RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta dissertação será
disponibilizado a partir de
20/08/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA- CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

BEATRIZ SILVÉRIO DOS SANTOS

ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS EM *Crotalaria spp*. EM RESPOSTA AO ALUMÍNIO

Ilha Solteira

2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS EM *Crotalaria spp*. EM RESPOSTA AO ALUMÍNIO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre. Especialidade: Sistemas de Produção.

Orientadora:
Profa. Dra. Liliane Santos de Camargos

Coorientador:
Prof. Dr. Lucas Anjos de Souza

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

S237a

Santos, Beatriz Silvério dos.
Alterações morfofisiológicas em *Crotalaria spp.* em resposta ao alumínio / Beatriz Silvério dos Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
80 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Liliane Santos de Camargos
Coorientador: Lucas Anjos de Souza
Inclui bibliografia

1. Metabolismo do nitrogênio. 2. Fixação biológica. 3. Calagem. 4. Fabaceae. 5. Leguminosae. 6. Anatomia.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa sobre a tolerância ao alumínio em espécies do gênero *Crotalaria* possui um impacto significativo em várias dimensões. Cientificamente, ela contribui para a compreensão dos mecanismos de tolerância ao alumínio, com aplicação em outras leguminosas. Tecnicamente, aprimora práticas agrícolas, como rotação de culturas e recuperação de áreas degradadas, aumentando a produtividade e a sustentabilidade. Socialmente, melhora a segurança alimentar e beneficia comunidades rurais com alternativas de cultivo resilientes. Inovadoramente, desenvolve estratégias de cultivo através de espécies tolerantes. Economicamente, reduz custos com fertilizantes e melhora a qualidade do solo. Promovendo a sustentabilidade, a pesquisa oferece soluções naturais e eficientes para problemas agrícolas e ambientais, melhorando a saúde do solo, a produtividade agrícola e a conservação ambiental, gerando avanços científicos, técnicos e educacionais, além de promover inovação e impacto positivo na sociedade e economia, reforçando o compromisso com o desenvolvimento sustentável.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Research on aluminum tolerance in species of the genus *Crotalaria* has a significant impact across multiple dimensions. Scientifically, it contributes to understanding the mechanisms of aluminum tolerance, with applications in other legumes. Technically, it enhances agricultural practices, such as crop rotation and the recovery of degraded areas, increasing productivity and sustainability. Socially, it improves food security and benefits rural communities by providing more resilient cultivation alternatives. From an innovation perspective, it develops cultivation strategies through tolerant species. Economically, it reduces fertilizer costs and improves soil quality. By promoting sustainability, the research offers natural and efficient solutions to agricultural and environmental challenges, improving soil health, agricultural productivity, and environmental conservation. Furthermore, it generates scientific, technical, and educational advancements, fosters innovation, and creates a positive impact on society and the economy, reinforcing the commitment to sustainable development.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS EM CROTALARIA ssp. EM RESPOSTA AO E ALUMÍNIO TÓXICO

AUTORA: BEATRIZ SILVÉRIO DOS SANTOS
ORIENTADORA: LILIANE SANTOS DE CAMARGOS
COORIENTADOR: LUCAS ANJOS DE SOUZA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. LILIANE SANTOS DE CAMARGOS (Participaçao Virtual)
Departamento de Biologia e Zootecnia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participaçao Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. GILBERTO COSTA JUSTINO (Participaçao Virtual)
Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde / Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Documento assinado digitalmente
GILBERTO COSTA JUSTINO
Data: 21/08/2024 08:52:53-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Ilha Solteira, 20 de agosto de 2024

Documento assinado digitalmente
MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 21/08/2024 09:31:56-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dedico este trabalho aos meus Pais, Edna e Cláudio.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha profunda gratidão à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” pela oportunidade de realizar o mestrado em Agronomia. Agradeço também a todos os funcionários da UNESP - FEIS pela colaboração e suporte prestados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 142627/2022-4.

À minha orientadora, Liliane Santos de Camargos, sou imensamente grata pelos ensinamentos, conselhos e compreensão. Sua orientação ao longo desses anos tornou minha trajetória acadêmica mais leve e inspiradora. Agradeço também por me integrar ao grupo LFMV – Laboratório de Fisiologia do Metabolismo Vegetal, onde conheci pessoas incríveis, especialmente Tássia Ferreira, Maiara Grigoli e Patricia Rosalem. Obrigada por todo apoio! Ao meu coorientador, Lucas Anjos, agradeço pelo suporte e auxílio na construção desta pesquisa. Sua contribuição foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, Edna Silvério dos Santos e Claudio José dos Santos, meu eterno agradecimento pelo suporte e força para seguir em frente. Sem o esforço e dedicação de vocês, eu não teria alcançado meus objetivos. Vocês são a base de todas as minhas conquistas.

Aos meus irmãos, Maria Claudia Silvério e Diego Silvério, minha gratidão pelo constante apoio e conselhos. Em especial à Maria, que sempre esteve presente, mesmo à distância, sendo meu ombro amigo em todas as situações. Amo vocês.

Às minhas sobrinhas Justine, Valentine, Angeline e Natureza Silvério, que enchem minha vida de amor e alegria. Vocês são minha motivação diária.

Ao meu namorado, Renan Madeira, agradeço por ser meu companheiro e melhor amigo. Obrigada por me apoiar e acreditar em mim. É um privilégio compartilhar a vida com você. Que possamos crescer muito juntos.

Agradeço também às minhas amigas da República Casa das Primas: Karina, Érica, Victoria e Noah. Vocês são mulheres inteligentes e companheiras, sempre dispostas a oferecer o melhor de si para ajudar umas às outras. É um prazer morar com vocês e saber que nossa amizade é para a vida toda. Amo vocês! Obrigada

por sempre estarem ao meu lado.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, cruzaram meu caminho e contribuíram para minha formação pessoal e profissional. Minha história não seria a mesma sem vocês. Meu eterno OBRIGADA!

“A natureza, em seus caprichos e mistérios, condensa pequenas o poder de dirigir as grandes; nas sutis, a potência de dominar as mais grosseiras; nas coisas simples, a capacidade de reger as complexas”. (Ana Maria Primavesi, em Manejo ecológico do Solo).

RESUMO

Os solos brasileiros são predominantemente ricos em alumínio, que se torna móvel em pH < 5, afetando plantas sensíveis; no entanto, algumas espécies desenvolveram mecanismos de tolerância ao alumínio. O objetivo deste estudo foi comparar as respostas fisiológicas das espécies do gênero *Crotalaria* (Fabaceae), cultivadas em substrato contendo Al^{3+}, que têm a capacidade de se associar com bactérias fixadoras de nitrogênio. O solo utilizado foi Latossolo; o delineamento experimental foi em blocos ao acaso em esquema fatorial (2x3): fator solo (teor disponível de alumínio tóxico; correção com calcário dolomítico - $MgCO_3$) e fator espécie (*C. juncea; C. spectabilis; C. ochroleuca*), cultivadas por 43, 53 e 53 dias, respectivamente, com cinco repetições, totalizando 30 amostras experimentais. Massa e comprimento, pigmentos, trocas gasosas e alterações das nas análises de ureídeos (ácidos alantóico e alantoína) foram avaliados. *C. juncea* teve maior concentração de aminoácidos nas folhas, carbono interno e condutância estomática em solo com Al^{3+}, assim como maior produção de ureídeos, ácido alantoínico, ácido alantóico, proteínas e aminoácidos nos nódulos, com 78% do acúmulo de Al^{3+} ocorrendo nas raízes. O comprimento da parte aérea e o número de nódulos foi maior em *C. ochroleuca* cultivada em solo corrigido; por outro lado, em solo com Al^{3+}, ocorreu aumento de 91% no teor de clorofila *a* e 93% no teor de carotenóides. A produção de ureídeos aumentou 93% nas folhas *C. spectabilis* em solo com Al^{3+}. *C. juncea* acumulou o metal no sistema radicular, o que resultou em alterações teciduais nessa região, como mudanças nos elementos de vaso e no xilema primário. Entretanto, a parte aérea manteve integridade. Diante do que foi avaliado, as três espécies tiveram tolerância ao alumínio presente no solo.

Palavras-chave: Metabolismo do nitrogênio; fixação biológica; calagem; Fabaceae; Leguminosae; anatomia; tolerância.

ABSTRACT

Brazilian soils are predominantly rich in aluminum, which becomes mobile at pH < 5, affecting sensitive plants; however, some species have developed mechanisms to tolerate aluminum. The aim of this study was to compare the physiological responses of species from the genus *Crotalaria* (Fabaceae), grown in substrate containing Al^{3+}, which have the ability to associate with nitrogen-fixing bacteria. The soil used was a Latosol; the experimental design was a randomized block in a factorial scheme (2x3): soil factor (available toxic aluminum content; correction with dolomitic limestone - $MgCO_3$) and species factor (*C. juncea*; *C. spectabilis*; *C. ochroleuca*), cultivated for 43, 53, and 53 days, respectively, with five repetitions, totaling 30 experimental samples. Mass and length, pigments, gas exchange, and changes in ureides analyses (allantoic and allantoinic acids) were evaluated. *C. juncea* had higher concentrations of amino acids in the leaves, internal carbon, and stomatal conductance in soil with Al^{3+}, as well as higher production of ureides, allantoinic acid, allantoic acid, proteins, and amino acids in the nodules, with 78% of the Al^{3+} accumulation occurring in the roots. Shoot length and nodule number were greater in *C. ochroleuca* grown in corrected soil; on the other hand, in soil with Al^{3+}, there was a 91% increase in chlorophyll a content and a 93% increase in carotenoid content. Ureide production increased by 93% in the leaves of *C. spectabilis* in soil with Al^{3+}. *C. juncea* accumulated the metal in the root system, which resulted in tissue alterations in this region, such as changes in vessel elements and primary xylem. However, the shoot maintained its integrity. Based on the assessments, all three species showed tolerance to aluminum present in the soil.

Keywords: Nitrogen metabolism; biological fixation; liming; Fabaceae; Leguminosae; anatomy; tolerance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do delineamento e desenho experimental em um layout fatorial com a distribuição de cada tratamento (Diagrama), com T1 = *C. juncea* com alumínio, T2 = *C. juncea* com calagem, T3 = *C. ochroleuca* com alumínio, T4 = *C. ochroleuca* com calagem, T5 = *C. spectabilis* com alumínio, e T6 = *C. spectabilis* com calagem, e tipos de avaliações (biométricas, troca gasosa e fisiologia) 25

Figura 2 – (A) Fotossíntese líquida (µmol CO_2 m^2 s^{-1}), (B) carbono interno na folha (µmol mol^{-1}), (C) condutância estomática (mol H_2O m^2 s^{-1}), (D) transpiração (mmol H_2O m^2 s^{-1}), (E) eficiência no uso da água (µmol CO_2 mmol H_2O^{-1}), (F) quantificação de clorofila a (mg g^{-1}), (G) quantificação de clorofila b (mg g^{-1}), (H) quantificação de carotenoides (mg. g^{-1}). Cada espécie é representada por duas colunas, com colunas verdes escuras indicando solo com alumínio disponível e colunas verdes claras indicando solo com calagem. Letras maiúsculas indicam a comparação das médias entre diferentes espécies de plantas sob as mesmas condições de solo, enquanto letras minúsculas comparam as médias entre condições de solo para cada espécie de planta.....40

Figura 3 – Os dados referem-se às espécies de *Crotalaria*: (A) número de nódulos, (B) massa nodular (g/planta), (C) comprimento da parte aérea (cm/planta), (D) comprimento da raiz (cm/planta), (E) massa fresca da parte aérea (g/planta), (F) massa fresca da raiz (g/planta), (G) massa seca da parte aérea (g/planta), (H) massa seca da raiz (g/planta). Cada espécie é representada por duas colunas, com colunas verdes escuras indicando solo com alumínio disponível e colunas verdes claras indicando solo com calagem. Letras maiúsculas indicam a comparação das médias entre diferentes espécies de plantas sob as mesmas condições de solo, enquanto letras minúsculas comparam as médias entre condições de solo para cada espécie de planta.....37

Figura 4 – As espécies *C. juncea* foram cultivadas com alumínio e solo com calagem (controle de solo) por 43 dias. A espécie *C. ochroleuca* foi cultivada com alumínio e solo com calagem por 53 dias, assim como *C. spectabilis*. As plantas foram selecionadas aleatoriamente para a fotografia.....41

Figura 5 – (A) Concentração de ácido alantóico, alantoína e ureídeos nos nódulos (µmol.g^{-1}), (B) concentração total de proteínas nos nódulos (mg.g^{-1} MS), (C) concentração de aminoácidos solúveis nos nódulos (µmol.g^{-1}). Letras maiúsculas indicam a comparação das médias entre diferentes espécies de plantas sob as mesmas condições de solo, enquanto letras minúsculas indicam comparação das médias entre condições de solo para cada espécie de planta.....43

Figura 6 – (A) Concentração de ácido alantóico nas raízes (µmol.g^{-1}), (B) concentração total de proteínas nas raízes (mg.g^{-1} MS), (C) concentração de aminoácidos solúveis nas raízes (µmol.g^{-1}). Letras maiúsculas indicam a comparação das médias entre diferentes espécies de plantas sob as mesmas condições de solo, enquanto letras minúsculas indicam comparação das médias entre condições de solo para cada espécie de planta.....45

Figura 7 – (A) Concentração de ácido alantóico nas raízes (µmol.g^{-1}), (B) concentração total de proteínas nas raízes (mg.g^{-1} MS), (C) concentração de aminoácidos solúveis nas raízes (µmol.g^{-1}). Letras maiúsculas indicam a comparação das médias entre diferentes espécies de plantas sob as mesmas condições de solo, enquanto letras minúsculas indicam comparação das médias entre condições de solo para cada espécie de planta.....47

Figura 8 – (A) Acúmulo na raiz (mg/órgão raiz), (B) acúmulo na parte aérea (mg/órgão parte aérea), (C) acúmulo total (mg/órgão total), (D) índice de tolerância, (E) fator de transferência (%), (F) índice de translocação da Raiz (%), (G) índice de translocação da parte aérea (%). Cada espécie é representada por duas colunas, sendo colunas verde-escuras indicando solo com alumínio disponível e colunas verde-claras indicando solo com calagem. Letras maiúsculas indicam a comparação das médias entre diferentes espécies de plantas sob as mesmas condições de solo, enquanto letras minúsculas indicam comparação das médias entre condições de solo para cada espécie de planta.....49

Figura 9 – (A) Xilema primário (µm), (B) xilema secundário (µm), (C) floema secundário (µm), (D) elemento de vaso (µm), (E) epiderme adaxial (µm), (F) epiderme abaxial (µm), (G) parênquima paliçádico (µm), (H) parênquima lacunoso (µm), (I) área foliar (µm). Cada espécie é representada por duas colunas, sendo colunas verde-escuras indicando solo com alumínio disponível e colunas verde-claras indicando solo com calagem. Letras maiúsculas indicam a comparação das médias entre diferentes espécies de plantas sob as mesmas condições de solo, enquanto letras minúsculas indicam comparação das médias entre condições de solo para cada espécie de planta. 51

Figura 10 – Secções transversais A.B.E.F.I.J. e eletromicrografias (MEV) da região da coifa C.D.G.H.K.L. das raízes de três espécies de *Crotalaria*, cultivadas em solo com alumínio disponível e outro solo com calagem (controle). A.B. *C. juncea*; E.F. *C. spectabilis;* I.J. *C. ochroleuca*. PX- Xilema primário; SPh- floema secundário; SX- xilema secundário; ve- elementos de vaso. 52

Figura 11 – Secções transversais das folhas *de Crotalaria juncea, C. spectabilis,*

C. ochroleuca, cultivadas em solo com alumínio disponível e outro solo com calagem (controle). A.B.E.F.I.J. região da nervura central, C.D.G.H.K.L. região do limbo foliar. abe- epiderme abaxial, ade- epiderme adaxial, Ph- floema, pp- parênquima paliçádico, sp- parênquima lacunoso, st- estômato, tr- tricoma, vb- feixe vascular, X- xilema.....53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química do solo antes do cultivo, solo inicial e solo inicial com adubação e calagem..... 23

Tabela 2 – Caracterização física do solo antes do cultivo, solo inicial e solo inicial com adubação e calagem..... 24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

2 REVISÃO DE LITERATURA 19

2.1 ALUMÍNIO 19

2.2 LEGUMINOSAS 21

3 MATERIAL E MÉTODOS 22

3.1 INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO E PREPARAÇÃO DO SOLO 22

3.2 MATERIAL VEGETAL E TRATAMENTO DE SEMENTES 24

3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL 25

3.4 TROCAS GASOSAS 27

3.5 COLETA E AVALIAÇÕES BIOMÉTRICAS 27

3.6 PIGMENTOS 28

3.7 EXTRAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE COMPOSTOS SOLÚVEIS 29

3.7.1 Ureídeos: alantoína e ácido alantóico 29

3.7.2 Proteínas 30

3.7.3 Aminoácidos 30

3.8 ANÁLISE DE ALUMÍNIO NA BIOMASSA VEGETAL 31

3.9 ACÚMULO DE ALUMÍNIO NA BIOMASSA SECA, FATOR DE TRANSFERÊNCIA E ÍNDICE DE TOLERÂNCIA 31

3.10 ANATOMIA **32**

3.10.1 Microscopia de luz 32

3.10.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 33

3.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA 33

4 RESULTADOS 35

4.1 TROCAS GASOSAS 35

2.2 PIGMENTOS 35

4.3 BIOMETRIA 38

4.4 QUANTIFICAÇÃO DE COMPOSTOS 41

4.4.1 Nódulos 41

4.4.2 Raíz 43

4.4.3 Folhas 45

4.5 ACÚMULO DE ALUMÍNIO NA BIOMASSA E ÍNDICE DE TOLERÂNCIA 47

4.6 EFEITO DO ALUMÍNIO NA ANATOMIA RADICULAR E FOLIAR 47

5 DISCUSSÃO 54

5.1 INFLUÊNCIA DO ALUMÍNIO NO PROCESSO FOTOSSINTÉTICO E NO CRESCIMENTO DAS PLANTAS 54

5.2 NODULAÇÃO E TRANSLOCAÇÃO DE COMPOSTOS NITROGENADOS EM PLANTAS 56

5.3 TOLERÂNCIA E ACUMULAÇÃO DE ALUMÍNIO NA BIOMASSA VEGETAL 58
5.4 ALTERAÇÕES ANATÔMICAS 59
6 CONCLUSÃO 64
REFERÊNCIAS 65
APÊNDICE A - MATERIAL SUPLEMENTAR

1 INTRODUÇÃO

O alumínio (Al) é o terceiro metal mais abundante na superfície da Terra, sendo um elemento constituinte do solo mineral (Yamamoto, 2019). As formas mais comuns de alumínio encontradas são óxidos de alumínio e aluminosilicatos em condições estáveis; entre as variações moleculares, possui duas formas consideradas rizotóxicas, a saber: Al^{3+} e $Al\ (OH)^{4-}$ (Shetty *et al.*, 2021). Em solos ácidos (pH<5), o Al sofre hidrólise, resultando em íons livres dissolvidos na água ($[Al(H_2O)_6]^{3+}$), referido como alumínio tóxico (Al^{3+}) (Rahman *et al.*, 2018). Essa forma é considerada a mais tóxica para as plantas, afetando agressivamente o crescimento radicular e, consequentemente, a absorção de água e nutrientes (Yang; Fan; Zheng, 2019).

Os íons de Al são cátions altamente reativos, com afinidade preferencial por grupos doadores de elétrons, como carboxilos e fosfatos (Yamamoto, 2019). Este elemento possui muitos sítios de ligação potenciais que podem ser prejudicados, incluindo a parede celular, a superfície da membrana plasmática, o citoesqueleto e o núcleo (Panda; Baluška; Matsumoto, 2009). Assim, o órgão mais danificado pela toxicidade do alumínio é o sistema radicular. O acúmulo de Al causa a inibição do alongamento celular no ápice radicular (capuz, meristema e zona de alongamento) (Yan *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2018), e como a divisão celular também ocorre nessa região, sendo sensível ao Al, a divisão é interrompida, resultando em danos físicos como raízes quebradiças e atrofiadas (Panda; Baluška; Matsumoto, 2009). Embora cause toxicidade às plantas, algumas espécies desenvolveram diferentes mecanismos de defesa fisiológica que promovem exclusão ou tolerância ao alumínio, que podem ser caracterizados em dois grupos: exclusão, que impede a entrada de Al no ápice radicular (apoplasto e simplasto), e tolerância ao Al, onde o Al é absorvido e internalizado pela planta, resultando em um processo de desintoxicação (Kochian *et al.*, 2015).

Avanços em pesquisas relacionadas a espécies agrícolas, tanto tolerantes quanto sensíveis ao excesso de Al no solo, representam uma perspectiva para reduzir os impactos negativos que afetam a produtividade das culturas. Considerando que o Cerrado é um bioma de extrema importância para a agricultura, dado o cultivo de espécies como soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*), feijão (*Phaseolus vulgaris*) e cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) (Wander; Cunha, 2016). No entanto, para manter a produtividade sem expandir as fronteiras agrícolas, é necessário entender o

uso de novos métodos de manejo para promover uma agricultura sustentável. Portanto, pesquisas focadas em espécies usadas como adubo verde adaptadas ao Cerrado destacam-se como uma possibilidade atraente e viável para enfrentar essa questão. Isso possivelmente resultaria na redução de gastos com métodos corretivos.

As leguminosas são principalmente utilizadas na adubação verde devido à sua capacidade de fixação de nitrogênio, reduzindo a necessidade de fertilizantes à base de nitrogênio (Gut *et al.*, 2022; Martirosyan *et al.*, 2023). A região onde essas espécies são cultivadas geralmente possui solos ácidos, e entender os mecanismos fisiológicos envolvidos na determinação da tolerância e identificar a região de dano causada pelo alumínio pode legitimar a recomendação do uso de espécies de *Crotalaria* para cultivo em solos com alta concentração de alumínio.

Crotalaria Linnaeus (Fabaceae) compreende cerca de 700 espécies distribuídas em regiões tropicais e subtropicais (Le Roux; Wyk, 2013; Yaradua, Alzahrani; Bello, 2019). A *Crotalaria juncea* auxilia na ciclagem de nutrientes do solo e pode acumular metais potencialmente tóxicos como chumbo (Silva *et al.*, 2021), níquel (Cardoso *et al.*, 2005) e cádmio (Uraguchi *et al.*, 2006). Esta espécie é altamente recomendada para rotação de culturas (Franke; Marinho, 2020). A *Crotalaria spectabilis* tem sido implementada em solos do Cerrado devido à sua alta adaptabilidade a diferentes locais tropicais; sua alta produção de massa seca contribui para o enriquecimento do solo através da decomposição (Ferreira *et al.*, 2010; Mauad *et al.*, 2019; Pacheco *et al.*, 2015), e também é considerada uma espécie fitorremediadora de metais tóxicos como o chumbo (Lindino, Tomczak e Gonçalves Junior, 2012). A *Crotalaria ochroleuca*, além de ser utilizada na adubação verde, é conhecida por seu potencial de tolerância ao alumínio, tornando-a adequada para solos ácidos (Meda; Furlani, 2005).

Na escolha das espécies de *Crotalaria* para este estudo, vários fatores foram considerados, especialmente o uso estabelecido dessas plantas na adubação verde e seus potenciais benefícios na melhoria da saúde do solo. Espera-se que *C. juncea, C. ochroleuca* e *C. spectabilis* apresentem diferentes respostas ao estresse por alumínio. *C. juncea* e *C. ochroleuca* são previstas para mostrar tolerância moderada a alta com boa produção de biomassa, enquanto *C. spectabilis*, devido à sua tolerância ao alumínio e adaptabilidade, é esperada para prosperar em solos ácidos (Meda; Furlani, 2005).

Apesar das características favoráveis das espécies deste gênero, existem poucos estudos sobre sua capacidade de acumular alumínio potencialmente tóxico em sua biomassa, e não há relatos avaliando características biométricas e fisiológicas. A novidade deste estudo reside em demonstrar diferentes respostas a altos níveis de alumínio disponível, de modo que o potencial das espécies para a recuperação de áreas degradadas ou como adubo verde na rotação de culturas e áreas de silvipastoril possa ser avaliado.

A hipótese do presente estudo é que, na presença de alumínio tóxico, as espécies apresentarão diminuições nas trocas gasosas, no metabolismo de nitrogênio e de pigmentos, mas manterão o crescimento do sistema radicular e da parte aérea, mantendo o potencial para acúmulo de biomassa e crescimento. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a tolerância das espécies C. juncea, C. ochroleuca e C. spectabilis ao alumínio, determinando sua capacidade de acumular o metal na biomassa e manter o crescimento em condições adversas.

6 CONCLUSÃO

As espécies de *Crotalaria* são tolerantes ao alumínio presente no solo. Essa capacidade está demonstrada pelo fato de as espécies não apresentarem redução significativa no acúmulo de biomassa total, o que pode estar relacionado a fatores de mitigação de estresse pois se observa que houve absorção e translocaçãoade alumínio uma vez que houve detecção em folhas ou raízes, o que, embora resulte em redução do comprimento radicular, indica haver um mecanismo de adaptação. Em *C. juncea*, o alumínio afeta a anatomia radicular, impactando o xilema primário e os elementos de vaso, o que pode prejudicar a absorção de água afetando, portanto, as trocas gasosas; no entanto, a espécie ainda é capaz de manter a fixação biológica de nitrogênio, indicando uma possível resistência do sistema simbiótico ao alumínio. Por outro lado, *C. spectabilis* e *C. ochroleuca* mostraram poucas alterações fisiológicas, o que pode ter relação com o menor acúmulo de alumínio nas folhas e raízes gerando menor impacto no metabolismo.

No entanto, é crucial conduzir mais pesquisas para entender os efeitos a longo prazo da exposição ao alumínio, as interações com outros elementos do solo e os mecanismos moleculares subjacentes à tolerância das plantas. Estudos de campo e a análise do estágio fenológico reprodutivo são necessários para desenvolver práticas agrícolas sustentáveis que maximizem o potencial das espécies de *Crotalaria* em diversos ambientes agrícolas. No entanto, essas características destacam a resiliência das espécies de *Crotalaria* em ambientes com concentrações de alumínio, evidenciando uma complexa interação entre o acúmulo de alumínio e a aclimatação fisiológica dessas plantas.

REFERÊNCIAS

ALAMILLO, J. M.; DÍAZ-LEAL, J. L.; SÁNCHEZ-MORAN, MA. V.; PINEDA, M. Molecular analysis of ureide accumulation under drought stress in Phaseolus vulgaris L. **Plant, Cell & Environment**, Chichester, v. 33, n. 11, p. 1828–1837, 2010.

ALI, B.; HASAN, S. A.; HAYAT, S.; HAYAT, Q.; YADAV, S.; FARIDUDDIN, Q.; AHMAD, A. Um papel dos brassinosteróides na melhoria do estresse do alumínio por meio do sistema antioxidante no feijão mungo (*Vigna* radiata L. Wilczek). **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 62, n. 2, p. 153–159, mar. 2008.

ALVAREZ, I.; SAM, O.; REYNALDO, I.; TESTILLANO, P. S.; RISUEÑO, M. C.; ARIA, M. Morphological and cellular changes in rice roots (Oryza sativa L.) caused by Al stress. **Botanical Studies**, Taiwan, v. 53, p. 67-73 30, 2012.

ARAUJO, M. A.; LEITE, M. C. M.; CAMARGOS, L. S.; MARTINS, A. R. Tolerance evaluation and morphophysiological responses of Astronium graveolens, a native brazilian Cerrado, to addition of lead in soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 195, p. 110524, jun. 2020.

ARF, O.; PORTUGAL, J. R.; BUZETTI, S.; RODRIGUES, R. A. F.; SÁ, M. E. DE. Crop rotation, green manure and nitrogen fertilizers in upland rice under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 48, p. 153–162, jun. 2018.

ATKINS, C. A.; SMITH, P. M. C. Translocation in Legumes: Assimilates, Nutrients, and Signaling Molecules1. **Plant Physiology**, Rockville, v. 144, n. 2, p. 550–561, jun. 2007.

BANHOS, O. F. A. A.; O. CARVALHO, B. M. DE; VEIGA, E. B. DA; BRESSAN, A. C. G.; TANAKA, F. A. O.; HABERMANN, G. A diminuição da assimilação de CO 2 induzida pelo alumínio no limoeiro “Cravo” está associada à baixa condutância estomática e não ao baixo desempenho fotoquímico. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 205, p. 133–140, jun. 2016.

BAROLI, I.; PRICE, G. D.; BADGER, M. R.; CAEMMERER, S. VON. The Contribution of Photosynthesis to the Red Light Response of Stomatal Conductance. **Plant Physiology**, Rockville, v. 146, n. 2, p. 323–324, fev. 2008.

BATISTA, M. F.; MOSCHETA, I. S.; BONATO, C. M.; BATISTA, M. A.; ALMEIDA, O. J. G. DE; INOUE, T. T. Aluminum in corn plants: influence on growth and morpho-anatomy of root and leaf. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, p. 177–187, fev. 2013.

BATRA, N. G.; SHARMA, V.; KUMARI, N. Drought-induced changes in chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and thylakoid membrane proteins of Vigna radiata. **Journal of Plant Interactions**, Abingdon, v. 9, n. 1, p. 712–721, jan. 2014.

BENNET, R. J.; BREEN, C. M.; BANDU, V. Aluminium toxicity and regeneration of the root cap: Preliminary evidence for a Golgi apparatus derived morphogen in the primary root of Zea mays. **South African Journal of Botany**, Amsterdam, v. 51, n. 5, p. 363–370, out. 1985.

BIELESKI, R. L.; TURNER, N. A. Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 17, n. 2, p. 278–293, nov. 1966.

BOMFIM, N. C. P.; AGUILAR, J. V.; PAIVA, W. DA S. DE; SOUZA, L. A. DE; JUSTINO, G. C.; FARIA, G. A.; CAMARGOS, L. S. Iron phytostabilization by Leucaena leucocephala. **South African Journal of Botany**, Amsterdam, v. 138, p. 318–327, maio 2021.

BORDELEAU, L. M.; PRÉVOST, D. Nodulation and nitrogen fixation in extreme environments. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 161, n. 1, p. 115–125, abr. 1994.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 72, p. 248–254, maio 1976.

BRESSAN, A. C. G.; OLIVEIRA CARVALHO BITTENCOURT, B. M. DE; SILVA, G. S.; HABERMANN, G. Could the absence of aluminum (Al) impair the development of an Al-accumulating woody species from Brazilian savanna? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Heidelberg, v. 33, n. 3, p. 281–292, set. 2021.

BRUNNER, I.; SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, p. 1-12, 2013.

BRYCHKOVA, G.; ALIKULOV, Z.; FLUHR, R.; SAGI, M. A critical role for ureides in dark and senescence-induced purine remobilization is unmasked in the Atxdh1 Arabidopsis mutant. **The Plant Journal**, Chichester, v. 54, n. 3, p. 496–509, 2008.

BUSCH, F. A. *et al.* A guide to photosynthetic gas exchange measurements: Fundamental principles, best practice and potential pitfalls. **Plant, Cell & Environment**, Chichester, v. 47, n. 9, p. 3344-3364, 2024.

CARDOSO, P. F.; GRATÃO, P. L.; GOMES-JUNIOR, R. A.; MEDICI, L. O.; AZEVEDO, R. A. Response of Crotalaria juncea to nickel exposure. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 17, p. 267–272, jun. 2005.

ČIAMPOROVÁ, M. Morphological and Structural Responses of Plant Roots to Aluminium at Organ, Tissue, and Cellular Levels. **Biologia Plantarum**, Prague, v. 45, n. 2, p. 161–171, 1 jun. 2002.

DEVECCHI, M. F.; PIRANI, J. R.; MELO-DE-PINNA, G. F. DE A. Comparative leaf anatomy and morphology of some Brazilian species of Crotalaria L. (Leguminosae: Papilionoideae: Crotalarieae). **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, v. 28, p. 583–593, dez. 2014.

DONG, Z.; SHI, L.; WANG, YANWEI; CHEN, L.; CAI, Z.; WANG, YOUNING; JIN, J.; LI, X. Identification and Dynamic Regulation of microRNAs Involved in Salt Stress Responses in Functional Soybean Nodules by High-Throughput Sequencing. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 14, n. 2, p. 2717–2738, fev. 2013.

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, p. 531–541, jun. 2001.

FERREIRA, A. C. DE B.; LAMAS, F. M.; CARVALHO, M. DA C. S.; SALTON, J. C.; SUASSUNA, N. D. Cover crops biomass production and cotton yield in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, p. 546–553, jun. 2010.

FERREIRA, T. C.; AGUILAR, J. V.; SOUZA, L. A.; JUSTINO, G. C.; AGUIAR, L. F.; CAMARGOS, L. S. pH effects on nodulation and biological nitrogen fixation in Calopogonium mucunoides. **Brazilian Journal of Botany**, São Paulo, v. 39, n. 4, p. 1015–1020, dez. 2016.

FERREIRA, T. C.; ROSALEM, P. F.; AGUILAR, J. V.; SILVA, V. N. DA; ARAUJO, M. A. DE; MARTINS, A. R.; CAMARGOS, L. S. DE. Growth, nodulation, and anatomical characterization of Calopogonium mucunoides Desv., a tropical legume, in copper-contaminated soil. **Brazilian Journal of Botany**, São Paulo, v. 46, n. 3, p. 633–644, 1 set. 2023.

FLUES, M.; SATO, I. M.; COTRIM, M. B.; SALVADOR, V. L.; RANZANI, A. C.; VALLILO, M. I.; OLIVEIRA, E. DE. Soil characterization in a subtropical forest crossed by highways (Cantareira State Park, SP, Brazil). **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 15, p. 496–503, ago. 2004.

FRANKE, I. L.; MARINHO, J. T. DE S. Adubação verde com Crotalária juncea no cultivo do milho e pastagem em sistema de integração lavoura pecuária na agricultura familiar no Acre. **Cadernos de Agroecologia**, [*s. l.*], v. 15, n. 2, set. 2020.

FREDEEN, A. L.; RAAB, T. K.; RAO, I. M.; TERRY, N. Effects of phosphorus nutrition on photosynthesis in Glycine max (L.) Merr. **Planta**, Berlin, v. 181, n. 3, p. 399–405, 1 jun. 1990.

GALMÉS, J.; MEDRANO, H.; FLEXAS, J. Photosynthetic limitations in response to water stress and recovery in Mediterranean plants with different growth forms. **New Phytologist**, Chichester, v.175, n. 1, p. 81-93, 2007.

GARCIA, J. M.; KAWAKITA, K.; MIOTTO, S. T. S.; SOUZA, M. C. DE. The genus Crotalaria L. (Leguminosae, Faboideae, Crotalarieae) in the Upper Paraná River Floodplain, Brazil. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 209–226, 2013.

GLICK, B. R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. **Canadian Journal of Microbiology**, Ottawa, v. 41, n. 2, p. 109–117, fev. 1995.

GORDON, A. J.; LEA, P. J.; ROSENBERG, C.; TRINCHANT, J.-C. Nodule Formation and Function. *In*: LEA, P. J.; MOROT-GAUDRY, J.-F. (ed.). **Plant nitrogen**. Berlin: Heidelberg: Springer, 2001. p. 101–146.

GREVENSTUK, T.; ROMANO, A. Aluminium speciation and internal detoxification mechanisms in plants: where do we stand? **Metallomics**, Ottawa, v. 5, n. 12, p. 1584–1594, dez. 2013.

GUPTA, N.; GAURAV, S. S.; KUMAR, A. Molecular basis of aluminium toxicity in plants: a review. **American Journal of Plant Sciences**, Irvine, v. 4, n. 12, p. 21-37, dez. 2013.

GUT, G. A. P.; NETO, J. V. E.; SANTOS, R. D. S.; MELO, R. F. D.; NOGUEIRA, D. M.; DIFANTE, G. D. S.; GURGEL, A. L. C.; SANTANA, Í. L. O. Intercrops of grass with legumes as green manure for agroecological systems. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, v. 16, n. 7, p. 922–927, 1 jul. 2022.

HELLSTEN, A.; HUSS-DANELL, K. Interaction Effects of Nitrogen and Phosphorus on Nodulation in Red Clover (Trifolium pratense L.). **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, Stockholm, v. 50, n. 3, p. 135–142, 1 jan. 2000.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, n. 2, p. 173–195, 1 dez. 2001.

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

HOEKENGA, O. A. *et al.* AtALMT1, which encodes a malate transporter, is identified as one of several genes critical for aluminum tolerance in Arabidopsis. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 103, n. 25, p. 9738–9743, jun. 2006.

HORRIDGE, G. A.; TAMM, S. L. Critical Point Drying for Scanning Electron Microscopic Study of Ciliary Motion. **Science**, [*s. l.*], v. 163, n. 3869, p. 817–818, 21 fev. 1969.

HORST, W. J.; WANG, Y.; ETICHA, D. The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: a review. **Annals of Botany**, Oxford, v. 106, n. 1, p. 185–197, jul. 2010.

JESUS, D. DA S. DE; MARTINS, F. M.; AZEVEDO NETO, A. D. DE. Structural changes in leaves and roots are anatomical markers of aluminum sensitivity in sunflower[1]. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 46, p. 383–390, dez. 2016.

JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique.** New York: McGraw-Hill, 1940.

KARNOVSKY, M. A Formaldehyde-Glutaraldehyde Fixative of High Osmolality for Use in Electron Microscopy. **Journal of Cellular Physiology**, Hoboken, v. 27, 30 nov. 1964.

KINRAIDE, T. B. Identity of the rhizotoxic aluminium species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 134, n. 1, p. 167–178, jul. 1991.

KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; LIU, J.; MAGALHAES, J. V. Plant Adaptation to Acid Soils: The Molecular Basis for Crop Aluminum Resistance. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 66, n. 1, p. 571–598, 2015.

LAMBERS, H.; RAVEN, J. A.; SHAVER, G. R.; SMITH, S. E. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. **Trends in Ecology & Evolution**, Cambridge, v. 23, n. 2, p. 95–103, 1 fev. 2008.

LAWSON, T.; CAEMMERER, S. VON; BAROLI, I. Photosynthesis and Stomatal Behaviour. *Em*: LÜTTGE, U. E.; BEYSCHLAG, W.; BÜDEL, B.; FRANCIS, D. (ed.). **Progress in Botany 72**. Berlin: Heidelberg: Springer, 2011. p. 265–304.

LE ROUX, M.; WYK, B.-E. A Taxonomic Revision of Amphitrichae , a New Section of Crotalaria (Fabaceae). **Systematic Botany**, Laramie, v. 38, p. 638–652, 12 set. 2013.

LIN, M.-H.; GRESSHOFF, P. M.; FERGUSON, B. J. Systemic Regulation of Soybean Nodulation by Acidic Growth Conditions. **Plant Physiology**, Rockville, v. 160, n. 4, p. 2028–2039, dez. 2012.

LINDINO, C. A.; TOMCZAK, A. P.; GONÇALVES JUNIOR, A. C. Soil phytoremediation using Crotalaria spectabilis for removal of cadmium and lead. **Scientia Agraria Paranaensis**, Cascavel, v. 11, n. 4, p. 25–32, 2012.

LIU, Y.; TAO, J.; CAO, J.; ZENG, Y.; LI, X.; MA, J.; HUANG, Z.; JIANG, M.; SUN, L. The Beneficial Effects of Aluminum on the Plant Growth in Camellia japonica. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 20, n. 4, p. 1799–1809, dez. 2020.

LOPES, A. S.; GUIMARÃES GUILHERME, L. R. Chapter one: a career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. *In*: SPARKS, D. L. (ed.). . **Advances in Agronomy**. [*S. l.*] Academic Press, 2016. v. 137 p. 1–72.

LÓPEZ-BUCIO, J.; NIETO-JACOBO, M. F.; RAMÍREZ-RODRÍGUEZ, V.; HERRERA-ESTRELLA, L. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. **Plant Science**, Shannon, v. 160, n. 1, p. 1–13, dez. 2000.

LU, M.-Z.; CARTER, A. M.; TEGEDER, M. Altering ureide transport in nodulated soybean results in whole-plant adjustments of metabolism, assimilate partitioning, and sink strength. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 269, p. 153613, fev. 2022.

MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 6, n. 6, p. 273–278, jun. 2001.

MARSHALL, B.; BISCOE, P. V. A Model for C3 Leaves Describing the Dependence of Net Photosynthesis on Irradiance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 31, n. 1, p. 29–39, fev. 1980.

MARTIN-BENITO, D.; ANCHUKAITIS, K. J.; EVANS, M. N.; DEL RÍO, M.; BEECKMAN, H.; CAÑELLAS, I. Effects of Drought on Xylem Anatomy and Water-Use Efficiency of Two Co-Occurring Pine Species. **Forests**, Basel, v. 8, n. 9, p. 332, set. 2017.

MARTIROSYAN, G. S.; SARIKYAN, K. M.; ADJEMYAN, G. J.; HAKOBYAN, A. H.; PAHLEVANYAN, A. M. The influence of green manure crops on the growth, development, yield and fruits quality of eggplant. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bristol, v. 1229, n. 1, p. 012006, 1 ago. 2023.

MAUAD, M.; SANTANA, R. S.; CARLI, T. H.; CARLI, F.; VITORINO, A. C. T.; MUSSURY, R. M.; RECH, J. Dry matter production and nutrient accumulation in Crotalaria spectabilis shoots. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 42, n. 6, p. 615–625, abr. 2019.

MEDA, A. R.; FURLANI, P. R. Tolerance to aluminum toxicity by tropical leguminous plants used as cover crops. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 48, n. 2, p. 309–317, mar. 2005.

MEYER, S.; MUMM, P.; IMES, D.; ENDLER, A.; WEDER, B.; AL-RASHEID, K. A. S.; GEIGER, D.; MARTEN, I.; MARTINOIA, E.; HEDRICH, R. AtALMT12 represents an R-type anion channel required for stomatal movement in Arabidopsis guard cells. **The Plant Journal**, Chichester, v. 63, n. 6, p. 1054–1062, 2010.

MYBURG, A.; SEDEROFF, R. **Xylem Structure and Function**. [*S. l.*], 2001.

NIEBOER, E.; RICHARDSON, D. H. S. The replacement of the nondescript term ‘heavy metals’ by a biologically and chemically significant classification of metal ions. **Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical**, Oxford, v. 1, n. 1, p. 3–26, jan. 1980.

OVERDIECK, D. Water Use Efficiency and Stomatal Conductance. *Em*: OVERDIECK, D. (ed.). **CO2, Temperature, and trees: experimental approaches**. Singapore: Springer, 2016. p. 57–64,

PACHECO, L. P.; MIGUEL, A. S. D. C. S.; BOMFIM-SILVA, E. M.; DESOUZA, E. D.; DASILVA, F. D. Influence of soil bulk density on shoot and root traits of crotalaria. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 464–472, dez. 2015.

PANDA, S. K.; BALUŠKA, F.; MATSUMOTO, H. Aluminum stress signaling in plants. **Plant Signaling & Behavior**, Philadelphia, v. 4, n. 7, p. 592–597, jul. 2009.

PÉRET, B.; CLÉMENT, M.; NUSSAUME, L.; DESNOS, T. Root developmental adaptation to phosphate starvation: better safe than sorry. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 16, n. 8, p. 442–450, 1 ago. 2011.

PLAXTON, W. C.; PODESTÁ, F. E. The functional organization and control of plant respiration. **Critical Reviews in Plant Sciences**, New York, v. 25, n. 2, p. 159-198, 2006.

PRADO, C. H. B. A.; CASALI, C. **Fisiologia vegetal**: práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição mineral. São Paulo: Manole, 2006.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 665–693, 1999.

RAHMAN, M. A.; LEE, S.-H.; JI, H. C.; KABIR, A. H.; JONES, C. S.; LEE, K.-W. Importance of Mineral Nutrition for Mitigating Aluminum Toxicity in Plants on Acidic Soils: Current Status and Opportunities. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 19, n. 10, p. 3073, out. 2018.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C. DE; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. p. 300.

RAM, A.; VERMA, P.; GADI, B. Effect of fluoride and salicylic acid on seedling growth and biochemical parameters of watermelon (Citrullus lanatus). **Fluoride**, Dunedin, v. 47, p. 49–55, jan. 2014.

RANGEL, A. F.; RAO, I. M.; HORST, W. J. Spatial aluminium sensitivity of root apices of two common bean (Phaseolus vulgaris L.) genotypes with contrasting aluminium resistance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 58, n. 14, p. 3895–3904, nov. 2007.

RAZA, A.; CHARAGH, S.; ABBAS, S.; HASSAN, M. U.; SAEED, F.; HAIDER, S.; SHARIF, R.; ANAND, A.; CORPAS, F. J.; JIN, W.; VARSHNEY, R. K. Assessment of proline function in higher plants under extreme temperatures. **Plant Biology**, Chichester, v. 25, n. 3, p. 379–395, 2023.

RIDOLFI, M.; GARREC, J.-P. Consequences of an excess Al and a deficiency in Ca and Mg for stomatal functioning and net carbon assimilation of beech leaves. **Annals of Forest Science**, London, v. 57, n. 3, p. 209–218, mar. 2000.

ROELFSEMA, M. R. G.; HEDRICH, R. In the light of stomatal opening: new insights into ‘the Watergate’. **New Phytologist**, Chichester, v. 167, n. 3, p. 665–691, 2005.

RUCIŃSKA-SOBKOWIAK, R. Water relations in plants subjected to heavy metal stresses. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 38, n. 11, p. 257, 11 out. 2016.

RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. The convergent evolution of aluminium resistance in plants exploits a convenient currency. **Functional Plant Biology**, Clayton, v. 37, n. 4, p. 275–284, mar. 2010.

SADE, H.; MERIGA, B.; SURAPU, V.; GADI, J.; SUNITA, M. S. L.; SURAVAJHALA, P.; KAVI KISHOR, P. B. Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to acid soils. **BioMetals**, Dordrecht, v. 29, n. 2, p. 187–210, abr. 2016.

SÁEZ, P. L.; BRAVO, L. A.; CAVIERES, L. A.; VALLEJOS, V.; SANHUEZA, C.; FONT-CARRASCOSA, M.; GIL-PELEGRÍN, E.; JAVIER PEGUERO-PINA, J.; GALMÉS, J. Photosynthetic limitations in two Antarctic vascular plants: importance of leaf anatomical traits and Rubisco kinetic parameters. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 68, n. 11, p. 2871–2883, 17 maio 2017.

SAKAI, W. S. Simple Method for Differential Staining of Paraffin Embedded Plant Material Using Toluidine Blue O. **Stain Technology**, Abingdon, v. 48, n. 5, p. 247–249, 1 jan. 1973.

SASAKI, T.; YAMAMOTO, Y.; EZAKI, B.; KATSUHARA, M.; AHN, S. J.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; MATSUMOTO, H. A wheat gene encoding an aluminum-activated malate transporter. **The Plant Journal**, Chichester, v. 37, n. 5, p. 645–653, 2004.

SHARMA, V.; YADAV, M.; KUMARI, N. Aluminium Fluoride induced changes in chlorophyll a fluorescence, antioxidants and psb A gene expression of Brassica juncea cultivars. **Journal of Plant Interactions**, Abingdon, v. 13, n. 1, p. 472–482, jan. 2018.

SHETTY, R.; VIDYA, C. S.-N.; PRAKASH, N. B.; LUX, A.; VACULÍK, M. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 765, p. 142744, abr. 2021.

SHI, G.; CAI, Q. Plasticidade foliar em amendoim (*Arachis hypogaea* L.) em resposta ao estresse por metais pesados. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 112–117, 1 nov. 2009.

SILVA, C. M. S.; ZHANG, C.; HABERMANN, G.; DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Does the major aluminium-resistance gene in wheat, TaALMT1, also confer tolerance to alkaline soils? **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 424, n. 1, p. 451–462, mar. 2018.

SILVA, S.; PINTO, G.; DIAS, M. C.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; PINTO-CARNIDE, O.; SANTOS, C. Aluminium long-term stress differently affects photosynthesis in rye genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 54, p. 105–112, maio 2012.

SILVA, T.; MACÊDO, G.; SOARES, N.; FONSECA, M.; LACERDA, G.; VELOSO, M. D. D.; REIS, A.; PIMENTA, M.; ARRUDAS, S. Phytoremediation Potential of Crotalaria juncea Plants in Lead-Contaminated Soils. **Journal of Agricultural Science**, Beaver Creek, v. 13, p. 27, nov. 2021.

SILVA, V. N. DA; ROSALEM, P. F.; ARAUJO, M. A. DE; FERREIRA, T. C.; MARTINS, A. R.; CAMARGOS, L. S. DE. Anatomical changes caused by boron in Calopogonium mucunoides Desv. **Brazilian Journal of Botany**, São Paulo, v. 46, n. 1, p. 127–137, 1 mar. 2023.

SINGH, SHWETA; TRIPATHI, D. K.; SINGH, SWATI; SHARMA, S.; DUBEY, N. K.; CHAUHAN, D. K.; VACULÍK, M. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 137, p. 177–193, maio 2017.

SOUSA, D. M. G. DE; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. [*S. l.*] Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004., 2004.

SULIEMAN, S.; HA, C. V.; SCHULZE, J.; TRAN, L.-S. P. Growth and nodulation of symbiotic Medicago truncatula at different levels of phosphorus availability. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 64, n. 10, p. 2701–2712, 1 jul. 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fundamentos de fisiologia vegetal.** 6. ed. Artmed Editora, 2021.

TAKAGI, H. *et al.* Allantoin, a stress-related purine metabolite, can activate jasmonate signaling in a MYC2-regulated and abscisic acid-dependent manner. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 67, n. 8, p. 2519–2532, abr. 2016.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.; PAULO CESAR TEIXEIRA, C. G. K. D. **Manual de métodos de análise de solo.** Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TOLRÀ, R.; VOGEL-MIKUŠ, K.; HAJIBOLAND, R.; KUMP, P.; PONGRAC, P.; KAULICH, B.; GIANONCELLI, A.; BABIN, V.; BARCELÓ, J.; REGVAR, M.; POSCHENRIEDER, C. Localization of aluminium in tea (Camellia sinensis) leaves using low energy X-ray fluorescence spectro-microscopy. **Journal of Plant Research**, Tokyo, v. 124, n. 1, p. 165–172, jan. 2011.

TOMINAGA, J.; SHIMADA, H.; KAWAMITSU, Y. Direct measurement of intercellular CO2 concentration in a gas-exchange system resolves overestimation using the standard method. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 69, n. 8, p. 1981–1991, abr. 2018.

TRVEDI, S.; ERDEI, L. Effects of cadmium and lead on the accumulation of Ca2+ and K+ and on the influx and translocation of K+ in wheat of low and high K+ status. **Physiologia Plantarum**, Hoboken, v. 84, n. 1, p. 94–100, 1992.

TUZET, A.; PERRIER, A.; LEUNING, R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. **Plant, Cell & Environment**, Chichester, v. 26, n. 7, p. 1097–1116, 2003.

URAGUCHI, S.; WATANABE, I.; YOSHITOMI, A.; KIYONO, M.; KUNO, K. Characteristics of cadmium accumulation and tolerance in novel Cd-accumulating crops, Avena strigosa and Crotalaria juncea. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 12, p. 2955–2965, set. 2006.

VACULÍK, M.; KONLECHNER, C.; LANGER, I.; ADLASSNIG, W.; PUSCHENREITER, M.; LUX, A.; HAUSER, M.-T. Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 163, p. 117–126, 1 abr. 2012.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Chichester, v. 157, n. 3, p. 423–447, 2003.

VITORELLO, V. A.; CAPALDI, F. R.; STEFANUTO, V. A. Recent advances in aluminum toxicity and resistance in higher plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 17, p. 129–143, mar. 2005.

VOGELS, G. D.; VAN DER DRIFT, C. Differential analyses of glyoxylate derivatives. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 33, n. 1, p. 143–157, 1 jan. 1970.

WANDER, A. E.; CUNHA, C. A. DA. Locais de concentração de atividades agropecuárias na região centro-oeste. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Brasília, DF, v. 12, n. 25, ago. 2016.

WANG, X.; WANG, Z.; ZHENG, Z.; DONG, J.; SONG, L.; SUI, L.; NUSSAUME, L.; DESNOS, T.; LIU, D. Genetic Dissection of Fe-Dependent Signaling in Root Developmental Responses to Phosphate Deficiency. **Plant Physiology**, Rockville, v. 179, n. 1, p. 300–316, jan. 2019.

WATANABE, S.; MATSUMOTO, M.; HAKOMORI, Y.; TAKAGI, H.; SHIMADA, H.; SAKAMOTO, A. The purine metabolite allantoin enhances abiotic stress tolerance through synergistic activation of abscisic acid metabolism. **Plant, Cell & Environment**, Chichester, v. 37, n. 4, p. 1022–1036, 2014.

WELLBURN, A. R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 144, n. 3, p. 307–313, set. 1994.

YAMAMOTO, Y. Aluminum toxicity in plant cells: Mechanisms of cell death and inhibition of cell elongation. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 65, n. 1, p. 41–55, jan. 2019.

YAN, L.; RIAZ, M.; LIU, J.; YU, M.; CUNCANG, J. The aluminum tolerance and detoxification mechanisms in plants; recent advances and prospects. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, New York, v. 52, n. 9, p. 1491–1527, maio 2022.

YAN, L.; RIAZ, M.; WU, X.; DU, C.; LIU, Y.; JIANG, C. Ameliorative effects of boron on aluminum induced variations of cell wall cellulose and pectin components in trifoliate orange (Poncirus trifoliate (L.) Raf.) rootstock. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 240, p. 764–774, set. 2018.

YANG, J.; FAN, W.; ZHENG, S. Mechanisms and regulation of aluminum-induced secretion of organic acid anions from plant roots. **Journal of Zhejiang University-Science B**, Zhejiang, v. 20, n. 6, p. 513–527, jun. 2019.

YARADUA, S.; ALZAHRANI, D.; BELLO, A. Phylogenetic position of west African species of the genus Crotalaria L. (Crotalarieae, Fabaceae) based on the current infrageneric classification. **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 51, 10 abr. 2019.

YEMM, E. W.; COCKING, E. C.; RICKETTS, R. E. The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst**, v. 80, n. 948, p. 209–214, jan. 1955.

ZAIA, M.; TIMPONE, L. T.; HABERMANN, G. Do aluminum (Al)-accumulating species from the Brazilian savanna accumulate Al in the roots? **Trees**, Heidelberg, v. 36, n. 5, p. 1677–1685, out. 2022.

ZHANG, L.; WU, X.-X.; WANG, J.; QI, C.; WANG, X.; WANG, G.; LI, M.; LI, X.; GUO, Y.-D. BoALMT1, an Al-Induced Malate Transporter in Cabbage, Enhances Aluminum Tolerance in Arabidopsis thaliana. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, 2018.

ZHANG, X.-B.; LIU, P.; YANG, Y. S.; XU, G.-D. Effect of Al in soil on photosynthesis and related morphological and physiological characteristics of two soybean genotypes. **Botanical Studies**, Heidelberg, v. 48, p. 435-444, 2007.

ZHU, C. Q.; ZHANG, J. H.; SUN, L. M.; ZHU, L. F.; ABLIZ, B.; HU, W. J.; ZHONG, C.; BAI, Z. G.; SAJID, H.; CAO, X. C.; JIN, Q. Y. Hydrogen Sulfide Alleviates Aluminum Toxicity via Decreasing Apoplast and Symplast Al Contents in Rice. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 9, 2018.