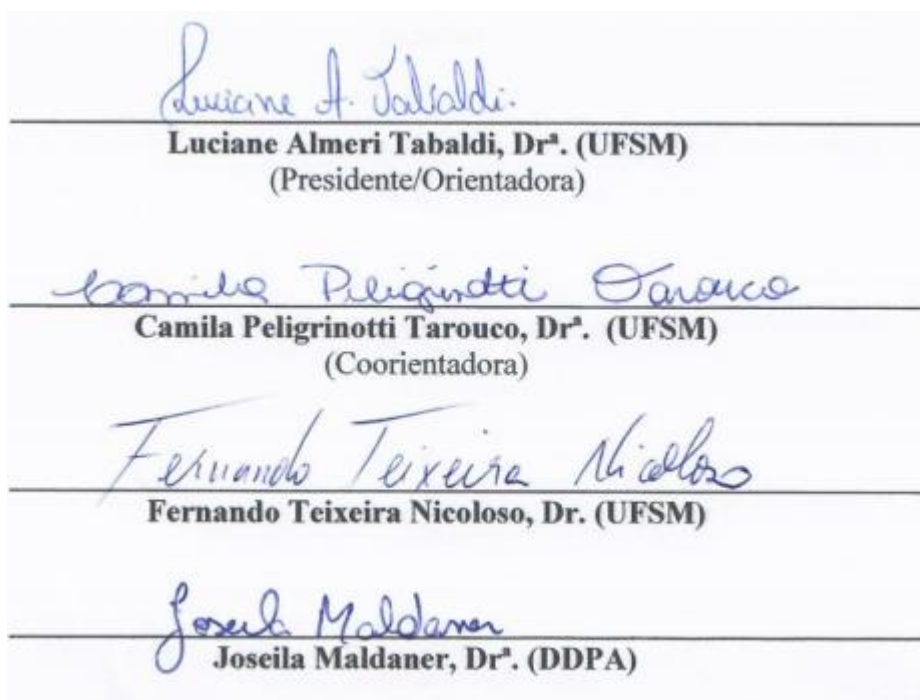
Santa Maria, RS
2019

Jéssica Patrícia Oliveira de Mattos

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE ALUMÍNIO, SILÍCIO E SELÊNIO NA FISIOLOGIA E
BIOQUÍMICA DE *Schinus terebinthifolius* RADDI**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agrobiologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agrobiologia**.

Aprovado em 11 de março de 2019:



Luciane A. Tabaldi

Luciane Almeri Tabaldi, Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Camila Peligrinotti Tarouco

Camila Peligrinotti Tarouco, Dr^a. (UFSM)
(Coorientadora)

Fernando Teixeira Nicoloso

Fernando Teixeira Nicoloso, Dr. (UFSM)

Joseila Maldaner

Joseila Maldaner, Dr^a. (DDPA)

Santa Maria, RS

2019

Aos meus pais, João Tadeu de Mattos e Sueli de Fátima Oliveira de Mattos, dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me concedeu força e serenidade para percorrer esta caminhada.

Aos meus pais, João Tadeu de Mattos e Sueli de Fátima Oliveira de Mattos, que são a minha base emocional e meu incentivo. Obrigada pelo amor incondicional que nutrem por mim, por toda estrutura, educação, amor e carinho que me concederam. As batalhas de vocês tornaram este sonho possível, espero dar muito orgulho a vocês durante minha trajetória. Muito obrigada por tudo, amo vocês! Aos meus irmãos Elisângela Joana Oliveira de Mattos e Júlio César Oliveira de Mattos. Sou muito grata a Deus por ter crescido envolvida pelo amor e proteção de vocês, sei que posso contar com vocês a qualquer momento, minha admiração e amor por vocês é infinita!

Agradeço a todos meus familiares, por compreenderem meus momentos de ausência e sempre estarem na torcida para que tudo ocorresse da melhor forma. Especialmente aos meus queridos avós, Vô Ervino e Vó Nadir, sei que sempre estou nas vossas orações e pensamentos, obrigada por tudo, meus queridos, amo vocês!

As minhas amigas de infância, Laura e Moara e aos demais amigos que mesmo com a distância sempre estiveram presentes e torcendo, obrigada por tudo, amo vocês!

A minha querida orientadora, Lu Tabaldi, por ter me recebido tão bem desde o início, por ser uma excelente orientadora, sempre presente e prestativa. Prof., você foi fundamental para que este trabalho acontecesse, sou extremamente grata por tudo que fizeste por mim!

Agradeço a todos do grupo FisioPlant, aos alunos de Iniciação Científica Daniele, Mirian, Olga e Géssica, obrigada pelos auxílios prestados durante esses dois anos. Aos colegas de mestrado Victória, Jover e Rafael, que se transformaram em amigos durante a trajetória e foram essenciais, sempre disponíveis para trocar conhecimentos e auxiliar durante as dificuldades, muito obrigada!

À Co-orientadora Dr^a. Camila Peligrinotti Tarouco e a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Agrobiologia, especialmente ao professor colaborador deste trabalho, Dr. Fernando Teixeira Nicoloso. Também à CAPES e UFSM por terem possibilitado a realização deste trabalho.

Enfim, a todos que de uma maneira ou outra, permitiram que este momento fosse possível.

E você aprende que realmente pode suportar... que realmente é forte, e que pode ir muito mais longe depois de pensar que não se pode mais. E que realmente a vida tem valor e que você tem valor diante da vida! Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder o bem que poderíamos conquistar se não fosse o medo de tentar.

William Shakespeare

RESUMO

EFEITOS DA ADIÇÃO DE ALUMÍNIO, SILÍCIO E SELÊNIO NA FISIOLOGIA E BIOQUÍMICA DE *Schinus terebinthifolius* RADDI

AUTOR: Jéssica Patrícia Oliveira De Mattos
ORIENTADORA: Luciane Almeri Tabaldi

A região sul do Brasil apresenta solos ácidos, sendo que muitos destes solos são classificados como alumínicos e alíticos, ressaltando a ocorrência de altos teores de alumínio (Al). Este elemento, quando em solos ácidos, apresenta-se na forma trivalente (Al^{+3}) a qual é tóxica para os organismos vegetais. Estudos demonstram a eficácia dos elementos silício (Si) e selênio (Se) na atenuação dos danos causados por elementos fitotóxicos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência da espécie ao Al e o efeito do Si e do Se sobre a toxicidade do Al em plantas de *Schinus terebinthifolius* Raddi sob condições de cultivo hidropônico. O estudo foi conduzido na casa de vegetação e nos Laboratórios de Bioquímica de Plantas do Departamento de Biologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. As plantas de *S. terebinthifolius* foram propagadas via sementes em substrato comercial e posteriormente foram transferidas para cultivo hidropônico em solução nutritiva onde foram adicionadas concentrações de Al, Si e Se em mM, na seguinte forma: Tratamento 1: 0 Al + 0 Se e Si; Tratamento 2: 2,5 Si; Tratamento 3: 0 Al + 0,0025 Se; Tratamento 4: 1,85 Al + 0 Se e Si; Tratamento 5: 1,85 Al + 2,5 Si; Tratamento 6: 1,85 Al + 0,0025 Se; Tratamento 7: 3,71 Al + 0 Se e Si; Tratamento 8: 3,71 Al + 2,5 Si; Tratamento 9: 3,71 Al + 0,0025 Se. Após a exposição aos diferentes tratamentos (21 dias), sob cultivo hidropônico, foi feita a coleta e análise variáveis fisiológicas (biomassa fresca e seca, altura de plantas, variáveis morfológicas do sistema radicular, área foliar e variáveis fotossintéticas), bioquímicas (enzimas antioxidantes, peroxidação lipídica, e conteúdo de peróxido de hidrogênio, ácido ascórbico, tióis não proteicos e pigmentos fotossintéticos). Para as variáveis fisiológicas observou-se que o Al é fitotóxico para esta espécie nas concentrações de 1,85 mM e 3,71 mM Al ocasionando reduções significativas no desenvolvimento de parte aérea e raiz. O Si foi capaz de atenuar os danos causados pelo Al, porém, apenas na menor concentração de Al (1,85 mM), enquanto o Se não mitigou os danos ocasionados pelo elemento fitotóxico. Quanto as variáveis bioquímicas, o Si e o Se apresentaram efeitos benéficos na amenização do estresse causado pelo Al, principalmente através da ativação do sistema antioxidante e na diminuição dos danos causados pela peroxidação lipídica. Desta forma pode-se concluir que a espécie tem o seu desempenho afetado negativamente pela presença do Al, tanto fisiologicamente como bioquimicamente. O Si se apresentou eficiente em reduzir os danos fisiológicos causados pelo Al, principalmente quando se tratou da menor concentração de Al, enquanto o Se não apresentou esse efeito. Bioquimicamente notou-se que Si e Se apresentam capacidade para atenuar os danos ocasionados pelo Al através de uma manutenção do sistema antioxidante. Portanto, nossos resultados indicam que o Si e o Se foram eficientes em aliviar danos fisiológicos e bioquímicos causando por Al em plantas de *S. terebinthifolius*.

Palavras-chave: Solos Ácidos. Aroeira-Vermelha. Crescimento. Estresse Oxidativo. Toxicidade.

ABSTRACT

EFFECTS OF THE ADDITION OF ALUMINUM, SILICON AND SELENIUM IN PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF *Schinus terebinthifolius* RADDI

AUTHOR: Jéssica Patrícia Oliveira De Mattos
ADVISOR: Luciane Almeri Tabaldi

Brazilian Southern region presents acidic soils, being many of them classified as aluminum and alicytes, highlighting aluminum (Al) high levels occurrence. When in acid soils, the element is present in a trivalent form (Al^{+3}), which is toxic for vegetal organisms. Studies already demonstrated the silicon (Si) and selenium (Se) efficacy as damage attenuators caused by phytotoxic elements. In this sense, our objective was to evaluate the resistance of the species to Al and Si and Se effect on Al toxicity in plants of *Schinus terebinthifolius* Raddi under hydroponic conditions. This study was conducted in greenhouse and in Plant Biochemistry Laboratory at Biology Department, Federal University of Santa Maria, RS. *S. terebinthifolius* plants were propagated via seeds in commercial substrate and later transferred to hydroponic culture in nutrient solution, where Al, Si and Se concentrations in mM were added as follows: Treatment 1: 0 Al + 0 Se and Si; Treatment 2: 2.5 Si; Treatment 3: 0 Al + 0.0025 Se; Treatment 4: 1.85 Al + 0 Se and Si; Treatment 5: 1.85 Al + 2.5 Si; Treatment 6: 1.85 Al + 0.0025 Se; Treatment 7: 3.71 Al + 0 Se and Si; Treatment 8: 3.71 Al + 2.5 Si; Treatment 9: 3.71 Al + 0.0025 Se). Following 21 days exposure to different treatments, under hydroponic cultivation were evaluated physiological variables (fresh and dry biomass, plant height, root system morphological variables, leaf area and photosynthetic variables) as well as biochemical (antioxidant enzymes, lipid peroxidation, and hydrogen peroxide content, ascorbic acid, non-protein thiols and photosynthetic pigments). Considering physiological variables, it was observed that Al is phytotoxic to this species at concentrations of 1.85 mM and 3.71 mM Al leading to significant reductions in shoot and root development. While Se did not mitigate damages caused by Al exposure, Si was able to alleviate only the damages caused by lowest Al concentrations (1.85 mM). Regarding biochemical variables, both Si and Se presented beneficial effects in Al-stress alleviation, mainly through antioxidant system activation and reduction of lipid peroxidation damages. In this way it can be concluded that the species has its performance negatively affected by Al presence, both physiologically and biochemically. However, Si was efficient in reducing physiological damage caused by Al, especially when Al concentrations were lower, whereas Se did not present this effect. Biochemically it has been noted that both Si and Se were capable of alleviating damage caused by Al through antioxidant system maintenance. Therefore, our results allow us to conclude that Si and Se elements were efficient in alleviating physiological and biochemical damages caused by aluminum in *S. terebinthifolius* plants.

Keywords: Acidic Soils, Red-Aroeira, Growth, Oxidative Stress, Toxicity.

LISTA DE FIGURAS

Manuscrito I - RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi SUBMETIDAS A TOXICIDADE DO ALUMÍNIO NA PRESENÇA DE SILÍCIO E SELÊNIO

Figura 1- Efeito da adição do Al, Si e Se no comprimento da raiz principal (cm) (A), área foliar (cm²) (B), massa seca foliar (C) e massa seca de raízes (D), relação matéria seca da parte aérea/matéria seca radicular (E) de plantas de *Schinus terebinthifolius* cultivadas em sistema hidropônico.....29

Figura 2- Comprimento da raiz (cm) (A), área superficial de raízes (cm²) (B), volume das raízes (cm³) (C) e diâmetro das raízes (mm) (D) de plantas de *Schinus terebinthifolius* exposta: alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.....

Manuscrito II - SELÊNIO E SILÍCIO AMENIZAM OS DANOS OXIDATIVOS CAUSADOS PELO ALUMÍNIO EM PLANTAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi

Figura 1- Biomassa total (g) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.....48

Figura 2- Eficiência de carboxilação da Rubisco (A), taxa transpiratória (B), taxa fotossintética (C), condutância estomática de vapores de água (D), eficiência no uso da água (E) e concentração interna de CO₂ (F) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas por 21 dias ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.....49

Figura 3- Conteúdo de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B), clorofilas totais (C), relação clorofila *a*/clorofila *b* (D), carotenoides (E) e relação carotenoides/clorofilas totais (F) de folhas de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas por 21 dias ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.....50

Figura 4- Conteúdo de H₂O₂ em parte aérea (A) e raízes (B); Peroxidação de lipídios de membrana na parte aérea (C) e raízes (D); Atividade da enzima SOD em parte aérea (E) e raízes (F); e atividade da enzima POD em raízes (G) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas por 21 dias ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.....51

Figura 5- Conteúdo de tióis não protéicos (NPSH) em parte aérea (A) e nas raízes (B) e conteúdo de ácido ascórbico (AsA) em parte aérea (C) e nas raízes (D) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas por 21 dias ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.....52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 <i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi.....	14
3.2 Alumínio.....	15
3.3	
Silício.....	165
3.4	
Selênio.....	177
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
MANUSCRITO I - RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DE <i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi SUBMETIDAS A TOXICIDADE DO ALUMÍNIO NA PRESENÇA DE SILÍCIO E SELÊNIO.....	19
RESUMO.....	20
ABSTRACT.....	21
INTRODUÇÃO.....	22
MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
RESULTADOS.....	24
DISCUSSÃO.....	25
CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIAS.....	31
MANUSCRITO II - SELÊNIO E SILÍCIO AMENIZAM OS DANOS OXIDATIVOS CAUSADOS PELO ALUMÍNIO EM PLANTAS DE <i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi.....	36
RESUMO.....	36
ABSTRACT.....	37
INTRODUÇÃO.....	38
MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
RESULTADOS.....	41
DISCUSSÃO.....	41
CONCLUSÃO.....	45
7REFERÊNCIAS.....	5
3	
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
REFERÊNCIAS.....	60
0	
APÊNDICE.....	65

1 INTRODUÇÃO

Os principais solos ácidos brasileiros são da ordem dos latossolos e argissolos, os quais estão presentes no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Muitos destes solos são classificados como alumínicos e alíticos, ressaltando a ocorrência de altos teores de alumínio (Al) (CUNHA et al., 2014).

O Al é o terceiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre e a sua presença em solos ácidos é um fator de estresse que limita a produção vegetal. Este elemento quando em pH abaixo de 5,5 apresenta-se em forma de alumínio trivalente (Al^{3+}), a qual é tóxica para os vegetais (PEREIRA; RYAN, 2018; SINGH et al., 2017; SADE et al., 2016). Nesse contexto, algumas alternativas podem ser investigadas a fim de solucionar esta problemática. Estudos demonstram a eficácia dos elementos silício (Si) e selênio (Se) na atenuação dos danos causados por elementos fitotóxicos (DORNELES et al., 2016; HU et al., 2014).

O Si é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, e apresenta a capacidade de induzir as plantas a aumentarem a tolerância a estresses bióticos e abióticos. Estudos realizados com Si demonstram o seu potencial contra diferentes estresses tais como salinidade, seca e toxicidade por metais (COSKUN et al., 2016; FLAM-SHEPHERD et al., 2018). Na presença do Si, as plantas, dentro das condições ambientais encontradas, conseguem alcançar o seu máximo desenvolvimento (REYNOLDS et al., 2016; FREW et al., 2018).

Da mesma forma que o Si, o Se apresenta capacidade de proteger os vegetais contra a fitotoxicidade de diferentes elementos químicos, podendo agir como um antioxidante, além de promover uma redução na acumulação de metais (SCHIAVON et al., 2017; HALIM et al., 2017; KUMAR et al., 2012; DUAN et al., 2013). Porém, altas concentrações deste elemento podem ser tóxicas para humanos, animais e plantas (EICH-GREATOREX et al., 2007).

Muitas plantas lenhosas nativas de solos ácidos apresentam mecanismos para tolerar as condições oferecidas por este solo, tais como o alto teor de Al^{3+} . No entanto, os vegetais que se distribuem em regiões tropicais podem ou não ser acumuladores deste metal. Aliado a isto, pouca atenção tem sido dada as espécies florestais, especialmente as nativas, em relação ao seu comportamento em relação ao Al (BRUNNER; SPERISEN, 2013; POSSEBOM et al., 2018). A espécie *Schinus terebinthifolius* Raddi, comumente denominada como aroeira, aroeira-vermelha e aroeira-da-praia, é uma árvore nativa da América do Sul que se distribui por toda

extensão do Brasil. É uma espécie que apresenta potencial madeireiro e é recomendada para recomposição de áreas degradadas. Devido ao seu caráter rústico e pioneiro, a espécie pode se estabelecer inclusive em solos com restrições químicas, físicas e hídricas (CARVALHO, 2003). Além disso, *S. terebinthifolius* também apresenta potencial medicinal, sendo que as folhas e casca deste vegetal são utilizadas na medicina popular e tem sua eficácia terapêutica comprovada em diversos estudos científicos, onde são atribuídas atividade anti-inflamatória, anti-edema e cicatrizante (LORENZI; MATOS, 2002; MEDEIROS et al., 2007; CAVALHER-MACHADO et al., 2008).

Assim, tendo em vista que o Al em solos ácidos é um elemento fitotóxico que acarreta danos aos vegetais e que o Si e o Se podem diminuir os efeitos negativos de estresses abióticos, ressalta-se a necessidade de pesquisas que envolvam estes fatores, buscando elucidar, especialmente, os processos metabólicos envolvidos. Nesse sentido, é importante considerar espécies que se encontram naturalmente em solos ácidos, tais como *S. terebinthifolius*, a qual é uma espécie nativa, que apresenta grande potencial ecológico, econômico, alimentício e medicinal. Além disso, trata-se de uma espécie florestal, fato que justifica fortemente este estudo, pois trabalhos com este viés são pouco realizados em espécies arbóreas. Desta forma, pretende-se compreender mecanismos fisiológicos, bioquímicos e genotóxicos que a planta apresenta quando em contato com o Al, Si e Se, possibilitando a seleção de espécies arbóreas para a restauração de solos ácidos e áreas contaminadas com metais, além de potencial como espécie de fitorremediação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Verificar as variáveis fisiológicas e bioquímicas que plantas de *Schinus terebinthifolius* apresentam quando em contato com alumínio, silício e selênio sob condições de cultivo hidropônico.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a tolerância ou sensibilidade da espécie ao Al, e a partir disso verificar o potencial do Si e Se em amenizar a toxicidade do Al.
- Caracterizar respostas fisiológicas (parâmetros fotossintéticos, produção de biomassa, altura de plantas e parâmetros morfológicos do sistema radicular) e bioquímicas (teor de pigmentos fotossintéticos, peroxidação lipídica, atividade de enzimas antioxidantes, e conteúdo

de peróxido de hidrogênio, tióis não protéicos e ácido ascórbico) em plantas de *S. terebinthifolius* expostas à diferente concentração de Al, Si e Se.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Schinus terebinthifolius* Raddi

Conhecida popularmente como aroeira, aroeira-vermelha, aroeira mansa, aroeira branca e aroeira da praia, a *S. terebinthifolius* é uma espécie nativa da América do Sul pertencente à família Anacardiaceae, que no Brasil é representada por 14 gêneros e 57 espécies (SILVALUZ; PIRANI, 2010; BENDAOUD et al., 2010). É uma espécie florestal, perenifólia, pioneira e heliófita, que pode atingir até 10 metros de altura, apresentando copa larga e tronco de 30 a 60 centímetros. Possui folhas compostas com 3 a 10 pares de folíolos imparipinados, flores pequenas esbranquiçadas e frutos do tipo drupa de cor vermelha (LORENZI, 2014).

Schinus terebinthifolius possui madeira moderadamente pesada, bastante resistente e de boa durabilidade. É uma das espécies mais procuradas pela avifauna, sendo recomendada na recomposição de áreas degradadas (BACKES; IRGANG, 2009; LORENZI, 2014). O fruto de *S. terebinthifolius* é comestível sendo utilizado como tempero em preparações culinárias, tanto no mercado nacional quanto internacional (CAVALCANTI; BRITO, 2009).

A família Anacardiaceae apresenta comumente triterpenos, lipídios fenólicos, biflavonóides, fenóis e derivados de ácido cinâmico (CORREIA et al., 2006). O estudo fitoquímico do extrato etanólico de folhas de *S. terebinthifolius* permitiu a identificação de galato de etilo, miricetrina, quercitina, galato de metilo e miricetina, os quais estão relacionados a capacidade antioxidante do extrato de *S. terebinthifolius* (CERUKS et al., 2007). Já o estudo de Lima et al. (2006) demonstrou a presença de fenóis, flavonas, flavonóides, xantonas, leucoantocianidinas, flavanonas e esteróides livres no extrato etanólico das folhas de *S. terebinthifolius*.

Na medicina popular esta espécie é utilizada como antioxidante, antimicrobiana, anti-inflamatória, analgésica, depurativa, gastroprotetora, anti-ulcera, antibacteriana, antifúngica e antialérgica (BRAGA et al., 2013; DAWKINS et al., 2016; ULIANA et al., 2016)

As partes utilizadas de *S. terebinthifolius* que apresentam propriedades medicinais são as cascas, as folhas e os frutos. A casca utilizada em forma de decocção possui atividade cicatrizante da pele e de mucosas em geral, podendo ser ingerido para combater azia e gastrite (MATOS, 2002). As folhas são utilizadas na forma de decocção como expectorante,

antisséptica, antidiarreica e cicatrizante (DI-STASI; HIRUMA-LIMA, 2002; LORENZI; MATOS, 2002).

3.2 Alumínio

O sul do Brasil apresenta solos ácidos, sendo que muitos destes solos são classificados como alumínicos e alíticos, ressaltando a ocorrência de altos teores de alumínio (Al) (CUNHA et al., 2014). O Al é o terceiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre e a sua presença em solos ácidos é um fator de estresse que limita a produção vegetal. Este elemento quando em pH abaixo de 5,5 apresenta-se em forma de Al trivalente (Al^{3+}), a qual é tóxica para os vegetais (PEREIRA; RYAN, 2018; SINGH et al., 2017; SADE et al., 2016). Ademais, a acidificação gera uma maior disponibilidade de manganês (Mn) fitotóxico, bem como a deficiência de nutrientes, tais como fósforo, cálcio, magnésio e potássio, prejudicando o crescimento das plantas (PONTIGO et al., 2015).

O primeiro sintoma ocasionado pela fitotoxicidade do Al é a inibição no crescimento da raiz, a qual acarreta deficiências na absorção de água e nutrientes. Além disso, o Al está envolvido em alterações na membrana, enzimas e DNA (FAMOSO et al., 2010; ACHARY et al., 2009). O Al interage negativamente com a membrana plasmática, podendo se ligar a proteínas e a lipídios, causando a despolarização da membrana, dessa forma afetando o transporte de íons e processos celulares, perturbando a homeostase celular (BOSE et al., 2011).

Nas células da raiz o Al causa diminuição na deposição da parede celular, modificando a estrutura da membrana plasmática e interagindo com o DNA, aumentando a rigidez da dupla hélice e reduzindo a replicação (KOCHIAN et al., 2004; MC KENNA et al., 2016). Além disso, o Al pode afetar toda dinâmica do citoesqueleto, pois interage com microtúbulos e filamentos de actina, de forma direta ou indireta, dessa forma perturba a organização, polimerização e despolimerização destes componentes. Microtúbulos e microfilamentos participam de etapas extremamente importantes na divisão celular, tal como a formação da banda pré prófase e a movimentação dos cromossomos no fuso mitótico (FRANTZIOS et al., 2000).

O estresse causado por Al também ocasiona a produção de espécies reativas de oxigênio tais como superóxido, radical hidroxila e peróxido de hidrogênio, os quais podem ser removidos das células por enzimas antioxidantes (superóxido dismutase, peroxidases, catalase e glutathione redutase, entre outras) e compostos antioxidantes de baixo peso molecular como ácido ascórbico, glutathione, compostos fenólicos, flavonóides e carotenóides (GUO et al., 2007; LEE et al., 2007; DABROWSKA et al., 2007).

3.3 Silício

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, não sendo um elemento essencial as plantas, porém está associado a vários efeitos benéficos (MARSCHNER, 2011). Apresenta a capacidade de aumentar a tolerância contra diferentes estresses tais como salinidade, seca e toxicidade por metais (COSKUN et al., 2016; FLAM-SHEPHERD et al., 2018). Através da proteção e nutrição oferecida por este elemento, dentro das condições ambientais encontradas, as plantas conseguem alcançar o seu máximo desenvolvimento (REYNOLDS et al., 2016; FREW et al., 2018).

O Si pode perfazer até 70% da massa do solo na forma de minerais de silicato e solúvel em água como ácido ortossilícico. Na sua forma solúvel ele é absorvido pelas raízes e polimerizado na sua forma insolúvel nas paredes celulares, espaços intercelulares e na camada subcuticular (MA; YAMAJI, 2006).

Em muitas plantas o Si é absorvido pelas raízes, translocado para a parte aérea e depositado como sílica amorfa em diferentes partes da planta, tais como parede celular de folhas, hastes, cascas, células de raízes, tubérculos e inflorescências (CURRIE; PERRY, 2007; KELLER et al., 2015).

Inicialmente os efeitos benéficos do Si foram atribuídos a uma barreira física que seria formada devido a deposição de sílica, porém diferentes análises demonstram que a presença deste elemento induz a defesa das plantas (MARSCHNER, 2011). Acerca da relação do Si com estresses bióticos, primeiramente apontava-se que a defesa promovida por Si estava interligada com a silicificação da parede celular, impedindo a penetração de patógenos (WAGNER et al., 1940). Posteriormente evidências demonstraram que o Si atua, além da formação de uma barreira mecânica, através da acumulação de fitoalexinas, as quais impedem a propagação de algumas espécies de parasitas (SAMUELS et al., 1991; CHÉRIF et al., 1992; RÉMUS-BOREL et al., 2009). Além de parasitas, também foram realizados estudos com herbívoros. Verificou-se que o Si aumenta a abrasividade das folhas, ocasionado desgaste da mandíbula e também mediou a elevação dos níveis de jasmonato (MASSEY; HARTLEY, 2009; YE et al., 2013).

Em relação aos estresses abióticos, acredita-se que Si atue como um reforço das barreiras apoplásticas através de sua deposição. Também pode precipitar substâncias tóxicas na matriz celular, impedindo o transporte e acúmulo dos elementos fitotóxicos, desta forma diminuindo o estresse oxidativo (FLAM-SHEPHERD et al., 2018; BLAMEY et al., 2018; MA et al., 2016; WU et al., 2016).

Coskun et al. (2018) destacam que a amenização do estresse e as interferências no metabolismo causadas por Si originam-se através de um mecanismo em comum,

principalmente através da obstrução apoplástica formada pela deposição de Si. Este atua impedindo as influências bióticas e abióticas, consequentemente diminuindo o estresse e promovendo uma defesa mais eficiente das plantas.

3.4 Selênio

O selênio (Se) é um elemento metalóide que ocorre na maioria dos ambientes. Até o momento, não há evidências de que este elemento é essencial as plantas, porém estudos demonstram que baixas concentrações de Se são benéficas, podendo agir como um antioxidante e diminuindo a acumulação de metais (KUMAR et al., 2012; SCHIAVON et al., 2017; HALIM et al., 2017; DUAN et al., 2013). Este elemento é benéfico especialmente nas espécies hiperacumuladoras, que demonstram maior formação de biomassa, mais resistência ao estresse oxidativo e aos patógenos (QUINN et al., 2010; BOYD, 2010). Porém, altas concentrações deste elemento podem ser tóxicas para humanos, animais e plantas, sendo que o benefício ou malefício que podem ser provocados pelo Se são determinados através de uma estreita diferença de dosagem (EICH-GREATOREX et al., 2007).

As plantas utilizam o Se da solução do solo na forma de selenato. Em espécies não acumuladoras, o Se também apresenta benefícios para as plantas, sendo componente do aminoácido selenocisteína e de enzimas tais como glutathione peroxidase, iodotironina deiodinases e tioredoxina redutase (HAJIBOLAND et al., 2015; NAZ et al., 2015; JIANG et al., 2015; HAWRYLAK-NOWAK et al., 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão deste trabalho serão apresentados em dois manuscritos, como segue:

Manuscrito I: RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi SUBMETIDAS A TOXICIDADE DO ALUMÍNIO NA PRESENÇA DE SILÍCIO E SELÊNIO

Manuscrito II: SELÊNIO E SILÍCIO AMENIZAM OS DANOS OXIDATIVOS CAUSADOS PELO ALUMÍNIO EM PLANTAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi

MANUSCRITO I

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi SUBMETIDAS A
TOXICIDADE DO ALUMÍNIO NA PRESENÇA DE SILÍCIO E SELÊNIO**

RESUMO

RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi SUBMETIDAS A TOXICIDADE DO ALUMÍNIO NA PRESENÇA DE SILÍCIO E SELÊNIO

AUTOR: Jéssica Patrícia Oliveira De Mattos

ORIENTADORA: Luciane Almeri Tabaldi

O Brasil possui solos ácidos com altos teores de alumínio (Al) e sabe-se que este elemento quando em pH abaixo de 5,5 apresenta-se na forma trivalente (Al^{+3}), a qual é fitotóxica e afeta o desenvolvimento de diversas culturas. Estudos demonstram a eficácia dos elementos silício (Si) e selênio (Se) na atenuação dos danos causados por elementos fitotóxicos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi verificar a resistência ao Al e avaliar o efeito do Si e do Se em amenizar a toxicidade do Al sobre variáveis fisiológicas em plantas de *Schinus terebinthifolius* Raddi sob condições de cultivo hidropônico. As plantas de *S. terebinthifolius* foram propagadas via sementes em substrato comercial e posteriormente foram transferidas para cultivo hidropônico em solução nutritiva onde foram adicionadas concentrações de Al, Si e Se em mM, da seguinte forma: Tratamento 1: 0 Al + 0 Se e Si; Tratamento 2: 2,5 Si; Tratamento 3: 0 Al + 0,0025 Se; Tratamento 4: 1,85 Al + 0 Se e Si; Tratamento 5: 1,85 Al + 2,5 Si; Tratamento 6: 1,85 Al + 0,0025 Se; Tratamento 7: 3,71 Al + 0 Se e Si; Tratamento 8: 3,71 Al + 2,5 Si; Tratamento 9: 3,71 Al + 0,0025 Se. Após 21 dias de exposição aos tratamentos, foram realizadas as análises de biomassa seca, altura de plantas, variáveis morfológicas do sistema radicular e área foliar. Observou-se que o Al é fitotóxico para esta espécie nas concentrações de 1,85 e 3,71 mM ocasionando reduções significativas no desenvolvimento de parte aérea e raízes. Por outro lado, o Si foi capaz de mitigar as reduções no crescimento radicular e da parte aérea, porém, isto ocorreu apenas na menor concentração de Al (1,85 mM), enquanto o Se não mitigou os danos ocasionados pelo Al.

Palavras-chave: Aroeira; Solos ácidos; toxicidade; elementos amenizadores.

ABSTRACT

PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF *Schinus terebinthifolius* Raddi SUBMITTED TO ALUMINUM TOXICITY IN THE PRESENCE OF SILICON AND SELENIUM

AUTHOR: Jéssica Patrícia Oliveira De Mattos
ADVISOR: Luciane Almeri Tabaldi

Brazil has acidic soils with high aluminum (Al) content and it is already known that, when at pH below 5.5, this element is present in a trivalent (Al^{+3}) form, which is phytotoxic, affecting development of various crops. Studies demonstrate that silicon (Si) and selenium (Se) efficacy in attenuation damage caused by phytotoxic elements. Thus, main objective of present study was to verify the resistance to Al and evaluate Si and Se effect on reducing Al toxicity on physiological variables in *Schinus terebinthifolius* Raddi plants under hydroponic conditions. *S. terebinthifolius* plants were propagated via seeds in commercial substrate and later transferred to hydroponic culture in nutrient solution, where Al, Si and Se concentrations in mM were added as follows: Treatment 1: 0 Al + 0 Se e Si ; Treatment 2: 2.5 Si; Treatment 3: 0 Al + 0.0025 Se; Treatment 4: 1.85 Al + 0 Se and Si; Treatment 5: 1.85 Al + 2.5 Si; Treatment 6: 1.85 Al + 0.0025 Se; Treatment 7: 3.71 Al + 0 Se and Si; Treatment 8: 3.71 Al + 2.5 Si; Treatment 9: 3.71 Al + 0.0025 Se. Following 21 days exposure to treatments, were evaluated biomass, plant height, root system morphological parameters and leaf area. It was observed that Al is phytotoxic to this species in concentrations of 1.85 and 3.71 mM leading to significant reductions in shoot and root growth. In this sense, Si was able to mitigate reductions in root and shoot growth, but only at lower Al concentration (1.85mM), while Se did not mitigate the damage caused by Al.

Keywords: Aroeira; Acidic Soils; toxicity; attenuator elements.

INTRODUÇÃO

A toxicidade do alumínio (Al) reduz o rendimento das culturas em solos ácidos. Em valores de pH abaixo de 5,5 íons Al^{3+} são dissolvidos a partir de minerais de argila e se tornam tóxicos às raízes das plantas. O primeiro sintoma ocasionado pela fitotoxicidade do Al é a inibição no crescimento da raiz, a qual ocasiona deficiências na absorção de água e nutrientes, sendo este um dos principais sintomas que desencadeia redução no rendimento das culturas afetadas pelo Al (KOCHIAN et al., 2015; PEREIRA; RYAN, 2018; SINGH et al., 2017). Além disso, o Al pode se ligar a proteínas e lipídios, causando a despolarização da membrana, dessa forma afetando o transporte de íons e processos celulares (BOSE et al., 2011). Também interfere no DNA aumentando a rigidez da dupla hélice e reduzindo a replicação (FAMOSO et al., 2010; ACHARY et al., 2009; KOCHIAN et al., 2004; MC KENNA et al., 2016).

Pesquisas vem apontando a eficácia da aplicação dos elementos silício (Si) e selênio (Se) na atenuação dos danos causados por elementos fitotóxicos (DORNELES et al., 2016; HU et al., 2014). Estudos realizados com Si demonstram o seu potencial em remediar diferentes estresses, tais como salinidade e seca, além da capacidade de aumentar a tolerância das plantas através da obstrução apoplástica formada pela deposição de Si (FAUTEUX et al., 2005; COSKUN et al., 2018). Em baixas concentrações teciduais, o Se promove o crescimento e a produtividade das plantas, podendo agir como um antioxidante e diminuindo a acumulação de metais (KUMAR et al., 2012; SCHIAVON et al., 2017; HALIM et al., 2017; DUAN et al., 2013).

Muitas plantas lenhosas nativas de solos ácidos apresentam mecanismos para tolerar as condições oferecidas por estes solos, tais como o alto teor de Al^{3+} . A espécie *Schinus terebinthifolius* Raddi é uma árvore nativa da América do Sul, comumente denominada como aroeira, aroeira-vermelha e aroeira-da-praia. É uma espécie que apresenta potencial madeireiro e é recomendada para recomposição de áreas degradadas. *Schinus terebinthifolius* se desenvolve especialmente em solos úmidos e orgânicos, mas cresce em qualquer tipo de solo. É capaz de suportar inundações, incêndios e secas, demonstrando uma eficiente tolerância a diferentes tipos de estresses (LENZI; ORTH, 2004). Acredita-se que *S. terebinthifolius* possa apresentar tolerância ao Al, uma vez que é possível observar a ocorrência natural dessa espécie nesses solos ácidos. No entanto, até o momento não foram encontrados registros científicos comprovando ou refutando a hipótese de que esta espécie seja tolerante ao Al^{3+} .

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi verificar a resistência ao Al e avaliar o efeito do Si e do Se em amenizar a toxicidade do Al sobre variáveis fisiológicas em plantas de *S. terebinthifolius* sob condições de cultivo hidropônico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na casa de vegetação e nos Laboratórios de Bioquímica de Plantas do Departamento de Biologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. Sementes de *Schinus terebinthifolius* provenientes do Centro de Pesquisas em Florestas – DDPA de Santa Maria, RS, foram semeadas em bandejas plásticas pretas de 38 cm x 56 cm, contendo substrato H.Decker^R Florestal, sendo irrigadas a cada três dias com solução nutritiva completa, em pH de $4,5 \pm 0,1$. A solução nutritiva teve a seguinte composição (em μM): 6090,5 de N; 974,3 de Mg; 4986,76 de Cl; 2679,2 de K; 2436,2 de Ca; 359,9 de S; 243,592 de P; 0,47 de Cu; 2,00 de Mn; 1,99 de Zn; 0,17 de Ni; 24,97 de B; 0,52 de Mo; 47,99 de Fe ($\text{FeSO}_4/\text{Na-EDTA}$).

Após a germinação e crescimento inicial das mudas, num período de aproximadamente 30 dias, plantas homogêneas, com cerca de 10 cm de altura foram transferidas para sistema hidropônico. As plantas foram fixadas por meio de esponjas em placas de poliestireno (isopor) contendo furos, em bandejas plásticas contendo 17 L de solução nutritiva completa como descrito acima. Cada bandeja suportou 15 plantas. Após cinco dias de aclimação nesse sistema conforme método de Bandinelli et al. (2013), foi aferido o comprimento da raiz principal (comprimento inicial) de todas as plantas utilizando-se régua graduada em milímetros e então as plantas foram transferidas para uma nova solução nutritiva contendo os tratamentos.

Cultivo hidropônico em diferentes concentrações de Al, Si e Se

Plantas de *S. terebinthifolius* provenientes do sistema de aclimação descrito acima foram transferidas para bandejas plásticas (17 L) contendo solução nutritiva (todos os nutrientes foram fornecidos como descrito acima, exceto o fósforo (P), o qual foi adicionado à solução na concentração de $50 \mu\text{M}$, com o objetivo de fornecer P para as plantas e ao mesmo tempo evitar interações físico-químicas com o Al (GESSA et al., 2005)). Os tratamentos foram aplicados nessa solução, os quais consistiram nas seguintes combinações (Al, Si e Se em mM): Tratamento 1: 0 Al + 0 Se e Si; Tratamento 2: 2,5 Si; Tratamento 3: 0 Al + 0,0025 Se; Tratamento 4: 1,85 Al + 0 Se e Si; Tratamento 5: 1,85 Al + 2,5 Si; Tratamento 6: 1,85 Al + 0,0025 Se; Tratamento 7: 3,71 Al + 0 Se e Si; Tratamento 8: 3,71 Al + 2,5 Si; Tratamento 9: 3,71 Al + 0,0025 Se. As concentrações de Al, Si e Se foram definidas a partir de experimentos prévios realizados pelo grupo de pesquisa (DORNELES et al., 2016; PEREIRA et al., 2018; TABALDI et al., 2007, 2009). Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições para cada tratamento e 5 plantas por repetição. A solução

nutritiva foi trocada a cada sete dias, sendo o pH da solução ajustado diariamente ($4,5 \pm 0,1$) com uma solução de HCl ou NaOH (1 M).

Variáveis avaliadas após a coleta

Após 21 dias de exposição ao Al, Si e Se, raízes e parte aérea de plantas de *S. terebinthifolius* foram coletadas para determinação das seguintes variáveis:

- Comprimento da raiz principal (comprimento final) e altura de plantas: determinada com régua graduada em milímetros. Com os valores de comprimento inicial e final, foi possível determinar a taxa de crescimento relativo da raiz principal;
- Comprimento, área superficial, volume de raízes e área foliar: determinado através de scanner Epson 11000XL, no qual as raízes e folhas foram digitalizadas e analisadas pelo software WinRHIZO Pro;
- Biomassa seca de raízes e de parte aérea: as amostras foram colocadas em sacos de papel e levadas para a estufa à 65°C até atingir peso constante para determinação da biomassa seca;
- Relação matéria seca da parte aérea/matéria seca radicular (MSPA/MSR), através da razão entre a MSPA e a MSR.

Análise estatística dos dados

Foram verificadas a normalidade da distribuição dos erros através do teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade das variâncias dos erros através do teste de Bartlett (STORCK et al., 2011) para todas as variáveis do experimento. Quando atendidos estes pressupostos, procedeu-se a análise de variância e teste de Scott-Knott para os tratamentos em 5% de probabilidade de erro, utilizando o aplicativo Sisvar (FERREIRA, 2008).

RESULTADOS

A presença isolada de silício (Si) ou selênio (Se) no meio de crescimento não diferiu do controle quanto ao comprimento de raiz principal (Figura 1A). A adição de Al ocasionou reduções severas do comprimento da raiz principal em relação ao controle. No entanto, a presença de Si, juntamente com a menor concentração de Al (1,85 mM, T5) mitigou os efeitos negativos do Al. A adição de Se, em ambas as concentrações de Al, não amenizou os efeitos negativos do Al.

Para área foliar e massa seca foliar, o Si de forma isolada não diferiu do controle, no entanto, o Se isoladamente ocasionou uma pequena redução (Figura 1B e 1C). O Al, em ambas

as concentrações, provocou redução da área foliar e massa seca foliar. A presença do Si reduziu os efeitos tóxicos do Al na concentração de 1,85 mM e o Se não mitigou o efeito tóxico do Al.

Para massa seca de raízes, o Si de forma isolada provocou redução enquanto a adição isolada de Se provocou a mesma resposta do controle (Figura 1D). Al ocasionou redução nesta variável, a qual ficou significativamente mais evidente com o aumento da concentração. O Si mitigou os danos de Al na concentração de 1,85 mM de Al, enquanto Se não amenizou os prejuízos causados por Al.

Para relação de massa seca de parte aérea e radicular, a adição isolada de Si apresentou a mesma resposta do controle, enquanto Se isoladamente provocou redução nesta variável (Figura 1E). Si e Se não mitigaram os danos ocasionados pelo Al na relação de massa seca de parte aérea e radicular.

A presença de Al reduziu o comprimento radicular. A adição isolada de Se aumentou o comprimento total das raízes quando comparado ao controle. A presença de Si junto a menor concentração de Al (1,85 mM) reduziu o efeito tóxico do Al. Por outro lado, a presença de Se não mitigou o efeito tóxico do Al no comprimento das raízes.

O Al ocasionou redução para área superficial e volume de raízes (Figura 2B e2C). A presença de Si isoladamente provocou uma pequena redução comparando-se ao controle, mas mitigou os efeitos tóxicos em ambas as concentrações de Al, enquanto o Se não aumentou a área superficial e o volume radicular.

Para o diâmetro de raízes, o Al provocou decréscimos significativos que ficaram mais evidentes com o aumento da concentração (Figura 2D). O Si de forma isolada reduziu o diâmetro das raízes, porém na presença de 1,85 mM de Al, a adição de Si causou um aumento no diâmetro. O Se de forma isolada causou uma pequena redução, em relação ao controle, e juntamente com o Al não foi benéfico.

DISCUSSÃO

Através dos resultados obtidos observa-se que o alumínio (Al) afetou gravemente o desenvolvimento de plantas de *Schinus terebinthifolius*, provocando decréscimo em todas as variáveis avaliadas para raiz e parte aérea. As respostas ocasionadas na raiz são os principais sintomas provocados pelo Al, visto que o sistema radicular é o primeiro órgão a entrar em contato com o elemento. O Al apresenta uma grande afinidade pela parede celular dos ápices radiculares, devido as cargas negativas contidas nos polissacarídeos pectínicos e hemicelulósicos (HORST et al., 2010; YANG et al., 2011; ZHU et al., 2012). À medida que o

Al se liga a essas cargas, ele enrijece as paredes celulares e diminui o afrouxamento necessário para o alongamento da célula, além de causar diminuição na deposição da parede celular (KOPITTKE et al., 2015; MC KENNA et al., 2016).

Desta forma, a interação do Al com os componentes da parede celular pode ter atuado modificando a estrutura da parede celular, resultando nos decréscimos na taxa de crescimento da raiz principal, massa seca de raiz, comprimento da raiz principal, área superficial, volume e diâmetro da raiz. Observou-se ainda que o aumento da concentração de Al causou decréscimos mais evidentes e significativos nas raízes quanto as variáveis de massa seca de raiz, área superficial, volume e diâmetro. O decréscimo nas variáveis da raiz pode ser explicado através da afinidade do Al com a parede celular, a diminuição da deposição de parede celular devido a rigidez e a inibição de proteínas da parede celular, como as expansinas (COSGROVE, 2000; JONES et al., 2006).

O Al não compromete somente a parede celular, pois também interage negativamente com a membrana plasmática, podendo se ligar a proteínas e a lipídios, causando a despolarização da membrana, dessa forma afetando o transporte de íons e processos celulares, perturbando a homeostase celular (BOSE et al., 2011). Desequilíbrios nutricionais induzidos pelo Al foram relatados em várias espécies de plantas, os quais demonstram a diminuição da absorção de diferentes cátions, como cálcio, magnésio, potássio e amônio (SADE et al., 2016). Além disso, os prejuízos causados pelo Al podem ser devido a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), tais como ânion superóxido, radical hidroxil e peróxido de hidrogênio, os quais oxidam os compostos celulares e podem provocar morte celular (INOSTROZA-BLANCHETEAU et al., 2012; DABROWSKA et al., 2007).

Quanto ao silício (Si), aplicado isoladamente, de modo geral, este não promoveu benefícios nas variáveis observadas na raiz e parte aérea. Este comportamento pode estar relacionado com o fato de que os efeitos benéficos do Si nem sempre são verificados em plantas que não estão em condições de estresse (DANN; MUIR, 2002; MA; YAMAJI, 2008). O Si de forma isolada ocasionou reduções para as variáveis de massa seca, área superficial, volume e diâmetro de raízes. RIBEIRO et al. (2011) verificaram um comportamento semelhante a este, em que o Si ocasionou redução no crescimento radicular de cafeeiro, sem efeitos negativos no desenvolvimento da parte aérea. Várias evidências sugerem que o Si não atua como promovedor do crescimento e atividade metabólica, mas sim na prevenção e mitigação dos estresses sofridos pela planta, o que reflete então em melhorias no crescimento e atividade metabólica. No nível fisiológico, a maioria dos estudos sugere que, na ausência de estresse, a suplementação de Si

tem pouco ou nenhum efeito. Existem hipóteses de que o Si atua como um mensageiro secundário, modulando repostas de defesa (COSKUN et al., 2019).

Na presença de 1,85 mM de Al, a presença do Si conseguiu mitigar os danos em todas as variáveis de crescimento. Uma hipótese para esta resposta é a formação de complexos hidroxialuminossilicatos nas raízes das plantas de *S. terebinthifolius*, tornando parte do Al indisponível às plantas e, conseqüentemente, reduzindo a translocação do Al, causando benefícios no desenvolvimento da raiz e parte aérea. Esse efeito foi observado somente no tratamento com a menor concentração de Al. Entretanto, para 3,71 mM de Al, ocorreu uma pequena mitigação dos danos apenas para área superficial e volume de raiz, enquanto nas demais variáveis não houve melhorias promovidas pelo Si. Provavelmente, para o Si auxiliar na atenuação dos danos nas maiores concentrações de Al seria necessária uma maior concentração de Si.

Para as variáveis avaliadas na raiz foi possível notar que o Si atuou mitigando os danos causados pelo Al, principalmente na menor concentração de Al. Provavelmente isto está interligado ao fato do Si reforçar a parede celular através da lignificação e suberização, e assim ocasionando uma entrada menor do elemento fitotóxico (FLECK et al., 2010). No entanto, para a maior concentração de Al, somente o reforço da parede celular não foi suficiente para atenuar os danos. Como o Al prejudica a deposição da parede celular, possivelmente estes elementos acabaram competindo e o Si não atuou mitigando os danos para a maior concentração de Al (KOPITTKÉ et al., 2015; MC KENNA et al., 2016).

Em relação ao Se, na concentração usada no presente trabalho, este elemento apresentou-se fitotóxico para a parte aérea das plantas de *Schinus terebinthifolius*, visto que, de forma isolada foi prejudicial para área foliar e massa seca foliar, o que refletiu também na biomassa total. Este comportamento de decréscimo da área foliar e da massa seca foliar também foi encontrado em outras espécies. Estudos realizados com plântulas de arroz submetidas a presença de Se mostraram um decréscimo na altura de plantas e na biomassa. Acredita-se que a parte aérea é mais danificada pelo fato do Se ser transportado da raiz para a parte aérea, causando mais danos nesta região (MOSTOFA et al., 2017). Estudos realizados com Se em *Raphanus sativus* e *Beta vulgaris* também apresentaram como resposta a diminuição da biomassa (MORENO et al., 2018).

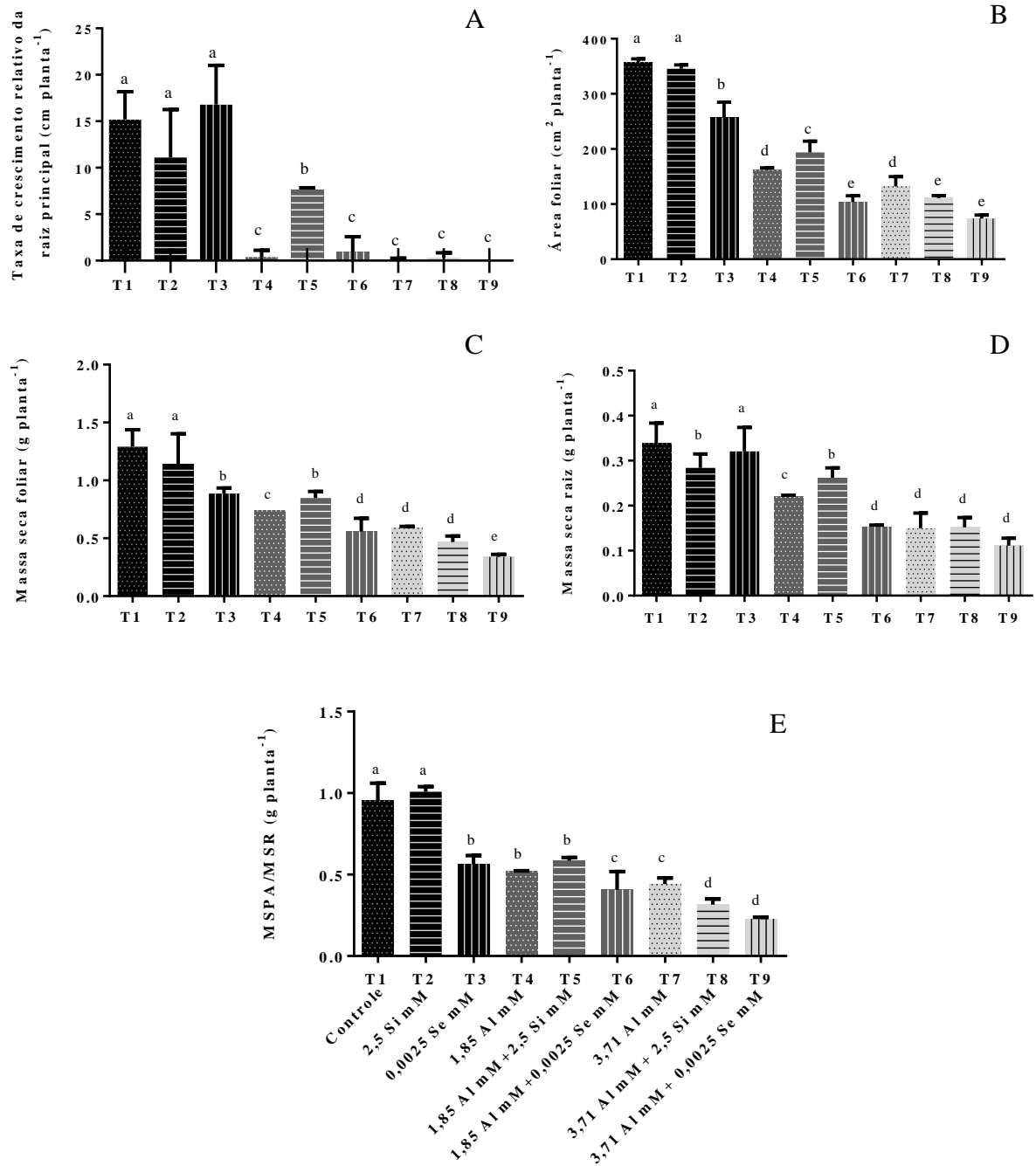
Para a raiz, de forma isolada, o Se apresentou-se fitotóxico apenas para o diâmetro de raiz. Porém, quanto ao comprimento, área superficial e volume de raízes o desempenho foi superior ao tratamento controle. No entanto, Se não mitigou os danos de Al para nenhuma das variáveis avaliadas. Selênio e enxofre possuem as mesmas rotas de absorção. Em *Arabidopsis*

thaliana por exemplo, o selenato é absorvido por um transportador de sulfato Sultr1;2 (SHIBAGAKI et al., 2002). A toxicidade induzida pelo Se está possivelmente relacionada com a substituição do enxofre (S) nas proteínas, o que ocasiona alterações em estruturas funcionais pela incorporação de Se em moléculas que possuem S, principalmente a substituição de Cys por Se-Cys, além de poder desencadear a formação de espécies reativas de oxigênio e peroxidação lipídica (CHEN et al., 2014). De outro modo, o Se em pequenas concentrações tem efeitos positivos, aumentando as propriedades antioxidantes e modulando múltiplos genes responsivos ao estresse (NAZ et al., 2015).

CONCLUSÃO

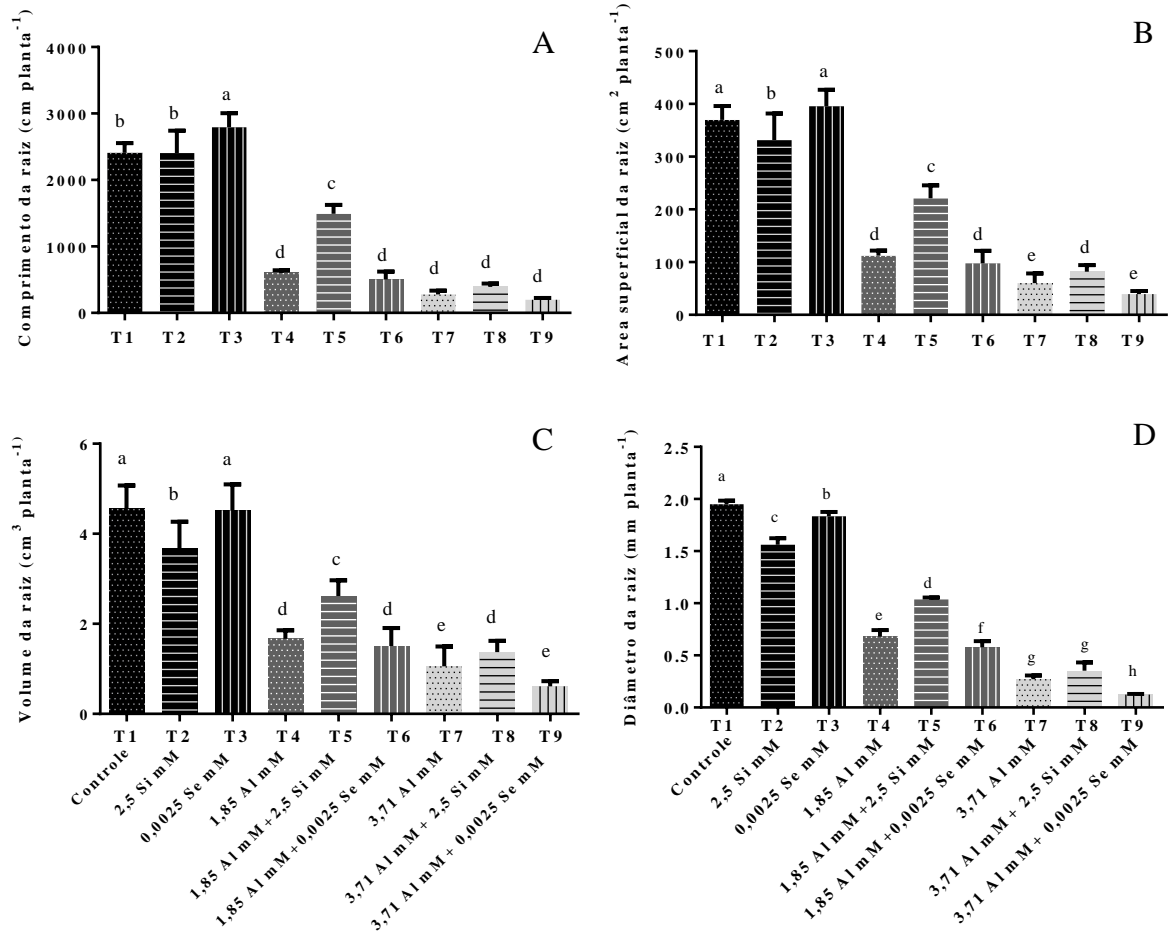
A espécie *Schinus terebinthifolius* Raddi é sensível ao alumínio em sistema hidropônico. No entanto, a adição de 2,5 mM Si amenizou os efeitos tóxicos ocasionados pelo alumínio na concentração de 1,85 mM em plantas de *S. terebinthifolius*, enquanto o selênio não apresentou esta capacidade para nenhuma das variáveis analisadas.

Figura 1- Efeito da adição do Al, Si e Se no comprimento da raiz principal (cm) (A), área foliar (cm²) (B), massa seca foliar (C) e massa seca de raízes (D), relação matéria seca da parte aérea/matéria seca radicular (E) de plantas de *Schinus terebinthifolius* cultivadas em sistema hidropônico.



*Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Scott-Knott. Fonte: autor

Figura 2- Comprimento da raiz (cm) (A), área superficial de raízes (cm²) (B), volume das raízes (cm³) (C) e diâmetro das raízes (mm) (D) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.



*Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Scott-Knott. Fonte: autor.

REFERÊNCIAS

- ACHARY, V.M.M.; PANDA, B.B. Aluminium-induce DNA damage and adaptive response to genotoxic stress in plant cells are mediated through reactive oxygen intermediates. **Mutagenesis**, v. 25, n. 2, p. 201-209, 2009.
- BANDINELLI, M.G. et al. Concentração dos sais e da sacarose do meio MS na multiplicação *in vitro* e na aclimatização de batata. **Horticultura Brasileira**, v.31, n.2, p. 242-247, 2013.
- BOSE, J. et al. Role of magnesium in alleviation of aluminum toxicity in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.7, p.2251-2264, 2011.
- CHEN, Y. et al. The endogenous nitric oxide mediates selenium-induced phytotoxicity by promoting ROS generation in *Brassica rapa*. **PloS one**, v.9, n.10, p.e110901, 2014.
- COSGROVE D.J. New genes and new biological roles for expansins. **Current Opinion in Plant Biology**, v.3, p.73–78, 2000.
- COSKUN, D. et al. The controversies of silicon's role in plant biology. **New Phytologist**, v.221, n.1, p.67-85, 2019.
- DABROWSKA, G. et al. Characteristics of the plant ascorbate peroxidase family. **Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica**, v.49, p 7-17, 2007.
- DANN, E. K.; MUIR, S. Peas grown in media with elevated plant-available silicon levels have higher activities of chitinase and β -1, 3-glucanase, are less susceptible to a fungal leaf spot pathogen and accumulate more foliar silicon. **Australasian Plant Pathology**, v. 31, n. 1, p. 9-13, 2002.
- DORNELES, A.O.S. et al. Silicon reduces aluminum content in tissues and ameliorates its toxic effects on potato plant growth. **Ciência Rural**, v.46, n.3, p.506-512, 2016.
- DUAN, G. et al. Association of arsenic with nutrient elements in rice plants. **Metallomics**, v.5, n.7, p.784-792, 2013.
- FAMOSO, A.N. et al. Development of a novel aluminum tolerance phenotyping platform used for comparisons of cereal aluminum tolerance and investigations into rice aluminum tolerance mechanisms. **Plant Physiology**, v.153, n.4, p.1678-1691, 2010.
- FAUTEUX, F. et al. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. **FEMS Microbiology Letters**, v.249, n.1, p.1-6, 2005.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Científica Symposium**, v.6, n.2, p.36-41, 2008.
- FLAM-SHEPHERD, R. et al. Membrane fluxes, bypass flows, and sodium stress in rice: the influence of silicon. **Journal of Experimental Botany**, v.69, p.1679–1692, 2018.

FLECK, A. T. et al. Silicon enhances suberization and lignification in roots of rice (*Oryza sativa*). **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 6, p. 2001-2011, 2010.

GESSA, C.E et al. Effect of Aluminum and pH on the mobility of phosphate through a soil–root interface model. **Plant and Soil**, v.272, p.301–311, 2005.

HALIM, A.A. et al. Ammonia removal using organic acid modified activated carbon from landfill leachate. **Environment Ecosystem Sci.**, v.1 (1), p.28–30, 2017.

HORST, W.J. et al. The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: a review. **Ann. Bot.**, v.106, p.185–197, 2010.

HU, Y. et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants. **Plant and Soil**, v.384, n.1-2, p.131-140, 2014.

INOSTROZA-BLANCHETEAU, C. et al. Molecular and physiological strategies to increase aluminum resistance in plants. **Molecular Biology Reports**, v. 39, n. 3, p. 2069-2079, 2012.

JONES, D.L. et al. Spatial coordination of aluminium uptake, production of reactive oxygen species, callose production and wall rigidification in maize roots. **Plant, Cell and Environment** v. 29, p.1309–1318, 2006.

KOCHIAN, L.V. et al. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, v.55, p.459-493, 2004.

KOCHIAN, L.V. et al. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. **Annual Review of Plant Biology**, v.66, p.571-598, 2015.

KOPITTKE, P.M. et al. Identification of the primary lesion of toxic aluminum (Al) in plant roots. **Plant Physiol.**, v.167, p.1402–1411, 2015.

KUMAR, M. et al. Selenium and spermine alleviate cadmium induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating antioxidants and DNA methylation. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.51, p.129-138, 2012.

LENZI, M.; ORTH, A.I. Caracterização funcional do sistema reprodutivo da aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi) em Florianópolis-SC, Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.26, n.2, p.198-201, 2004.

LIMA, L.W. et al. Mechanisms of selenium hyperaccumulation in plants: A survey of molecular, biochemical and ecological cues. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects**, v.1862, p.2343–2353, 2018.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and molecular life sciences**, v. 65, n. 19, p. 3049-3057, 2008.

MARSCHNER, H. Marschner's mineral nutrition of higher plants. **Academic press**, 2011.

MC KENNA, B.A. et al. NW Aluminium effects on mechanical properties of cell wall analogues. **Physiol. Plant.**, v.158, p.382–388, 2016

MORENO, O.D.G. et al. Selenium Uptake and Biotransformation and Effect of Selenium Exposure on the Essential and Trace Elements Status: Comparative Evaluation of Four Edible Plants. **Journal of the Mexican Chemical Society**, v.62, n.2, p.1-12, 2018.

MOSTOFA, M. G. et al. Phenotypical, physiological and biochemical analyses provide insight into selenium-induced phytotoxicity in rice plants. **Chemosphere**, v.178, p.212-223, 2017.

NAZ, F.S. et al. Low level of selenium increases the efficacy of 24-epibrassinolide through altered physiological and biochemical traits of *Brassica juncea* plants. **Food Chemistry**, v.185, p.441-448, 2015.

PEREIRA, A. S. et al. Selenium and silicon reduce cadmium uptake and mitigate cadmium toxicity in *Pfaffia glomerata* (Spreng.) Pedersen plants by activation antioxidant enzyme system. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 18548-18558, 2018.

PEREIRA, J.F.; RYAN, P.R. The role of transposable elements in the evolution of aluminium resistance in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.70, n.1, p.41-54, 2018.

RIBEIRO, R. V. et al. O alto teor de silício no solo inibe o crescimento radicular de cafeeiros sem afetar as trocas gasosas foliares. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 35, p. 939-948, 2011.

SCHIAVON, M. et al. Effects of selenium on plant metabolism and implications for crops and consumers. In: **Selenium in plants**. Springer, Cham, p.257-275. 2017.

SHIBAGAKI N, R. et al. Selenate-resistant mutants of *Arabidopsis thaliana* identify Sultr1;2, a sulfate transporter required for efficient transport of sulfate into roots. **Plant J** v. 29, p. 475–486. 2002.

SINGH, S. et al. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v.137, p.177–193, 2017.

STORCK, L. et al. **Experimentação vegetal**. 3. ed. Santa Maria, RS: Editora da UFSM. 2011. 199p.

SUN, W. et al. Silicon-enhanced resistance to rice blast is attributed to silicon-mediated defence resistance and its role as physical barrier. **European journal of plant pathology**. v.128, n.1, p.39-49, 2010.

TABALDI, L.A. et al. Physiological and oxidative stress responses of four potato clones to aluminum in nutrient solution. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n.3, p.211–222, 2007.

TABALDI, L.A. et al. Oxidative stress is an early symptom triggered by aluminum in Al-sensitive potato plantlets. **Chemosphere**, v.76, n.85, p.1402–1409, 2009.

YANG, J.L. et al. Cell wall hemicellulose contributes significantly to aluminum adsorption and root growth in *Arabidopsis*. **Plant Physiol.**, v.155, p.1885–1892, 2011.

ZHU, X.F. et al. Encoding an *in vitro* XEH/XET-active enzyme, regulates aluminum sensitivity by modulating *in vivo* XET action, cell wall xyloglucan content, and aluminum binding capacity in Arabidopsis. **Plant Cell**, v.24, p.4731–4747, 2012.

MANUSCRITO II

**SELÊNIO E SILÍCIO AMENIZAM OS DANOS OXIDATIVOS CAUSADOS PELO
ALUMÍNIO EM PLANTAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi**

RESUMO

SELÊNIO E SILÍCIO AMENIZAM OS DANOS OXIDATIVOS CAUSADOS PELO ALUMÍNIO EM PLANTAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi

AUTOR: Jéssica Patrícia Oliveira De Mattos

ORIENTADORA: Luciane Almeri Tabaldi

O Brasil possui solos ácidos com altos teores de alumínio (Al), o qual, quando em pH abaixo de 5,5, apresenta-se na forma trivalente (Al^{+3}), afetando negativamente o desenvolvimento de diversas culturas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do silício (Si) e do selênio (Se) em amenizar a toxicidade do Al sobre a atividade fotossintética e variáveis relacionadas ao estresse oxidativo em plantas de *Schinus terebinthifolius* em sistema hidropônico. As plantas de *S. terebinthifolius* foram propagadas via sementes em substrato comercial e posteriormente foram transferidas para cultivo hidropônico em solução nutritiva onde foram adicionadas concentrações de Al, Si e Se em mM, da seguinte forma: Tratamento 1: 0 Al + 0 Se e Si; Tratamento 2: 2,5 Si; Tratamento 3: 0 Al + 0,0025 Se; Tratamento 4: 1,85 Al + 0 Se e Si; Tratamento 5: 1,85 Al + 2,5 Si; Tratamento 6: 1,85 Al + 0,0025 Se; Tratamento 7: 3,71 Al + 0 Se e Si; Tratamento 8: 3,71 Al + 2,5 Si; Tratamento 9: 3,71 Al + 0,0025 Se. Após a exposição aos diferentes tratamentos (21 dias), sob cultivo hidropônico, foi feita a coleta e análise das variáveis fotossintéticas e bioquímicas. As variáveis taxa fotossintética, condutância estomática de vapores de água, eficiência de carboxilação da Rubisco e taxa transpiratória foram afetadas negativamente pela presença de 3,71 mM de Al, enquanto a eficiência do uso da água e a concentração interna de CO_2 não foram afetadas pela adição do Al. Para nenhuma das variáveis fotossintéticas avaliadas o Si e o Se mitigaram os danos ocasionados pelo Al. Para o conteúdo de pigmentos, o Se foi eficiente em amenizar os danos na produção de clorofila *a* enquanto o Si promoveu esta reposta positiva para clorofila *b*. O Se e o Si não amenizaram os danos ocasionados pelo Al na concentração de carotenoides. Na parte aérea, o Se e o Si apresentaram uma mitigação dos danos causados pelo Al em relação a atividade de enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase e a guaiacol peroxidase. Entretanto, na raiz o Se foi mais eficiente na presença de 1,85 mM de Al e o Si mais eficiente para 3,71 mM de Al. Em relação a peroxidação lipídica, os tratamentos aliando Al, Si e Se apresentaram menor conteúdo de malondialdeído, um dos produtos da peroxidação lipídica. O maior conteúdo de grupos tióis não protéicos foi observado nos tratamentos em que havia a presença de Se. Em relação ao conteúdo de ácido ascórbico, Si e Se fizeram com que a produção deste antioxidante aumentasse nas raízes, reforçando a relação que estes elementos apresentam na síntese deste composto. O conteúdo de peróxido de hidrogênio para a parte aérea foi maior no tratamento aliando a menor concentração de Al e Si, enquanto na raiz isto ocorreu para a menor concentração de Al aliado com Se. Portanto, o Si e o Se apresentaram efeitos benéficos na amenização do estresse causado pelo Al, principalmente através da ativação do sistema antioxidante e na diminuição dos danos causados pela peroxidação lipídica.

Palavras-chave: Aroeira; Solos ácidos; toxicidade; elementos amenizadores, Sistema antioxidante.

**SELENIUM AND SILICIUM ATTENUATE OXIDATIVE DAMAGE CAUSED BY
ALUMINUM IN *Schinus terebinthifolius* Raddi PLANTS**

ABSTRACT

AUTHOR: Jéssica Patrícia Oliveira De Mattos
ADVISOR: Luciane Almeri Tabaldi

Brazil has acidic soils with high aluminum (Al) content and it is already known that, when at pH below 5.5, this element is present in a trivalent (Al^{+3}) form, which is phytotoxic, affecting development of various crops. Thus, main objective of present study was to evaluate Silicon (Si) and Selenium (Se) effect on reducing Al toxicity on photosynthetic activity and variables related to oxidative stress in *Schinus terebinthifolius* Raddi plants under hydroponic conditions. *S. terebinthifolius* plants were propagated via seeds in commercial substrate and later transferred to hydroponic culture in nutrient solution, where Al, Si and Se concentrations in mM were added as follows: Treatment 1: 0 Al + 0 Se e Si ; Treatment 2: 2.5 Si; Treatment 3: 0 Al + 0.0025 Se; Treatment 4: 1.85 Al + 0 Se and Si; Treatment 5: 1.85 Al + 2.5 Si; Treatment 6: 1.85 Al + 0.0025 Se; Treatment 7: 3.71 Al + 0 Se and Si; Treatment 8: 3.71 Al + 2.5 Si Treatment 9: 3.71 Al + 0.0025 Se. Following 21 days exposure to different treatments, under hydroponic, the collection and analysis of the photosynthetic and biochemical variables were done. Photosynthetic rate, water vapors stomatal conductance, Rubisco carboxylation efficiency and transpiration rate were negatively affected by 3.71 mM of Al, while water use efficiency and internal CO_2 concentration were not affected by Al addition. Neither Si nor Se were able to counteract Al damages observed in photosynthetic variables. Considering pigments content, Se was efficient in mitigating damages to chlorophyll *a* production, while Si promoted the same positive effect for chlorophyll *b*. On the other hand, neither Se nor Si was able to alleviate Al damages for carotenoid production. In shoot, Se and Si resulted in Al damage mitigation when considering antioxidant enzymes activity, as superoxide dismutase and guaiacol peroxidase. However, in roots, Se was more efficient for 1.85 mM Al, while Si was more efficient for 3.71 mM of Al. Considering lipid peroxidation, treatments combining Al, Si, and Se presented lower content of malondialdehyde, one of the lipid peroxidation products. Highest content of non-protein thiols was observed in Se containing treatments. Regarding ascorbic acid content, both Si and Se lead to its increased production in roots, reinforcing the relationship between elements in ascorbic acid synthesis. Higher hydrogen peroxide contents in shoot was observed in treatments combining lower Al and Si concentrations, while in roots the same occurred to lower Al and Se concentrations. Therefore, both Si and Se presented beneficial effects in stress alleviation caused by Al, mainly through antioxidant system activation and reduction of damage caused by lipid peroxidation.

Keywords: Aroeira; Acid Soils; toxicity; attenuator elements, antioxidant system.

INTRODUÇÃO

A toxicidade do alumínio (Al) é uma condição que reduz o rendimento das culturas em solos ácidos. Em valores de pH abaixo de 5, íons Al^{3+} são dissolvidos a partir de minerais de argila e são tóxicos para as raízes das plantas, inibindo o crescimento e as funções da raiz e isto ocasiona redução no rendimento das culturas (KOCHIAN et al., 2015).

O estresse causado por Al ocasiona a produção de espécies reativas de oxigênio tais como superóxido, radical hidroxil e peróxido de hidrogênio, as quais podem ser removidos das células por enzimas antioxidantes, tais como superóxido dismutase, peroxidases, catalase e glutathione redutase. Além disso, as células dispõem de vários antioxidantes não enzimáticos de baixo peso molecular, como ácido ascórbico, glutathione, compostos fenólicos, flavonóides e carotenóides (GUO et al., 2007; LEE et al., 2007; DABROWSKA et al., 2007), os quais auxiliam as enzimas antioxidantes na remoção das espécies reativas ou na transformação das mesmas em moléculas não reativas.

Alguns estudos demonstram que a adição dos elementos silício (Si) e selênio (Se) no meio de cultivo podem atenuar os danos causados por excesso de metais (DORNELES et al., 2016; HU et al., 2014). Estudos realizados com Si demonstram o seu potencial em remediar diferentes estresses, tais como salinidade, seca e a capacidade de aumentar a tolerância a estresses bióticos e abióticos (FAUTEUX et al., 2005). O Se também apresenta capacidade de proteger os vegetais contra a fitotoxicidade de diferentes elementos químicos, podendo agir como um antioxidante e atuar diminuindo a acumulação de metais (KUMAR et al., 2012; ZEMBALA et al., 2010; DUAN et al., 2013).

Muitas plantas lenhosas nativas de solos ácidos apresentam mecanismos para tolerar o alto teor de Al^{3+} . A espécie *Schinus terebinthifolius* Raddi é uma árvore nativa da América do Sul comumente denominada como aroeira, aroeira-vermelha e aroeira-da-praia. É uma espécie que apresenta potencial madeireiro e é recomendada para recomposição de áreas degradadas. *S. terebinthifolius* se desenvolve especialmente em solos úmidos e orgânicos, mas cresce em qualquer tipo de solo. É tolerante ao sal, capaz de suportar inundações, incêndios e secas, demonstrando uma eficiente tolerância a diferentes tipos de estresses (LENZI; ORTH, 2004). Acredita-se que *S. terebinthifolius* possa apresentar tolerância ao Al, no entanto, até o momento não encontram-se registros científicos comprovando ou refutando esta hipótese. Por se tratar de uma espécie arbórea, onde não teremos o risco de contaminações via cadeia alimentar, a *S. terebinthifolius* pode ser uma alternativa para remediar solos contaminados por Al. Portanto, o objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos amenizadores do Si e do Se sobre a atividade

fotossintética e parâmetros relacionados ao estresse oxidativo em plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas ao Al em sistema hidropônico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na casa de vegetação e nos Laboratórios de Bioquímica de Plantas do Departamento de Biologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. Sementes de *Schinus terebinthifolius* provenientes do Centro de Pesquisas em Florestas – DDPA de Santa Maria, RS foram semeadas em bandejas plásticas pretas de 38 cm x 56 cm, contendo substrato H.Decker^R Florestal sendo irrigadas a cada três dias com solução nutritiva completa, em pH de $4,5 \pm 0,1$. A solução nutritiva teve a seguinte composição (em μM): 6090,5 de N; 974,3 de Mg; 4986,76 de Cl; 2679,2 de K; 2436,2 de Ca; 359,9 de S; 243,592 de P; 0,47 de Cu; 2,00 de Mn; 1,99 de Zn; 0,17 de Ni; 24,97 de B; 0,52 de Mo; 47,99 de Fe ($\text{FeSO}_4/\text{Na-EDTA}$).

Após a germinação e crescimento inicial das mudas, num período de aproximadamente 30 dias, plantas homogêneas, com cerca de 10 cm de altura foram transferidas para sistema hidropônico, em bandejas plásticas com capacidade de 17 L contendo solução nutritiva completa descrita acima, onde foram fixadas por meio de esponjas em placas de poliestireno (isopor) contendo furos, objetivando a aclimatização conforme método de Bandinelli et al. (2013). Cada bandeja suportou 15 plantas. Após cinco dias de aclimatação nesse sistema, as plantas foram transferidas para uma nova solução nutritiva contendo os tratamentos.

Cultivo hidropônico em diferentes concentrações de Al, Si e Se

Plantas de *S. terebinthifolius* provenientes do sistema de aclimatização citado acima foram transferidas para bandejas plásticas (17 L) contendo solução nutritiva (todos os nutrientes foram fornecidos como descrito acima, exceto o fósforo (P), o qual foi adicionado à solução na concentração de $50 \mu\text{M}$, com o objetivo de fornecer P para as plantas e ao mesmo tempo evitar interações físico-químicas entre o Al e o P (GESSA et al., 2005). Os tratamentos foram aplicados nessa solução, os quais consistiram nas seguintes combinações (Al, Si e Se em mM): Tratamento 1: 0 Al + 0 Se e Si; Tratamento 2: 2,5 Si; Tratamento 3: 0 Al + 0,0025 Se; Tratamento 4: 1,85 Al + 0 Se e Si; Tratamento 5: 1,85 Al + 2,5 Si; Tratamento 6: 1,85 Al + 0,0025 Se; Tratamento 7: 3,71 Al + 0 Se e Si; Tratamento 8: 3,71 Al + 2,5 Si; Tratamento 9: 3,71 Al + 0,0025 Se. As concentrações de Al, Si e Se foram definidas a partir de experimentos prévios realizados pelo grupo de pesquisa (DORNELES et al., 2016; PEREIRA et al., 2018;

TABALDI et al., 2007, 2009). Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições para cada tratamento e 5 plantas por repetição. A solução nutritiva foi trocada a cada sete dias, sendo o pH da solução ajustado diariamente ($4,5 \pm 0,1$) com uma solução de HCl ou NaOH (1 M).

Variáveis avaliadas durante o experimento

Durante o experimento foram determinados os parâmetros fotossintéticos na quarta folha completamente expandida de quatro plantas por repetição. As avaliações foram realizadas no período entre as 8 e 11h com a utilização do medidor portátil IRGA, marca LI-COR, modelo LI-6400XT. Foram determinadas a condutância estomática de vapores de água (G_s - mol H_2O $m^{-2} s^{-1}$), a taxa fotossintética (A - μmol CO_2 $m^{-2} s^{-1}$), a concentração interna de CO_2 (μmol $m^{-2} s^{-1}$), a taxa transpiratória ($mmol$ H_2O $m^{-2} s^{-1}$), a eficiência do uso da água (EUA - mol CO_2 mol H_2O^{-1}) e a eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) obtida pela relação entre quantidade de CO_2 fixado pela fotossíntese e concentração interna de CO_2 .

Variáveis avaliadas após a coleta

Após 21 dias de exposição ao Al, Si e Se, raízes e parte aérea de plantas de *S. terebinthifolius* foram coletadas para determinação das variáveis descritas abaixo. Para determinação da biomassa seca total, amostras de raízes e de parte aérea foram coletadas, colocadas em sacos de papel e levadas para a estufa à $65^\circ C$ até atingir peso constante. Para as análises bioquímicas, amostras de raízes e parte aérea foram coletadas e congeladas imediatamente em nitrogênio líquido. Essas amostras foram mantidas em ultrafreezer $-80^\circ C$ até o momento das análises, onde então foram maceradas em nitrogênio líquido, homogeneizadas em tampão específico e posteriormente analisadas, conforme metodologias descritas abaixo.

- Matéria seca total (MST) obtida a partir da soma dos valores de massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR);
- Concentração de clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides de folhas: As clorofilas *a* e *b* e os carotenoides foram extraídos segundo o método de Hiscox; Israelstan (1979) e estimados usando a equação de Lichtenthaler (1987);
- Peroxidação de lipídios de membrana: O grau de peroxidação foi estimado seguindo o método de El-Moshaty et al. (1993). A peroxidação lipídica foi expressa como nmol MDA mg^{-1} de proteína;
- Atividade das enzimas superóxido dismutase e guaiacol peroxidase: amostras de raízes e folhas das plantas foram usadas para os ensaios enzimáticos. A atividade da enzima superóxido

dismutase foi analisada de acordo com o método de Misra; Fridovich (1972); a atividade das peroxidases não específicas presentes no extrato foi determinada segundo Zeraik et al. (2008), utilizando-se o guaiacol como substrato;

-Conteúdo de peróxido de hidrogênio: Determinado de acordo com Loreto; Velikova (2001). A concentração de H_2O_2 foi expressa como $\mu\text{mol g}^{-1}$ peso fresco;

- Concentração de grupos tióis não-protéicos e ácido ascórbico (AsA): A determinação de AsA foi realizada conforme metodologia descrita por Jacques-Silva et al. (2001) e a concentração de tióis não proteicos foi medida de acordo com Ellman (1959). A concentração de tióis não protéicos foi expressa como $\mu\text{mol g}^{-1}$ peso fresco e o conteúdo de AsA como $\mu\text{g g}^{-1}$ peso fresco.

Análise estatística dos dados

Foram verificadas a normalidade da distribuição dos erros através do teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade das variâncias dos erros através do teste de Bartlett (STORCK et al., 2011) para todas as variáveis do experimento. Quando atendidos estes pressupostos, procedeu-se a análise de variância e teste de Scott-Knott para os tratamentos em 5% de probabilidade de erro, utilizando o aplicativo Sisvar (FERREIRA, 2008).

RESULTADOS

O Al ocasionou diminuição da biomassa total conforme o aumento da concentração (Figura 1). Na presença de 1,85 mM de Al, o Si mitigou os danos de Al enquanto o Se não mitigou os danos provocados por Al.

Para as variáveis fotossintéticas, a concentração de 3,71 mM de Al afetou negativamente a taxa fotossintética, condutância estomática de vapores de água, eficiência da carboxilação da Rubisco e taxa transpiratória (Figura 2) e o Si e o Se não mitigaram os danos ocasionados pelo Al para as variáveis fotossintéticas. Ademais, Si de forma isolada reduziu as variáveis de eficiência da carboxilação da Rubisco e taxa fotossintética.

Em relação aos pigmentos, o Al na concentração de 3,71 mM ocasionou diminuição da concentração de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total (Figura 3). Já os carotenoides foram afetados negativamente com o aumento da concentração de Al.

O Si de forma isolada ocasionou maior produção de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides (Figura 3), mitigou os danos causados pela adição de 3,71 mM de Al para clorofila *b* e aumentou a relação carotenoides/clorofila total com 1,85 mM Al. Da mesma forma,

o Se mitigou os danos de Al para clorofila *a* na concentração de 3,71 mM de Al e aumentou a relação carotenoides/clorofila total nas duas concentrações de Al.

Na raiz e parte aérea, o Al promoveu um aumento significativo no conteúdo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em ambas as concentrações, sendo mais evidente na concentração de 3,71 mM de Al (Figura 4A e 4B). Quando o Si estava presente no meio de crescimento juntamente com o Al, o Si diminuiu a produção de H_2O_2 na concentração de 1,85 mM Al nas raízes. Porém, na parte aérea, o Si aumentou a produção de H_2O_2 em ambas as concentrações de Al. Na raiz, o Se juntamente com 3,71 mM de Al ocasionou uma diminuição significativa da produção de H_2O_2 enquanto na parte aérea, a concentração de 3,71 mM de Al juntamente com Se ocasionou aumento da produção de H_2O_2 .

O Al promoveu um aumento significativo no conteúdo de malondialdeído (MDA) tanto em raízes quanto na parte aérea, em ambas as concentrações, quando comparado com o controle (Figura 4C e 4D). A presença de Si promoveu uma redução na produção de MDA nas duas concentrações de Al, tanto na raiz como na parte aérea. Para o Se, quando adicionado de forma isolada, o mesmo aumentou a produção de MDA, mas diminuiu a produção de MDA nas duas concentrações de Al, tanto na raiz como na parte aérea, mitigando os efeitos tóxicos do Al sobre os lipídios de membrana.

Na raiz, a atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi mais proeminente para a concentração de 1,85 mM Al e o Si diminuiu a atividade da SOD na concentração de 1,85 mM de Al e aumentou em 3,71 mM de Al. Na parte aérea, a atividade da SOD em ambas as concentrações de Al foi abaixo do controle (Figura 4E e 4F), enquanto o Si aumentou a atividade da SOD para ambas as concentrações de Al. A adição de Se juntamente com a concentração de 1,85 mM de Al ocasionou aumento na atividade da SOD, enquanto na parte aérea o Se ocasionou aumento na atividade da SOD para ambas as concentrações de Al.

Em ambas as concentrações de Al, houve uma diminuição na atividade da guaiacol peroxidase (POD) nas raízes em comparação com o controle (Figura 4G). Quando adicionado no meio de crescimento juntamente com o Al, o Si aumentou a atividade da POD em 1,85 mM de Al (Figura 4G). Além disso, na concentração de 3,71 mM Al o Se promoveu um aumento na atividade da POD.

Na raiz, a concentração de grupos tióis não protéicos (NPSH) aumentou conforme a adição de Al. Para a parte aérea, a concentração de NPSH não sofreu interferências pelo Al (Figura 5A e 5B). O Si diminuiu a concentração de NPSH em ambas as concentrações de Al nas raízes. Na parte aérea, o Si não ocasionou diferenças em relação aos tratamentos contendo apenas Al. O Se de forma isolada aumentou os níveis de NPSH tanto na raiz como parte aérea.

Com a concentração de 1,85 mM na raiz e 3,71 mM de Al na parte aérea, o Se aumentou a concentração de NPSH.

Na raiz, o Al ocasionou aumento na concentração de ácido ascórbico (AsA), enquanto na parte aérea o Al ocasionou diminuição de AsA (Figura 5C e 5D). O Si na presença de 1,85 mM de Al ocasionou aumento da concentração de AsA na raiz, mas o mesmo não ocorreu na parte aérea. Com 1,85 mM de Al na raiz o Se aumentou a concentração de AsA, enquanto na parte aérea o Se não ocasionou diferenças entre os tratamentos contendo Al.

DISCUSSÃO

O alumínio (Al) causou decréscimos na biomassa total das plantas de *Schinus terebinthifolius* (Figura 1). Além disso, na concentração de 3,71 mM, o Al afetou negativamente a taxa fotossintética, a condutância estomática de vapores de água, a eficiência da carboxilação da Rubisco e a taxa transpiratória (Figura 2). Estas reduções nas variáveis fotossintéticas ocorreram provavelmente pela dificuldade que a planta apresentou em controlar o estresse oxidativo na presença de 3,71 mM Al. Acredita-se que estes danos nas variáveis fotossintéticas foram ocasionados pelo Al transportado da raiz para a parte aérea. Como algumas pesquisas apontam, o Al é prejudicial para os cloroplastos, causando diminuição do conteúdo de pigmentos e da taxa fotossintética, além de interferir nos centros reação dos fotossistemas I e II, que são locais de grande geração de EROs (CHEN et al., 2005; ASADA et al., 2006; REYES-DÍAZ et al., 2010).

As plantas de *S. terebinthifolius* conseguiram manter sua atividade fotossintética quando expostas a menor concentração de Al (1,85 mM) (Figura 2). Esse resultado pode estar relacionado com o sistema antioxidante, o qual pode ter atuado impedindo que os danos atingissem o aparato fotossintético. De fato, a maior atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) na raiz foi com 1,85 mM, porém com 3,71 mM de Al ocorreu uma queda na atividade desta enzima, o que demonstra uma maior atividade antioxidante na menor concentração de Al. Isto também refletiu no conteúdo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que teve sua maior produção, tanto na raiz como na parte aérea, com a concentração de 1,85 mM de Al. Desse modo, na presença de 1,85 mM Al, *S. terebinthifolius* apresentou respostas antioxidantes capazes de manter a atividade fotossintética.

Assim como ocorreu para as variáveis fotossintéticas, na concentração de 3,71 mM de Al ocorreu decréscimo na concentração de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total, além de diminuir a produção de carotenoides em ambas as concentrações. Os resultados de conteúdo de

clorofila *a* e clorofila *b* estão diretamente relacionados com as variáveis fotossintéticas das plantas de *S. terebinthifolius* (Figura 2), uma vez que na maior concentração de Al houve redução das variáveis fotossintéticas assim como ocorreu com clorofila *a* e clorofila *b* (Figura 3A e 3B).

É possível observar que ambas concentrações de Al ocasionaram uma redução da concentração nos carotenoides. Sabe-se que os carotenoides participam da dissipação do excesso de excitação das clorofilas (TAIZ; ZEIGER, 2004). Sabe-se que o Al provoca desequilíbrio da homeostase nutricional, bem como gera a formação de EROs, as quais provocam destruição dos pigmentos não permitindo que os carotenoides atuem como protetores das clorofilas e também como antioxidantes (BOSE et al., 2011).

A peroxidação lipídica, aumentou conforme o aumento da concentração de Al (Figura 4A e 4B). Outros trabalhos também obtiveram respostas semelhantes (GUO et al., 2004; SHARMA; DUBEY, 2007; TABALDI et al., 2009). O aumento da peroxidação lipídica promovida pelo Al indica danos na membrana plasmática. Como o Al não é um metal redox, ele pode provocar um rearranjo da estrutura dos lipídios de membrana, o que facilita a peroxidação lipídica através do Fe(II) (GUTTERIDGE et al., 1985; OTEIZA, 1994). Nguyen et al. (2003) e Cai et al. (2011) verificaram respectivamente em *Glycine max* L. e *Eucalyptus camaldulensis* resultados semelhantes ao deste trabalho, onde plantas cultivadas na presença de Al tiveram redução do conteúdo de clorofilas e aumento do conteúdo de MDA.

Na raiz, a atividade da SOD foi maior em 1,85mM de Al. O estresse oxidativo gerado pelo Al está relacionado com a indução de genes que codificam enzimas que dismutam EROs, tais como a SOD e a POD. Além disso, o Al também foi relacionado com a modificação da atividade destas enzimas (XU et al., 2012; CARTES et al., 2012). Em *Arabidopsis thaliana* sabe-se que os genes de estresse oxidativo induzidos por Al são aqueles que também codificam a enzima SOD (RICHARDS et al., 1998; QIN et al., 2010; BOSE et al., 2010). No entanto, a atividade da guaiacol peroxidase (POD) reduziu na presença de Al, o que demonstra que o elemento afetou a atividade desta enzima. Assim como neste trabalho, Tahara et al. (2008) verificaram a redução da POD em plantas de *Melaleuca cajuputi* cultivada na presença de Al, e a hipótese dos autores é que este comportamento se deve a maior expressão de outros mecanismos de eliminação de EROs, tais como NPSH.

Em relação aos grupos tióis não protéicos (NPSH) e ácido ascórbico (AsA), nas raízes a concentração desses antioxidantes não enzimáticos aumentou conforme o aumento na concentração de Al (Figura 5). Na parte aérea, o Al não interferiu na produção de NPSH, mas ocasionou redução para AsA. Nota-se que o tratamento contendo 3,71 mM de Al apresentou a

maior produção de NPSH na raiz, fato que demonstra a interligação deste antioxidante na detoxificação de metais e eliminação de EROs (NOCTOR et al., 2012).

Os resultados de AsA indicam que a presença de antioxidantes na raiz se fez mais necessária do que na parte aérea, o que pode estar relacionado com um maior estresse que estaria sendo ocasionado pelo Al neste órgão, visto que a raiz é o alvo inicial e que mais sofre com os danos ocasionados pelo Al, sendo necessário uma resposta maior pelo sistema antioxidante.

Na menor concentração de Al, o Si promoveu aumento da biomassa total (Figura 1). Porém, no presente trabalho, não foi benéfico para amenizar a toxidez de Al para as variáveis fotossintéticas e de forma isolada reduziu a carboxilação da rubisco e a taxa fotossintética. O Se também não mitigou os danos ocasionados pelo Al nas variáveis fotossintéticas e além disto não promoveu aumento da biomassa. Possivelmente estes resultados se devem ao fato do Si e do Se não terem interferido especificamente nas rotas relacionadas a fotossíntese, e sim influenciado mais especificamente em maiores expressões do sistema antioxidante, não conseguindo agir no ponto inicial da geração de espécies reativas, o centro de reação dos fotossistemas que estavam portanto mais suscetíveis aos danos.

De fato, tanto Si como Se aumentaram a atividade antioxidante. Como será visto a seguir, estes elementos aumentaram a atividade da SOD e POD e o conteúdo de antioxidantes não enzimáticos, bem como diminuíram a peroxidação lipídica.

Em relação aos pigmentos fotossintéticos, na presença de 3,71 mM Al, o Si aumentou os níveis de clorofila *b* e o Se cresceu a concentração de clorofila *a* (Figura 3). No entanto, Si e Se não promoveram redução dos danos provocados pelo Al nos carotenoides. Esta resposta está interligada com a estimulação que os metais exercem na degradação dos pigmentos e com a estreita relação que o sistema antioxidante exerce na função de inibir a oxidação (MESCHÉDE et al., 2011), o que demonstra que nesta variável o sistema antioxidante não foi capaz de amenizar a degradação dos carotenoides.

O Si provocou menor produção de H₂O₂ na raiz quando adicionado junto a 1,85 mM Al e o Se teve este efeito na concentração de 3,71 mM. Em experimentos realizados com soja, sob condições de estresse de seca e com cevada, sob estresse salino, observou-se que a suplementação de Si reduziu as concentrações de H₂O₂ que haviam aumentado devido ao estresse (GUNES et al., 2007; SHEN et al., 2010). Na parte aérea, Si promoveu aumento da produção de H₂O₂ em ambas as concentrações de Al, enquanto o Se ocasionou aumento da concentração de H₂O₂ na concentração de 3,71 mM de Al, o que se deve a uma maior atividade da SOD que ocorreu na parte aérea (Figura 4).

O sistema antioxidante respondeu de formas diferentes ao Si e ao Se. Na raiz, o Si promoveu um aumento na atividade da SOD em 3,71 mM de Al e o Se fez isso na concentração de 1,85 mM, enquanto na parte aérea o Si e Se aumentaram a atividade da SOD para ambas concentrações de Al. Em relação a atividade da POD na raiz, o Si acresceu a atividade enzimática na concentração de 1,85 mM de Al e o Se fez isto na concentração de 3,71 mM de Al.

Em relação a peroxidação lipídica, o Si e o Se diminuíram a peroxidação lipídica nas duas concentrações de Al, tanto na raiz como parte aérea, ou seja, a degradação dos lipídeos de membrana promovida pelo Al em plantas de *S. terebinthifolius* é menor na presença destes elementos. Outros trabalhos também verificaram a redução da peroxidação lipídica ocasionada por estes elementos. Estes resultados foram relacionados com a manutenção da integridade da membrana celular promovida pela redução dos processos que afetam sua integridade, através do melhoramento de mecanismos enzimáticos e não enzimáticos (SHI et al., 2005; FENG et al., 2013; JIANG et al., 2015, 2017).

O aumento da atividade da SOD na raiz provocada pelo Si na maior concentração de Al e para ambas concentrações de Al na parte aérea reforçam a hipótese de que Si desenvolve respostas mais eficientes do sistema antioxidante para o combate de espécies reativas (SHI et al., 2005; FENG et al., 2013). Isto demonstra a capacidade que este elemento tem de otimizar as respostas das plantas visando diminuir para contornar o estresse. É reconhecido o potencial do Si como um ativador indireto de enzimas relacionadas com a defesa da planta, dentre elas a SOD e a POD (RODRIGUES et al., 2004). A atuação de Se no aumento das respostas do sistema antioxidante vem sendo encontrada também em outras pesquisas, demonstrando que o Se atua reforçando o sistema antioxidante em diferentes situações de estresse (ANDRADE et al., 2018).

Na raiz, o Si diminuiu a produção de NPSH em ambas as concentrações de Al. No entanto, na presença de 1,85 mM de Al, o Si ocasionou aumento da produção de AsA na raiz. O Si está relacionado com a amenização do dano oxidativo através do aumento de produtos não enzimáticos como ácido ascórbico (KIM et al., 2017). Porém, o Se de forma isolada aumentou os níveis de NPSH tanto na raiz como parte aérea, em relação ao controle. Além disso, na raiz, o Se aumentou o conteúdo de NPSH na presença de 1,85 mM de Al e na parte aérea apenas na presença de 3,71 mM de Al. A mais importante atividade biológica do Se é como cofator da enzima glutathiona peroxidase, a qual encontra-se em organismos animais e também está presente nos vegetais (NOCTOR et al., 2012). Acredita-se que o Se aumentou o conteúdo de AsA e NPSH devido ao aumento da atividade da glutathiona redutase, permitindo a GSH (um

tiol não protéico) realizar a eliminação das EROs via glutathiona peroxidase (HASSAN; MOSTAFA, 2017). Ademais, vários trabalhos têm demonstrado que o fornecimento de Se pode proporcionar aumento da atividade antioxidante como da GSH e do AsA (HASANUZZAMAN; FUJITA, 2011; KHALIQ et al., 2015; QING et al., 2015).

Os NPSH estão envolvidos no processo de eliminação de EROs através de um mecanismo não enzimático, assim como prolina, flavonóides, carotenóides e ascorbato (GRATÃO et al., 2015; NOGUEIROL et al., 2015). Estudos relacionam o aumento da produção de NPSH com diferentes tipos de estresse como exposição a metais, sal, seca e estresse térmico (GILL et al., 2012; KUMAR et al., 2012; ZAGORCHEV et al., 2013). A explicação para maior concentração deste antioxidante não enzimático em situações de exposição a metais seria que níveis mais altos de NPSH levariam a um sequestro de metal mais eficiente (ZAGORCHEV et al., 2013).

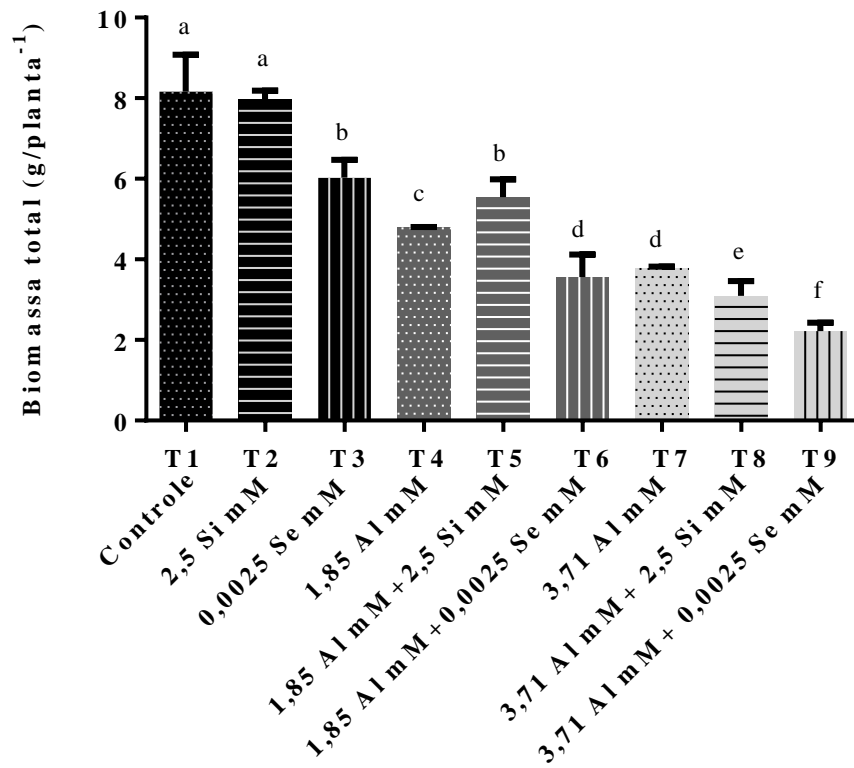
Nota-se que o tratamento contendo 3,71 mM de Al apresentou a maior produção de NPSH na raiz, fato que demonstra a interligação deste antioxidante na detoxificação de metais e eliminação de espécies reativas de oxigênio (NOCTOR et al., 2012). O tratamento contendo 1,85 mM Al+0,0025 mM Se também apresentou uma alta produção deste antioxidante, pois o Se está presente na rota de biossíntese deste composto, a qual permite que GSH atue como um antioxidante, relacionado com o sequestro de EROs.

Na menor concentração de Al na raiz o Se aumentou a produção de AsA. Tal resultado indica que a presença de antioxidantes na raiz se fez mais necessária do que na parte aérea, o que pode estar relacionado com um maior estresse que estaria sendo ocasionado pelo Al neste órgão, visto que a raiz é o alvo inicial e que mais sofre com os danos ocasionados pelo Al, sendo necessário uma resposta maior pelo sistema antioxidante. Ademais, a presença mais evidente deste antioxidante no tratamento contendo somente Se pode estar relacionado com a interferência que este elemento tenha provocado na rota de GSH, visto que a biossíntese de GSH e AsA estão correlacionadas.

CONCLUSÃO

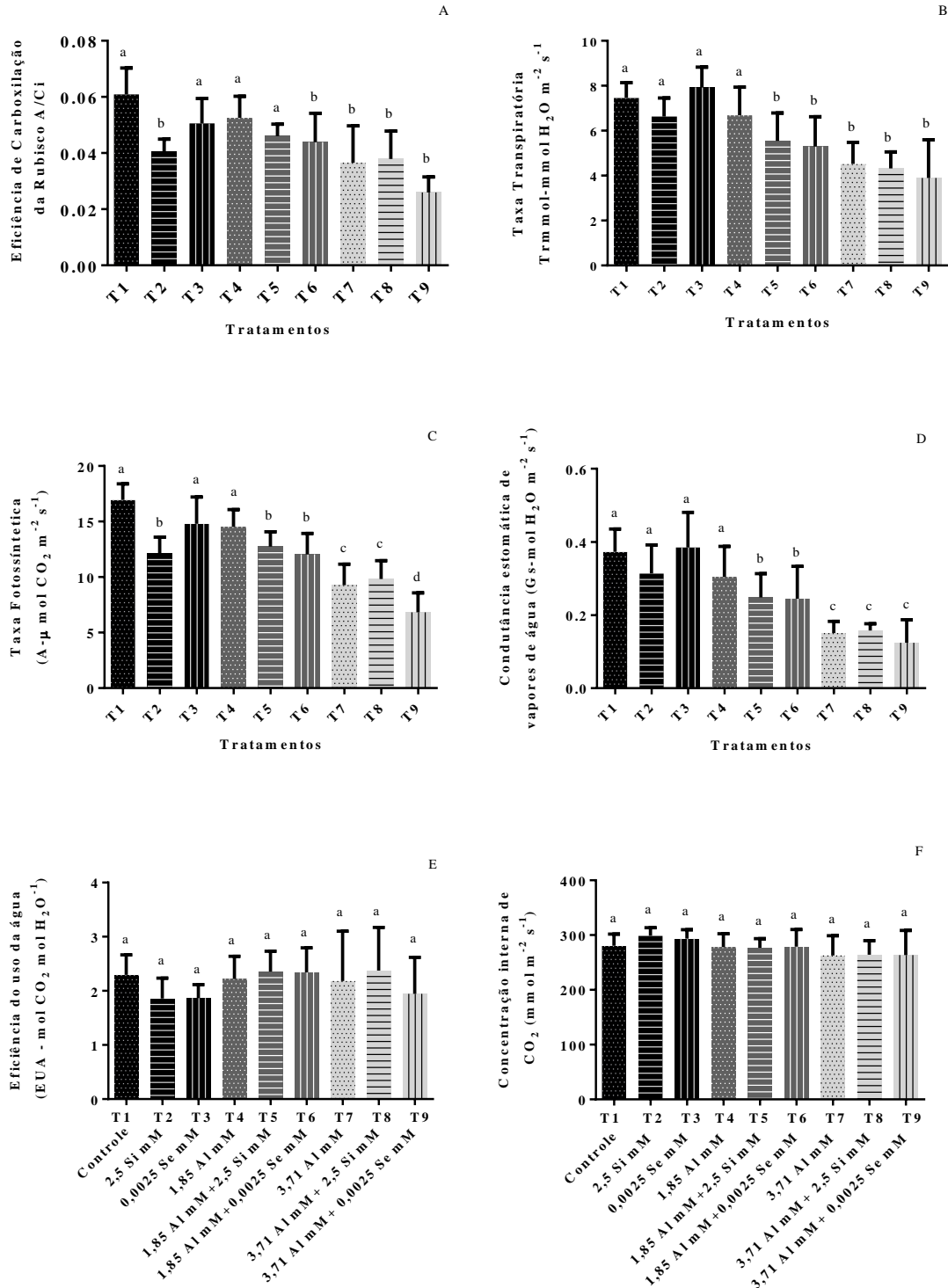
Silício e selênio apresentaram efeitos benéficos na amenização do estresse oxidativo causado pelo alumínio, principalmente através da ativação do sistema antioxidante que atua na diminuição da peroxidação lipídica.

Figura 1- Biomassa total (g) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.



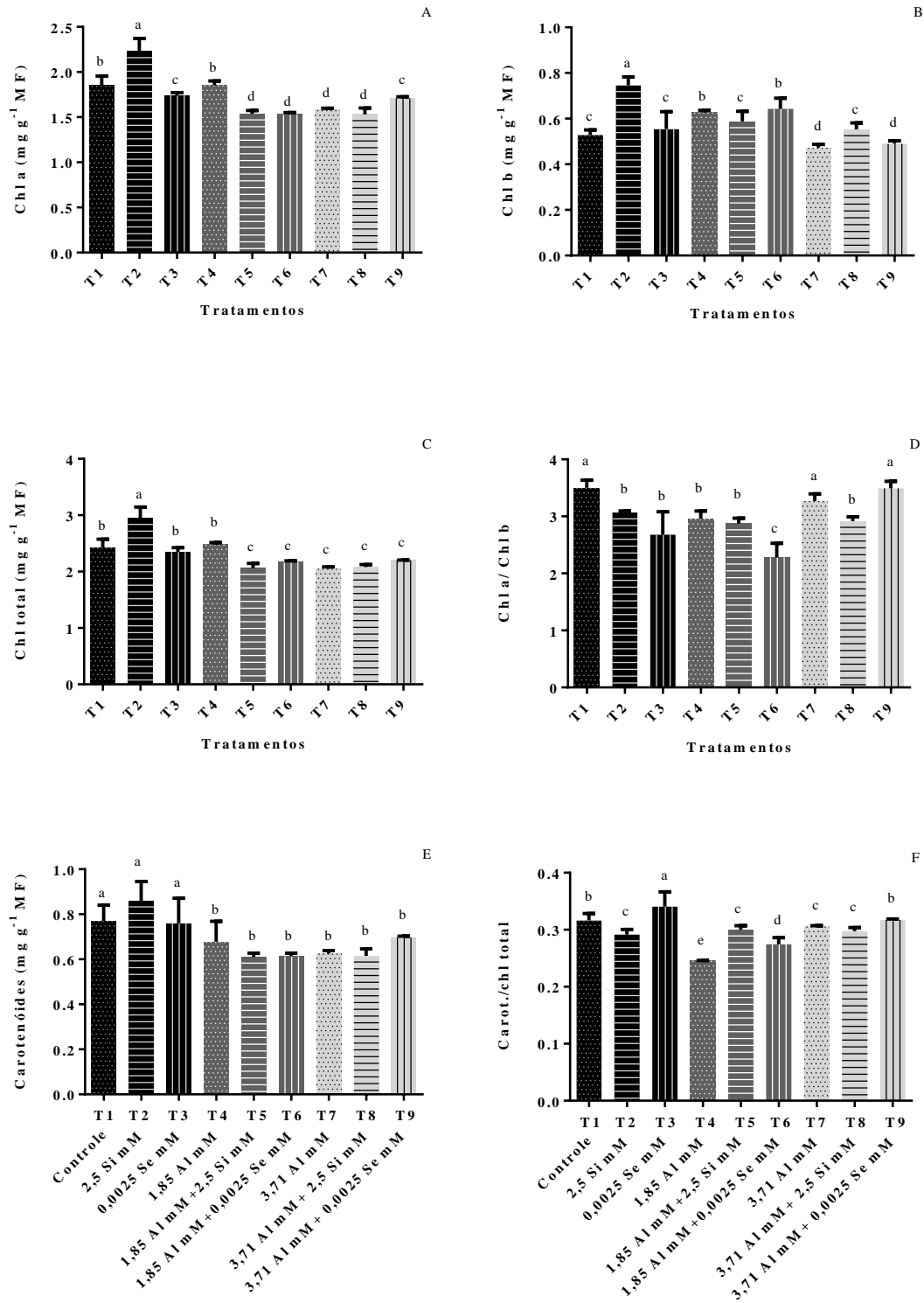
*Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Scott-Knott. Fonte: autor.

Figura 2- Eficiência de carboxilação da Rubisco (A), taxa transpiratória (B), taxa fotossintética (C), condutância estomática de vapores de água (D), eficiência no uso da água (E) e concentração interna de CO_2 (F) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas por 21 dias ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.



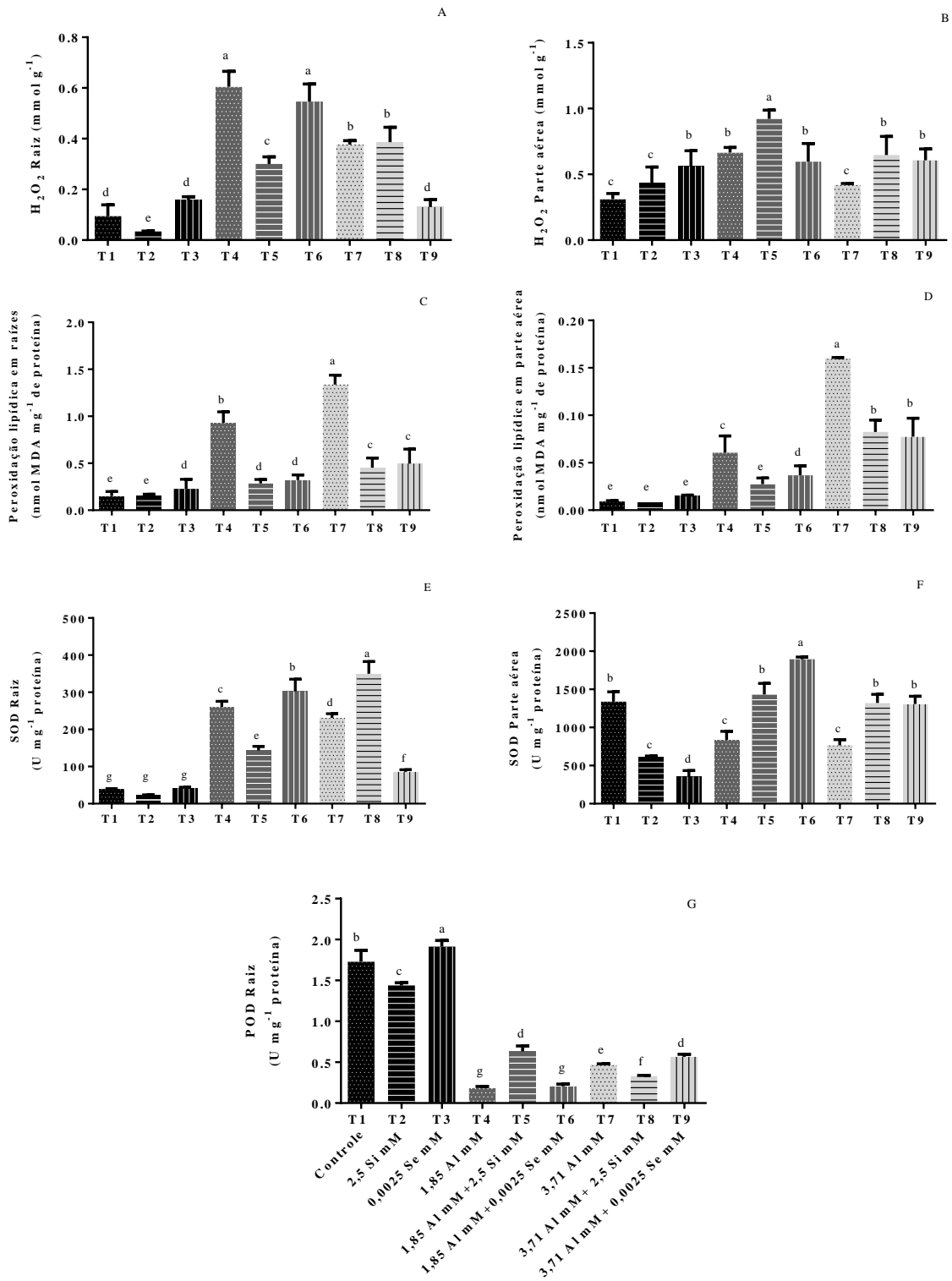
*Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Scott-Knott. Fonte: autor.

Figura 3- Conteúdo de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B), clorofilas totais (C), relação clorofila *a*/clorofila *b* (D), carotenoides (E) e relação carotenoides/clorofilas totais (F) de folhas de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas por 21 dias ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.



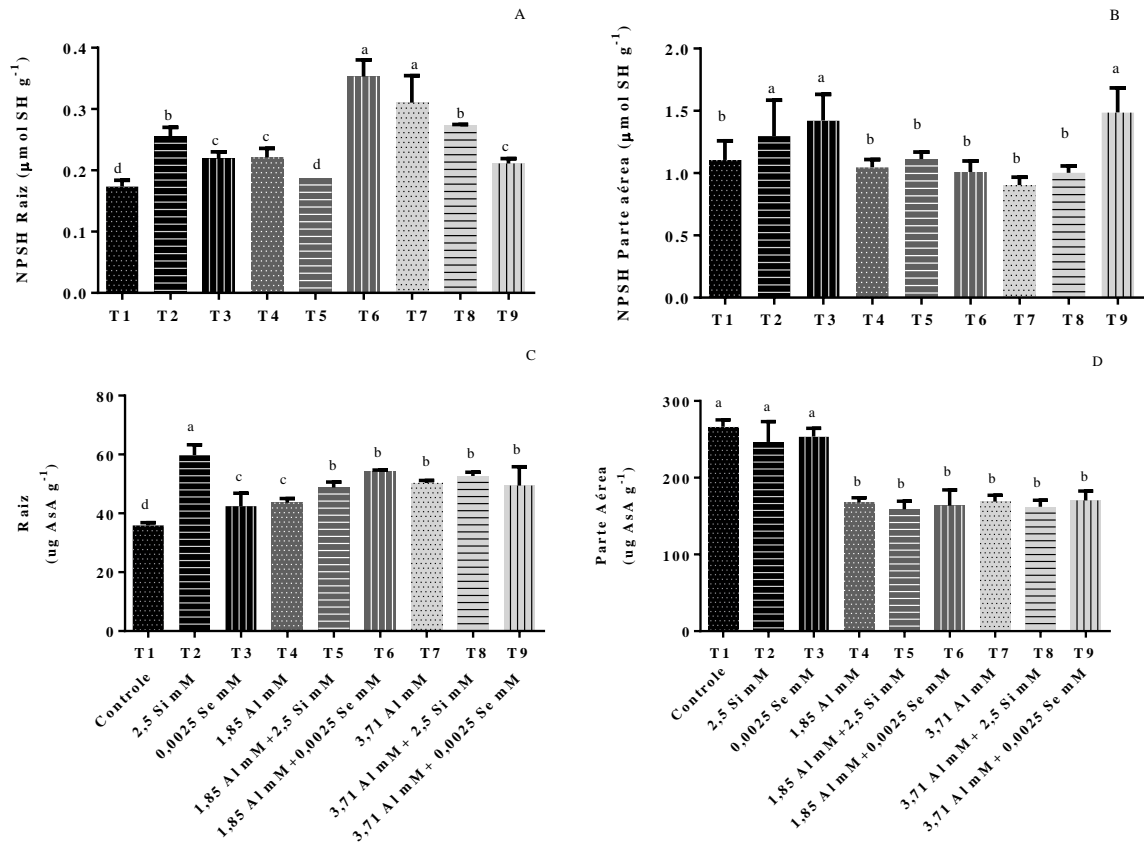
*Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Scott-Knott. Fonte: autor.

Figura 4- Conteúdo de H_2O_2 em parte aérea (A) e raízes (B); Peroxidação de lipídios de membrana na parte aérea (C) e raízes (D); Atividade da enzima SOD em parte aérea (E) e raízes (F); e atividade da enzima POD em raízes (G) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas por 21 dias ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.



*Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Scott-Knott. Fonte: autor.

Figura 5- Conteúdo de tióis não protéicos (NPSH) em parte aérea (A) e nas raízes (B) e conteúdo de ácido ascórbico (AsA) em parte aérea (C) e nas raízes (D) de plantas de *Schinus terebinthifolius* expostas por 21 dias ao alumínio, silício e selênio em sistema hidropônico.



*Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Scott-Knott. Fonte: autor.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, F.R. et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.164, p.562-570, 2018.
- ASADA, K. et al. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. **Plant physiology**, v.141, n.2, p.391-396, 2006.
- BANDINELLI, M.G. et al. Concentração dos sais e da sacarose do meio MS na multiplicação *in vitro* e na aclimatização de batata. **Horticultura Brasileira**, v.31, n.2, p. 242-247, 2013.
- BOSE, J. et al. Aluminum- dependent dynamics of ion transport in *Arabidopsis*: specificity of low pH and aluminum responses. **Physiologia Plantarum**, v.139, n.4, p.401-412, 2010.
- BOSE, J. et al. Role of magnesium in alleviation of aluminum toxicity in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.7, p.2251-2264, 2011.
- CAI, M. Z. et al. Protective effect of exogenously applied nitric oxide on aluminum-induced oxidative stress in soybean plants. **Russian journal of plant physiology**, v. 58, n. 5, p. 791, 2011.
- CARTES, P. et al. Differential superoxide dismutase expression in ryegrass cultivars in response to short term aluminium stress. **Plant Soil**, v. 350, p.353–363, 2012.
- CHEN, L.S. et al. Effects of aluminum on light energy utilization and photoprotective systems in citrus leaves. **Annals of Botany**, v.96, n.1, p.35-41, 2005.
- DABROWSKA, G. et al. Characteristics of the plant ascorbate peroxidase family. **Acta Biol. Cracow Ser. Bot.**, v.49, p.7-17, 2007.
- DORNELES, A.O.S. et al. Silicon reduces aluminum content in tissues and ameliorates its toxic effects on potato plant growth. **Ciência Rural**, v.46, n.3, p.506-512, 2016.
- DUAN, G. et al. Association of arsenic with nutrient elements in rice plants. **Metallomics**, v.5, n.7, p.784-792, 2013.
- ELLMAN, G.L. Tissue sulfhydryl groups. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v.82, p.70-77, 1959.
- EL-MOSHATY, F.B. et al. Lipid peroxidation and superoxide productions in cowpea (*Vigna unguiculata*) leaves infected with tobacco rings virus or southern bean mosaic virus. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v.43, n.2, p.109-119, 1993.
- FAUTEUX, F. et al. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. **FEMS Microbiology letters**, v.249, n.1, p.1-6, 2005.
- FENG, R. et al. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. **Environmental and Experimental Botany**, v.87, p.58–68, 2013.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Científica Symposium**, Lavras, v.6, n.2, p.36-41, 2008.

GESSA, C.E.; MIMMO, T.; DEIANA, S.; MARZADORI, C. Effect of Aluminum and pH on the mobility of phosphate through a soil–root interface model. **Plant Soil**, v.272, p.301–311, 2005.

GILL, S.S. et al. Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidante machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). **Plant Science**, v.182, p.112-120, 2012.

GRATÃO, P. L. et al. Cadmium stress antioxidant responses and root-to-shoot communication in grafted tomato plants. **BioMetals**, v.28, n.5, p.803–816, 2015.

GUNES A. et al. Silicon mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. **J Plant Physiol**, v. 164, p. 807–11. 2007.

GUO, T, et al. Effects of aluminum and cadmium toxicity on growth and antioxidant enzyme activities of two barley genotypes with different Al resistance. **Plant and Soil**, v. 258, p. 241–248. 2004.

GUO, T.R. et al. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium. **Colloids and surfaces B: Biointerfaces**, v.57, n.2, p.182-188, 2007.

GUTTERIDGE, J.M.C. et al. Aluminum salts accelerate peroxidation of membrane lipids stimulated by iron salts. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.835, p.441–447, 1985.

HASANUZZAMAN, M; FUJITA, M. Selenium pretreatment upregulates the antioxidant defense and methylglyoxal detoxification system and confers enhanced tolerance to drought stress in rapeseed seedlings. **Biological Trace Element Research**, v. 143, n. 3, p. 1758-1776, 2011.

HASSAN, A. M. A.; MOSTAFA, E. M. Selenium invoked antioxidant defense system in *Azolla caroliniana* plant. *Phyton*, **International Journal of Experimental Botany**, v. 85, p. 262-269, 2017.

HISCOX, J.D.; ISRAELSTAM, G.F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal of Botany**, v.57, n.12, p.1332-1334, 1979.

HU, Y. et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants. **Plant and soil**, v.384, n.1-2, p.131-140, 2014.

JACQUES-SILVA, M.C. et al. Diphenyl diselenide and ascorbic acid changes deposition of selenium and ascorbic acid in liver and brain of mice. **Pharmacol. Toxicol.**, v.88, p.119-125, 2001.

JIANG, C. et al. Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na⁺ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. **Scientific Reports**, v.7, p.42039, 2017.

JIANG, C. et al. Effects of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). **Acta Societatis Botanicorum Poloniae**, Warszawa, v.84, n.1, p.71–77, 2015.

KHALIQ, A. et al. Seed priming with selenium: consequences for emergence, seedling growth, and biochemical attributes of rice. **Biological Trace Element Research**, v. 166, p. 236–244, 2015.

KIM, Y.H. et al. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Front. Plant Sci**, v. 8, p. 510, 2017.

KOCHIAN, L.V. et al. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. **Annual Review of Plant Biology**, v.66, p.571-598, 2015.

KUMAR, M. et al. Selenium and spermine alleviate cadmium induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating antioxidants and DNA methylation. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.51, p.129-138, 2012.

LEE, Y.P. et al. Enhanced tolerance to oxidative stress in transgenic tobacco plants expressing three antioxidant enzymes in chloroplasts. **Plant Cell Reports**, v.26, n.5, p.591-598, 2007.

LENZI, M.; ORTH, A.I. Caracterização funcional do sistema reprodutivo da aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi) em Florianópolis-SC, Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.26, n.2, p.198-201, 2004.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids—pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods Enzymol.**, v.148, p.350-382, 1987

LORETO, F.; VELIKOVA, V. Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. **Plant Physiology**, v.127, p.1781-1787, 2001.

MESCHEDE, D.K. et al. Alteração fisiológica da cana-de-açúcar pela aplicação de glyphosate e sulfometuron-methyl. **Planta Daninha**, Viçosa, v.29, n.2, p.413-419, 2011.

MISRA, H.P.; FRIDOVICH, I. The role of superoxide anion in the autoxidation of epinephrine and simple assay for superoxide dismutase. **Journal of Biological Chemistry**, v.247, n.10, p.3170-3175, 1972.

NGUYEN, N.T. et al. Leaf Necrosis Is a Visual Symptom of the Shift from Growth Stimulation to Inhibition Effect of Al in *Eucalyptus camaldulensis*, **Plant Sci.**, v. 165, p. 147–157. 2003

NOCTOR, G. et al. Glutathione in plants: an integrated overview. **Plant Cell Environ.** v.35, n.2, p.454-484, 2012.

NOGUEIROL, R.C. et al. A. Tropical soils with high aluminum concentrations cause oxidative stress in two tomato genotypes. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v.187, n.3, p.73, 2015.

OTEIZA, P.I. A mechanism for the stimulatory effect of aluminum on iron-induced lipid peroxidation. **Arch Biochem Biophys**, v. 308, p.374–379, 1994.

QIN, R. et al. Effects of aluminum on nucleoli in root tip cells and selected physiological and biochemical characters in *Allium cepa* var. agrogarum L. **BMC Plant Biology**, v. 10, n. 1, p. 225, 2010.

QING, X. et al. Selenium alleviates chromium toxicity by preventing oxidative stress in cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. Pekinensis) leaves. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 114, p. 179-189, 2015.

REYES-DÍAZ, M. et al. Long-term aluminum exposure effects on physiological and biochemical features of highbush blueberry cultivars. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 135, n. 3, p. 212-222, 2010.

RICHARDS, K. D. et al. Aluminum induces oxidative stress genes in *Arabidopsis thaliana*. **Plant physiology**, v. 116, n. 1, p. 409-418, 1998.

RODRIGUES, F.A. et al. Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. **Phytopathology**, v.94, n.2, p.177-183, 2004.

SHARMA P; DUBEY R, S. Involvement of oxidative stress and role of antioxidative defense system in growing rice seedlings exposed to toxic concentrations of aluminum. **Plant Cell Reports**, v.26, p.2027–2038. 2007.

SHEN, X, et al. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of plant physiology**, v. 167, n. 15, p. 1248-1252, 2010.

SHI Y. et al. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 196. 2016.

SHI, Q.H. et al. Silicon mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. **Phytochemistry**, v.41, n.66, p.1551-1559, 2005.

STORCK, L. et al. **Experimentação vegetal**. 3. ed. Santa Maria, RS: Editora da UFSM. 2011. 199p.

TABALDI, L.A. et al. Oxidative Stress Is an Early Symptom Triggered by Aluminum in Al Sensitive Potato Plantlets, **Chemosphere**, v. 761, p. 1402–1409, 2009

TAHARA, K. et al. Aluminum distribution and reactive oxygen species accumulation in root tips of two Melaleuca trees differing in aluminum resistance. **Plant and Soil**, v. 307, n. 1-2, p. 167-178, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. p.693.

XU, F.J. et al. Aluminum-induced changes in reactive oxygen species accumulation, lipid peroxidation and antioxidant capacity in wheat root tips. **Biol. Plant**, v. 56, p. 89–96, 2012.

ZAGORCHEV, L. et al. A central role for thiols in plant tolerance to abiotic stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v.14, n.4, p.7405-7432, 2013.

ZEMBALA, M. et al. Effect of selenium on macro-and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress. **Plant and Soil**, v.329, n.1, p.457-468, 2010.

ZERAIK, A.E. et al. Desenvolvimento de um spot test para o monitoramento da atividade da peroxidase em um procedimento de purificação. **Química Nova**, v.31, p.731-734, 2008.

ZHANG, Y. et al. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 10, p. 2151-2159, 2018.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Acerca dos dados relacionados a fisiologia das plantas de *Schinus terebinthifolius* foi possível observar que a presença de alumínio (Al) no meio de crescimento promoveu uma redução em todos os parâmetros avaliados, que se intensificaram com o aumento da concentração.

A adição de selênio (Se) não fez com que houvesse amenização dos danos ocasionados pelo Al em variáveis fisiológicas, possivelmente pelo fato de não terem atuado nos danos iniciais ocasionados na raiz, não amenizando os danos de absorção de água e nutrientes que são primordiais para o desenvolvimento da biomassa ou por não ter formado complexos que conseguissem impedir a entrada do Al no sistema radicular. No entanto, o acréscimo de silício (Si) na solução permitiu uma amenização dos danos ocasionados pelo Al na concentração de 1,85 mM de Al, e isso ocorreu para todos os parâmetros, demonstrando grande potencial do Si para mitigar os efeitos tóxicos do Al. Tal resposta pode estar relacionada a um reforço que este elemento pode ter ocasionado na parede celular fazendo com que o elemento fitotóxico não entrasse no sistema radicular e/ou devido a formação de complexos hidroxialuminossilicatos nas raízes.

A fotossíntese de *Schinus terebinthifolius* apresentou dados que demonstraram que a espécie conseguiu reverter a fitotoxicidade ocasionada pelo Al quando este estava em sua menor concentração (1,85 mM). Esta resposta pode estar relacionada com a atuação do sistema antioxidante, que fez com que os danos não atingissem o aparato fotossintético. No entanto, esperava-se que o Si e o Se fossem atuar amenizando a fitotoxicidade que Al ocasionou, o que não ocorreu. É interessante observar que 1,85mM de Al não afetou negativamente os parâmetros fotossintéticos, mas promoveu uma redução significativa em todos as variáveis de crescimento (Manuscrito I).

Para o conteúdo de pigmentos, Se e Si não mitigaram os danos quando o Al estava em sua menor concentração, no entanto estes elementos atuaram com diferentes respostas quando aliados a maior concentração de Al, onde o Se foi eficiente em amenizar os danos na produção de clorofila *a* enquanto o Si promoveu esta reposição para clorofila *b*. Para carotenoides, Se e Si não amenizaram os danos ocasionados pelo Al na produção destes pigmentos e os resultados demonstram que estes foram afetados pelo Al, evidenciando que o sistema antioxidante não foi capaz de promover a amenização da degradação dos carotenoides.

Acerca do sistema antioxidante na parte aérea, o Se e o Si apresentaram uma mitigação dos danos causados pelo Al quanto a atividade de enzimas antioxidantes como a superóxido

dismutase, pois os mesmos atuaram promovendo a maior atividade desta enzima principalmente nos tratamentos em que o Al esteve presente. Entretanto, na raiz o Si e o Se atuam gerando diferentes respostas, que variaram conforme a concentração de Al, sendo o Se mais eficiente para 1,85 mM de Al e o Si mais eficiente para 3,71 mM de Al. Tal fato pode estar envolvido com algum processo de translocação destes elementos, em que, através dos diferentes pontos de estresse sofrido poderia estar ocorrendo uma mobilização de Si e Se.

Em relação a peroxidação lipídica, os tratamentos aliando Al, Si e Se apresentaram menor conteúdo de malondialdeído (MDA) o que demonstra que Si e Se ocasionam uma redução dos processos que afetam a integridade da membrana, como a degradação dos lipídeos de membrana.

A produção de NPSH variou suas respostas conforme o órgão e concentração dos elementos. Para parte aérea, a maior produção ocorreu no tratamento contendo alta concentração de Al e Se enquanto na raiz a maior produção ocorreu na menor concentração de Al aliado com Se. Nota-se que as produções mais altas deste antioxidante não enzimático foram nos tratamentos em que havia presença de Se. Em relação ao conteúdo de ácido ascórbico (AsA), o Si e o Se funcionam isoladamente na parte aérea, promovendo uma maior produção deste antioxidante não enzimático. E para raiz, o Si e o Se fizeram com que a produção deste antioxidante aumentasse, reforçando a relação que estes elementos apresentam na estimulação da síntese deste composto.

O conteúdo de peróxido de hidrogênio para a parte aérea foi maior no tratamento aliando a menor concentração de Al e Si, enquanto na raiz isto ocorreu para a menor concentração de Al aliado com Se. Isso pode ser explicado pelo fato da planta ainda estar fisiologicamente capaz de responder ao estresse, portanto a enzima superóxido dismutase gerou mais peróxido, o que não ocorreu da mesma forma nos tratamentos contendo maior concentração de Al.

Portanto, o Si amenizou os efeitos tóxicos ocasionados pelo Al em plantas de *Schinus terebinthifolius* Raddi quanto as variáveis fisiológicas, enquanto o selênio não apresentou esta capacidade para nenhuma das variáveis analisadas. No que se refere as variáveis bioquímicas Si e Se apresentaram efeitos benéficos na amenização do estresse causado pelo Al, principalmente através da ativação do sistema antioxidante e na diminuição dos danos causados pela peroxidação lipídica.

REFERÊNCIAS

- ACHARY, V.M.M.; PANDA, B.B. Aluminium-induce DNA damage and adaptive response to genotoxic stress in plant cells are mediated through reactive oxygen intermediates. **Mutagenesis**, v.25, n.2, p.201-209, 2009.
- BACKES, P.; IRGANG, B. Árvores do sul: guia de identificação e interesse ecológico. 2. ed. Porto Alegre: **Paisagem do Sul**. 2009. 332p.
- BENDAOUD H. et al. Chemical composition and anticancer and antioxidant activities of *Schinus molle* L. and *Schinus terebinthifolius* Raddi berries essential oils. **Journal of Food Science**, v.75, n.6, p.C466-C472, 2010.
- BLAMEY, F. et al. Manganese distribution and speciation help to explain the effects of silicate and phosphate on manganese toxicity in four crop species. **New Phytologist**, v. 217, n. 3, p. 1146-1160, 2018.
- BOSE, J. et al. Role of magnesium in alleviation of aluminum toxicity in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.7, p.2251-2264, 2011.
- BOYD, R.S. Heavy metal pollutants and chemical ecology: exploring new frontiers. **Journal of Chemical Ecology**, v.36, n.1, p.46-58, 2010.
- BRAGA, C.M. et al. Classification of juices and fermented beverages made from unripe, ripe and senescent apples based on the aromatic profile using chemometrics. **Food Chemistry**, v.141, p.967–974, 2013.
- BRUNNER, I.; SPERISEN, C. Aluminum Exclusion and Aluminum Tolerance in Woody Plants. **Frontiers in Plant Science**, v.4, p.1-12, 2013.
- CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras** (Vol. 1). Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, 2003.
- CAVALCANTI, N. de B.; BRITO, L.T. de L. Efeito de diferentes substratos no desenvolvimento de aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi). **Embrapa Semiárido**. 2009.
- CAVALHER-MACHADO, S.C. et al. The anti-allergic activity of the acetate fraction of *Schinus terebinthifolius* leaves in IgE induced mice paw edema and pleurisy. **International Immunopharmacology**, v.8, p.1552–1560, 2008.
- CERUKS, M. et al. Constituintes fenólicos polares de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae). **Química Nova**, v.30, p.597-9, 2007.
- CHÉRIF, M. et al. Studies of silicon distribution in wounded and *Pythium ultimum* infected cucumber plants. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 41, n. 5, p. 371-385, 1992.
- CORREIA, S.J. et al. Metabólitos secundários de espécies de Anacardiaceae. **Química Nova**, v.29, p.1287-1300, 2006.

- COSKUN, D. et al. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1072, 2016.
- CUNHA, G.O.M. et al. Relação entre o alumínio extraível com KCl e oxalato de amônio e a mineralogia da fração argila, em solos ácidos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.5, p.1387-1401, 2014.
- CURRIE, H.A.; PERRY, C.C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. **Annals of Botany**, v.100, n.7, p.1383–1389, 2007.
- DABROWSKA, G. et al. Characteristics of the plant ascorbate peroxidase family. **Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica**, v.49, p 7-17, 2007.
- DAWKINS, K.N. et al. Esiobu, Emerging insights on Brazilian pepper tree (*Schinus terebinthifolius*) invasion: the potential role of soil microorganisms, **Frontiers in Plant Science**, v.7, p 712, 2016.
- DI-STASI, L.C.; HIRUMA-LIMA, C.A. **Plantas medicinais na Amazônia e na Mata Atlântica**. 2.ed. São Paulo: UNESP, p.340-350, 2002.
- DORNELES, A.O.S. et al. Silicon reduces aluminum content in tissues and ameliorates its toxic effects on potato plant growth. **Ciência Rural**, v.46, n.3, p.506-512, 2016.
- DUAN, G. et al. Association of arsenic with nutrient elements in rice plants. **Metallomics**, v.5, n.7, p.784-792, 2013.
- EICH-GREATOREX, S. et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.79, n.3, p.221-231, 2007.
- FAMOSO A.N. et al. Development of a novel aluminum tolerance phenotyping platform used for comparisons of cereal aluminum tolerance and investigations into rice aluminum tolerance mechanisms. **Plant Physiology**, v.153, n.4, p.1678-1691, 2010.
- FLAM-SHEPHERD, R. et al. Membrane fluxes, bypass flows, and sodium stress in rice: the influence of silicon. **Journal of Experimental Botany**, v.69, p.1679–1692, 2018.
- FLAM-SHEPHERD, Rubens et al. Membrane fluxes, bypass flows, and sodium stress in rice: the influence of silicon. **Journal of experimental botany**, v. 69, n. 7, p. 1679-1692, 2018.
- FRANTZIOS, G. et al. Aluminum effects on microtubule organization in dividing root-tip cells of *Triticum turgidum*. I. Mitotic cells. **The New Phytologist**, v.145, n.2, p.211-224, 2000.
- FREW, A. et al. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approaches. **Annals of Botany**, v.121, p.1265–1273, 2018.
- GUO, T.R. et al. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium. **Colloids and surfaces B: Biointerfaces**, v.57, n.2, p.182-188, 2007.

HAJIBOLAND, R. et al. Selenium-induced enhancement in carbohydrate metabolism in nodulated alfalfa (*Medicago sativa* L.) as related to the glutathione redox state. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.61, n.4, p.676-687, 2015.

HALIM, A.A. et al. Ammonia removal using organic acid modified activated carbon from landfill leachate. **Environment Ecosystem Sci.**, v.1 (1), p.28-30, 2017.

HAWRYLAK-NOWAK, B. et al. The dual effects of two inorganic selenium forms on the growth, selected physiological parameters and macronutrients accumulation in cucumber plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.37, n.2, p.41, 2015.

HU, Y. et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants. **Plant and Soil**, v.384, n.1-2, p.131-140, 2014.

JIANG, C. et al. Effects of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). **Acta Societatis Botanicorum Poloniae**, v.84, n.1, p. 71-77, 2015.

KELLER, C. et al. Effect of silicone on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μ M Cu. **Planta**, v.241, p.847-860, 2015.

KOCHIAN, L.V. et al. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. **Annu. Rev. Plant Biol.**, v.55, p.459-493, 2004.

KUMAR, M. et al. Selenium and spermine alleviate cadmium induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating antioxidants and DNA methylation. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.51, p.129-138, 2012.

LEE, Y.P. et al. Enhanced tolerance to oxidative stress in transgenic tobacco plants expressing three antioxidant enzymes in chloroplasts. **Plant Cell Reports**, v.26, n.5, p.591-598, 2007.

LIMA, M.R.F. et al. Anti-bacterial activity of some Brazilian medicinal plants. **Journal of Ethnopharmacology**, v.105, p.137-47, 2006.

LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 6. ed. Nova Odessa: **Plantarum**. 2014. v.1. 368p.

LORENZI, H.; MATOS, F.J.A. Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas. Nova Odessa: **Plantarum**, p. 49-59. 2002.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.11, n.8, p.392-397, 2006.

MA, Jie et al. iTRAQ-based proteomic analysis reveals the mechanisms of silicon-mediated cadmium tolerance in rice (*Oryza sativa*) cells. **Plant physiology and biochemistry**, v. 104, p. 71-80, 2016.

MARSCHNER, H. Marschner's mineral nutrition of higher plants. **Academic press**, 2011.

MARTINS, E.R. et al. **Plantas Mediciniais**. Viçosa: Editora UFV, 220 p. 2003.

MASSEY, F. P.; HARTLEY, S. E. Physical defences wear you down: progressive and irreversible impacts of silica on insect herbivores. **Journal of Animal Ecology**, v. 78, n. 1, p. 281-291, 2009.

MATOS, F.J.A. **Farmácias vivas: sistema de utilização de plantas medicinais projetado para pequenas comunidades**. 2.ed. Fortaleza: UFC, 172p. 2002.

MC KENNA, B.A. et al. Aluminium effects on mechanical properties of cell wall analogues. **Physiol. Plant.**, v.158, p.382–388, 2016.

MEDEIROS, K.C.P. et al. Effect of the activity of the Brazilian polyherbal formulation: *Eucalyptus globulus* Labill, *Peltodon radicans* Pohl and *Schinus terebinthifolius* Raddi in inflammatory models. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v.17, p.23-28, 2007.

NAZ, F.S. et al. Low level of selenium increases the efficacy of 24-epibrassinolide through altered physiological and biochemical traits of *Brassica juncea* plants. **Food Chem.**, v.185, p.441-448, 2015.

PEREIRA, J.F.; RYAN, P.R. The role of transposable elements in the evolution of aluminium resistance in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.70, n.1, p.41-54, 2018.

PONTIGO, S.; RIBERA, A.; GIANFREDA, L.; MORA, M.L.; NIKOLIC, M.; CARTES, P. Silicon in vascular plants: uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. **Planta**, v.242, p.23–37, 2015.

POSSEBOM, G.; PEREIRA, A.S.; DORNELES, A.O.S.; SASSO, V.M.; ROSSATO, L.V.; TABALDI, L.A.; BELLOCHIO, S.D.C.; ALVES, J.S.; DE JESUS, L.C.; BERNARDY, K. *Luehea divaricata* Martius et Zuccarini is a sensitive species to aluminum, not presenting phytoremediation potential. **Journal of Agricultural Science**, v.10, p.265-275, 2018.

QUINN, C.F. et al. Selenium hyperaccumulation offers protection from cell disruptor herbivores. **BMC Ecology**, v.10, n.1, p.19, 2010.

RÉMUS-BOREL, W. et al. Aconitate and methyl aconitate are modulated by silicon in powdery mildew-infected wheat plants. **Journal of plant physiology**, v. 166, n. 13, p. 1413-1422, 2009.

REYNOLDS, O.L. et al. Silicon: potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. **Front. Plant Sci.**, v.7, p.744, 2016.

SADE, H. et al. Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to acid soils. **Biomaterials**, v.29, n.2, p.187-210, 2016.

SAMUELS, A. L. et al. Distribution of silicon in cucumber leaves during infection by powdery mildew fungus (*Sphaerotheca fuliginea*). **Canadian Journal of Botany**, v. 69, n. 1, p. 140-146, 1991.

SCHIAVON, M. et al. Effects of selenium on plant metabolism and implications for crops and consumers. In: **Selenium in plants**. Springer, Cham, p.257-275. 2017.

SILVA-LUZ, C.L.; PIRANI, J.R. Anacardiaceae. In R.C. Forzza et al. (org.) Catálogo de plantas e fungos do Brasil. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, v.1, p.599-602, 2010.

SINGH, S. et al. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v.137, p.177–193, 2017.

SOUZA, S.A.M. **Biotestes na Avaliação da Fitotoxicidade de Extratos Aquosos de Plantas Medicinais Nativas do Rio Grande do Sul**. 2005. 89 f. Monografia (Curso de Ciências Biológicas) – Instituto de Biologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2005.

ULIANA, M.P. et al. Composition and biological activity of Brazilian rose pepper (*Schinus terebinthifolius* Raddi) leaves. **Ind. Crops Prod.**, v.83, p.235–240, 2016.

WAGNER, F. et al. The importance of silicic acid for the growth of some cultivated plants, their metabolism, and their susceptibility to true mildews. **Phytopathologische Zeitschrift**, v. 12, n. 5, 1940.

WU, J. et al. Silicon-enhanced oxalate exudation contributes to alleviation of cadmium toxicity in wheat. **Environmental and Experimental Botany**, v. 131, p. 10-18, 2016.

YE, M. et al. Priming of jasmonate-mediated antiherbivore defense responses in rice by silicon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 38, p. E3631-E3639, 2013.

APÊNDICE



APÊNDICE A- Plantas de *Schinus terebinthifolius* no processo de aclimação após a instalação do experimento.





APÊNDICE B- Aspecto visual das raízes de *Schinus terebinthifolius* com 14 dias de exposição ao tratamento controle (T1) (A), ao tratamento contendo 2,5 Si mM (T2) (B), ao tratamento contendo 0,0025 Se mM (T3) (C), ao tratamento contendo 1,85 mM Al (T4) (D), ao tratamento contendo 1,85 mM Al + 2,5 Si mM (T5) (E), ao tratamento contendo 1,85 mM Al + 0,0025 Se mM (T6) (F), ao tratamento contendo 3,71 mM Al (T7) (G), ao tratamento contendo 3,71 mM Al+ 2,5 Si mM (T8) (H) e ao tratamento contendo 3,71 mM Al + 0,0025 Se mM (T9) (I).



APÊNDICE C- Aspecto visual das plantas de *Schinus terebinthifolius* após retirada da exposição aos tratamentos por 21 dias. (Al, Si e Se em mM) Tratamento 1: 0 Al + 0 Se e Si; Tratamento 2: 0 Al + 2,5 Si; Tratamento 3: 0 Al + 0,0025 Se; Tratamento 4: 1,85 Al+ 0 Se e Si; Tratamento 5: 1,85 Al + 2,5 Si; Tratamento 6: 1,85 Al + 0,0025 Se; Tratamento 7: 3,71 Al + 0 Se e Si; Tratamento 8: 3,71 Al + 2,5 Si; Tratamento 9: 3,71 Al+ 0,0025 Se;