UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
***CAMPUS* CERRO LARGO**
CURSO DE AGRONOMIA

MATHEUS VINÍCIUS MINUZI

EFEITO DA COMBINAÇÃO DE ALUMÍNIO E SUFALTO DE CÁLCIO NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DE CULTIVARES DE SOJA

CERRO LARGO
2025

MATHEUS VINÍCIUS MINUZI

EFEITO DA COMBINAÇÃO DE ALUMÍNIO E SUFALTO DE CÁLCIO NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DE CULTIVARES DE SOJA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Renan Costa Beber Vieira

Coorientador: Prof. Dr. Sidinei Zwick Radons

CERRO LARGO

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Minuzi, Matheus Vinícius
Efeito da combinação de alumínio e sulfato de cálcio na germinação e crescimento inicial de cultivares de soja / Matheus Vinícius Minuzi. -- 2025.
64 f.:il.

Orientador: Prof. Dr Renan Costa Beber Vieira
Co-orientador: Prof. Dr Sidinei Zwick Radons
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Agronomia, Cerro Largo,RS, 2025.

1. Alumínio. 2. Glycine max. 3. Acidez. 4. Genótipo. I. Vieira, Renan Costa Beber, orient. II. Radons, Sidinei Zwick, co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

MATHEUS VINÍCIUS MINUZI

EFEITO DA COMBINAÇÃO DE ALUMÍNIO E SUFALTO DE CÁLCIO NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DE CULTIVARES DE SOJA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 24/11/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
RENAN COSTA BEBER VIEIRA
Data: 12/12/2025 15:38:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Renan Costa Beber Vieira – UFFS
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br
SIDINEI ZWICK RADONS
Data: 12/12/2025 14:51:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Sidinei Zwick Radons – UFFS
Avaliador

Documento assinado digitalmente
gov.br
RAISSA SCHWALBERT
Data: 12/12/2025 15:12:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. Raíssa Schwalbert– UFFS
Avaliadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por sempre estar comigo nos momentos difíceis, ter me dado força para chegar até aqui e alcançar mais um objetivo em minha vida: a conclusão da minha graduação em Agronomia.

Aos meus pais Jair e Lorivane e meu irmão Gabriel, pelo apoio e incentivo prestados durante esta jornada acadêmica.

À minha namorada Jaqueline Schumacher por sempre estar do meu lado, pela paciência e compreensão nos momentos em que eu não pude estar presente, por me apoiar em todas as minhas decisões, ser essa pessoa especial em minha vida, que ilumina meus dias.

Aos meus amigos Felipe Heckler, Felipe Bordin, Eduardo Machado Ahmad, Adolfo Kuhn, Alessandro Berté Alves, Alan Lima, Murilo Netto, Guilherme Costa, Guilherme Bueno, João Pedro Schlotefeldt, Débora Melchior e todos os demais, agradeço por todo o auxílio e companheirismo prestado durante todo período de faculdade, vocês tornaram o dia a dia acadêmico melhor e muito mais leve.

A Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Cerro Largo, deixo uma palavra de gratidão por ter me proporcionado dias de aprendizagem.

Ao meu orientador, Renan Costa Beber Vieira, e meu coorientador Sidinei Zwick Radons - profissionais exemplares, por terem me permitido ser seu orientando, pela dedicação e confiança de ambos durante este trabalho acadêmico.

A banca, formada pelos professores Sidinei Zwick Radons e Raíssa Schwalbert pela participação e leitura do meu Trabalho de Conclusão de Curso. É um privilégio imenso tê-los como avaliadores na minha banca.

Por fim, agradeço a todos que de uma ou de outra forma contribuíram para a conclusão de mais uma etapa em minha vida.

RESUMO

A acidez do solo é um dos principais fatores limitantes para a cultura da soja no Brasil, pois favorece a solubilização de Al^{3+} na solução, com efeitos tóxicos sobre o crescimento radicular. O cálcio (Ca^{2+}) pode atenuar essa toxidez ao participar da estabilidade de membranas e da integridade da parede celular. Nesse contexto, objetivou-se avaliar o efeito de doses de alumínio, na presença e ausência de cálcio, sobre a germinação e o crescimento inicial de plântulas de soja das cultivares Fibra IPRO 64I61 RSF e DonMario 59IX61 RSF I2X. O estudo foi conduzido em laboratório, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro doses de alumínio e dois níveis de cálcio, avaliando-se germinação, índice de velocidade de germinação e variáveis de crescimento de parte aérea e raízes em testes conduzidos em rolo de papel e em tubos Falcon. Os resultados mostraram que a germinação e o índice de velocidade de germinação mantiveram-se elevados em todas as combinações de tratamentos, indicando baixa sensibilidade da fase germinativa às concentrações de alumínio testadas. Por outro lado, o alumínio diminuiu de forma consistente o comprimento de raízes, sobretudo na ausência de cálcio em ambas as cultivares. O cálcio atenuou parcialmente essa diminuição, e a cultivar DonMario manteve comprimentos radiculares ligeiramente superiores em algumas doses, sugerindo maior estabilidade frente ao estresse em comparação à cultivar Fibra. Conclui-se que o alumínio afetou principalmente o crescimento radicular, que o cálcio exerceu efeito mitigador importante e que a resposta ao estresse depende, em parte, da cultivar utilizada.

Palavras-chave: *Glycine max*; toxidez por alumínio; calagem; raízes; tolerância.

ABSTRACT

Soil acidity is one of the main limiting factors for soybean cultivation in Brazil, as it promotes the solubilization of Al^{3+} in the soil solution, causing toxic effects on root growth. Calcium (Ca^{2+}) can attenuate this toxicity by contributing to membrane stability and cell wall integrity. In this context, this study aimed to evaluate the effect of aluminum doses, in the presence and absence of calcium, on the germination and early growth of soybean seedlings of the cultivars Fibra IPRO 64I61 RSF and DonMario 59IX61 RSF I2X. The experiment was conducted under laboratory conditions in a completely randomized design, with four aluminum doses and two calcium levels. Germination, germination speed index, and shoot and root growth variables were evaluated in tests carried out using paper rolls and Falcon tubes. The results showed that germination and germination speed index remained high across all treatment combinations, indicating low sensitivity of the germination phase to the aluminum concentrations tested. In contrast, aluminum consistently reduced root length, especially in the absence of calcium, in both cultivars. Calcium partially mitigated this reduction, and the cultivar DonMario maintained slightly greater root lengths at some doses, suggesting greater stability under stress compared with the cultivar Fibra. It is concluded that aluminum mainly affected root growth, that calcium exerted an important mitigating effect, and that the response to stress depends, in part, on the cultivar used.

Keywords: *Glycine max*; aluminum toxicity; liming; roots; tolerance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Comprimento da parte aérea (mm) de plântulas de soja submetidas a diferentes doses de alumínio, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 44
Figura 2- Comprimento da parte radicular (mm) de plântulas de soja submetidas a diferentes doses de alumínio, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 45
Figura 3- Comprimento médio de raiz de plântulas de soja (mm), em função da presença ou ausência de sulfato de cálcio, na dose de 0 µmol L^{-1} de alumínio, avaliado em tubos Falcon. Cerro Largo, 2025.....50
Figura 4- Comprimento médio de raiz de plântulas de soja (mm), em função da presença ou ausência de sulfato de cálcio, na dose de 25 µmol L^{-1} de alumínio, avaliado em tubos Falcon. Cerro Largo, 2025.....51
Figura 5- Comprimento médio de raiz de plântulas de soja (mm), em função da presença ou ausência de sulfato de cálcio, na dose de 75 µmol L^{-1} de alumínio, avaliado em tubos Falcon. Cerro Largo, 2025.....52
Figura 6- Comprimento médio de raiz de plântulas de soja (mm), em função da presença ou ausência de sulfato de cálcio, na dose de 200 µmol L^{-1} de alumínio, avaliado em tubos Falcon. Cerro Largo, 2025.....53
Figura 7- Regressão exponencial do comprimento de raiz da cultivar Fibra IPRO 64I61 RSF em função de doses de alumínio, na ausência de sulfato de cálcio, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 54
Figura 8- Regressão exponencial do comprimento de raiz da cultivar DonMario 59IX61 RSF I2X em função de doses de alumínio, na ausência de sulfato de cálcio, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores de p- valor da ANOVA para IVG, germinação, comprimento de raiz, comprimento de parte aérea e massa seca de raiz e de parte aérea de plântulas de soja submetidas a diferentes doses de alumínio, na presença ou ausência de sulfato de cálcio, em duas cultivares, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 37
Tabela 2- Médias de germinação do 5º e 8º dias (%) de duas cultivares de soja em função das doses de alumínio e presença ou ausência de sulfato de cálcio (S.cálcio), em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 40
Tabela 3- Índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de duas cultivares de soja submetidas a diferentes doses de alumínio e presença ou ausência de sulfato de cálcio (S.cálcio), em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 41
Tabela 4- Médias gerais do comprimento da parte aérea (CA) e parte radicular (CR) em mm de plântulas de soja em função dos fatores sulfato de cálcio (S.cálcio) e cultivar, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 42
Tabela 5- Médias da massa seca de parte aérea e massa seca de raiz (mg) de plântulas de soja em função de doses de alumínio, presença ou ausência de sulfato de cálcio (S.cálcio) e cultivares, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 46
Tabela 6- Comprimento médio de raízes (mm) de plântulas de duas cultivares de soja, em função de doses de alumínio em solução e da presença ou ausência de sulfato de cálcio (S.cálcio), em ensaio conduzido em tubos Falcon, sob DIC. Cerro Largo, 2025. 49
Tabela 7- Coeficientes da regressão exponencial, significância dos coeficientes e significância do modelo via ANOVA do desdobramento, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025. 53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 OBJETIVOS 13
2.1 OBJETIVO GERAL 13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13
3 REVISÃO DE LITERATURA 14
3.1 A SOJA NO CONTEXTO AGRÍCOLA BRASILEIRO: IMPORTÂNCIA, EVOLUÇÃO E IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS PARA O AGRONEGÓCIO 14
3.2 GERMINAÇÃO E ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA SOJA 16
3.3 IMPACTOS DA TOXIDEZ DE ALUMÍNIO NO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE SOJA 18
3.4 GERMINAÇÃO E DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA SOB EFEITO DA TOXIDEZ DE ALUMÍNIO 22
3.5 INFLUÊNCIA DE SULFATO DE CÁLCIO E ENXOFRE NA GERMINAÇÃO E NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA SOB ESTRESSE DE ALUMÍNIO 24
3.6 PAPEL DO SULFATO DE CÁLCIO COMO MITIGADOR DOS EFEITOS TÓXICOS DO ALUMÍNIO NA GERMINAÇÃO E DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA 27
4 MATERIAIS E MÉTODOS 31
4.1 DESCRIÇÃO DAS CULTIVARES UTILIZADAS 31
4.2 SOLUÇÕES UTILIZADAS E SEU PREPARO 32
4.2.1 Cálculo da massa dos sais 33
4.3 EXPERIMENTO 1: AVALIAÇÃO DA GERMINAÇÃO E DO VIGOR DE DIFERENTES CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDAS A DOSES DE ALUMÍNIO, COM E SEM CÁLCIO, PELO MÉTODO DO ROLO DE PAPEL 34
4.3.1 Avaliação do percentual de germinação 34
4.3.2 Avaliação do índice de velocidade de germinação (IVG) 35
4.4 EXPERIMENTO 2 : AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO RADICULAR DE DIFERENTES CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDAS A DOSES DE ALUMÍNIO, COM E SEM CÁLCIO, EM TUBOS FALCON 36
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA 36

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
5.1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 1: GERMINAÇÃO E VIGOR DE SEMENTES DE SOJA SOB DOSES DE ALUMÍNIO, COM E SEM SULFATO DE CÁLCIO, PELO MÉTODO DO ROLO DE PAPEL 37
5.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 2: CRESCIMENTO RADICULAR DE PLÂNTULAS DE SOJA SOB DOSES DE ALUMÍNIO, COM E SEM CÁLCIO, EM TUBOS FALCON 48
6 CONCLUSÃO 57
REFERÊNCIAS 58

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max L.*) possui grande relevância econômica e nutricional devido ao seu alto teor proteico, sendo essencial na alimentação humana e animal, além de matéria-prima para diversas indústrias como óleo vegetal, biodiesel e alimentos processados. A cultura também apresenta ampla adaptabilidade climática, o que permite seu cultivo em diferentes regiões, contribuindo significativamente para a segurança alimentar global e movimentando grandes volumes financeiros (WWF, 2014).

Apesar de sua ampla adaptabilidade, a cultura da soja enfrenta limitações relacionadas às condições químicas do solo, com destaque para a acidez. Em solos com pH inferior a 5,5, condição comum em extensas áreas agrícolas brasileiras, ocorre a solubilização do alumínio na forma trivalente (Al^{3+}), altamente tóxica para as plantas. A toxidez por alumínio afeta principalmente o sistema radicular, inibindo a divisão e o alongamento celular nas regiões meristemáticas, o que resulta em raízes curtas, espessas e pouco ramificadas. Esse comprometimento do crescimento radicular limita a absorção de água e nutrientes, reduzindo o crescimento inicial e o potencial produtivo das plantas (Kochian *et al*., 2015).

Mesmo com a utilização da calagem para correção da acidez na camada superficial (0-20 cm), a correção em camadas mais profundas é limitada, restringindo o desenvolvimento das raízes em profundidade. Essa situação dificulta o acesso das plantas à água e aos nutrientes disponíveis nas camadas inferiores do solo, especialmente em períodos de estiagem (Miguel *et al*., 2010).

Além disso, a presença do alumínio tóxico afeta diretamente a estrutura celular das raízes, reduzindo a elongação radicular e causando a morte de células nas extremidades das raízes jovens. Este dano limita drasticamente o crescimento radicular, influenciando negativamente a capacidade da planta de explorar o solo em busca de água e nutrientes, afetando a produtividade de forma significativa (Ferreira; Moreira; Rassini, 2006).

Neste contexto, estratégias como o melhoramento genético para tolerância ao alumínio têm sido amplamente utilizadas, já que há grande variabilidade entre cultivares quanto à resistência ao alumínio tóxico. Selecionar genótipos tolerantes garante produtividade mesmo em ambientes adversos, representando uma alternativa eficaz e econômica (Ferreira; Moreira; Rassini, 2006).

Outra estratégia complementar é a aplicação do gesso agrícola, que fornece cálcio às camadas subsuperficiais do solo, reduzindo a toxicidade do alumínio em profundidade. O gesso agrícola altera a dinâmica do solo, melhorando sua estrutura física, promovendo o crescimento radicular mais profundo e aumentando a disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo e potássio (Miguel *et al*., 2010).

O uso do gesso agrícola permite não apenas a redução dos efeitos tóxicos do alumínio, mas também promove melhorias na fertilidade química do solo e na capacidade de retenção hídrica, essenciais para sustentar a produtividade da soja em regiões onde períodos de seca são frequentes. Compreender detalhadamente essas mudanças físico-químicas no solo devido à aplicação do gesso contribui para estratégias mais eficazes no manejo sustentável dos solos agrícolas.

Diante desse contexto, é de fundamental importância avaliar como diferentes cultivares de soja respondem à toxidez causada pelo alumínio e como a presença do cálcio, fornecido por meio do gesso agrícola, pode amenizar esses efeitos adversos. Compreender a interação entre cálcio e alumínio no solo, além dos mecanismos fisiológicos envolvidos na tolerância à acidez e toxidez por alumínio, possibilitará o desenvolvimento de estratégias eficazes para garantir maior produtividade agrícola em solos ácidos (Miguel *et al*., 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito do alumínio em combinação com sulfato de cálcio na germinação e crescimento inicial de cultivares de soja, considerando a influência do genótipo e visando identificar estratégias que promovam maior tolerância das plantas à acidez do solo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a taxa de germinação de sementes de cultivares de soja expostas a soluções com alumínio, na presença e ausência de sulfato de cálcio.
- Avaliar o crescimento inicial das plântulas de soja submetidas a diferentes condições de exposição ao alumínio e sulfato de cálcio.
- Analisar a interação entre doses de alumínio e a presença de sulfato de cálcio sobre o crescimento inicial de cultivares de soja, comparando o comportamento de genótipos com diferentes níveis de tolerância à toxidez por alumínio.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A SOJA NO CONTEXTO AGRÍCOLA BRASILEIRO: IMPORTÂNCIA, EVOLUÇÃO E IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS PARA O AGRONEGÓCIO

Em meados do século XIX, surgiram no Brasil os primeiros registros do cultivo de soja, inicialmente apenas com finalidade experimental; porém, o marco efetivo desse processo ocorreu em 1901, quando os primeiros testes de plantio foram realizados na Estação Agropecuária de Campinas, permitindo que produtores paulistas tivessem acesso às sementes, cuja disponibilidade aumentou ainda mais com a imigração japonesa em 1908, período em que a soja era utilizada predominantemente como forrageira, destinada à alimentação animal e não à produção de grãos para farelo e óleo como atualmente (Dall'Agnol, 2011, p. 1). A cultura expandiu-se para o Rio Grande do Sul em 1914, onde encontrou condições climáticas semelhantes às regiões produtoras dos Estados Unidos, e, a partir da década de 1970, passou por intenso crescimento, tornando-se a principal cultura do agronegócio brasileiro, impulsionada pela expansão das indústrias de óleo, pela introdução do plantio direto e pelo desenvolvimento tecnológico que favoreceu a adaptação dos cultivares às condições ambientais do país (Dall'Agnol, 2011, p. 1- 2).

A soja é uma planta de extrema importância para o agronegócio, pois apresenta crescimento rápido e elevado valor nutricional, destacando-se pelo alto teor de proteínas, característica amplamente reconhecida por Sediyama, Silva e Borém (2015). Ela gera mais proteína por hectare do que muitas outras culturas, sendo, portanto, uma das espécies mais eficientes nesse aspecto, como apontam Roessing, Sena e Lazzarotto (2005). Adaptável a diferentes climas, pode ser cultivada em diversas regiões do mundo, o que a torna uma importante aliada no combate à fome e na promoção da segurança alimentar global, conforme destaca a FAO (2019). Além de servir como alimento humano, é a principal base da ração animal em escala mundial, sustentando o setor pecuário e a produção de proteína de origem animal em diversos continentes (EMBRAPA, 2022). Por essa ampla utilização, a soja é considerada uma commodity de grande valor no mercado internacional. Sua comercialização movimenta bilhões de dólares e fortalece as relações comerciais entre diversos países, sendo o Brasil um dos líderes globais na exportação desse grão (Gomes, 2023). A exportação da soja traz benefícios econômicos significativos para

os países produtores e reforça sua relevância estratégica. Com isso, a planta exerce papel fundamental na segurança alimentar e na economia mundial. Sua importância ultrapassa os campos agrícolas e impacta diretamente o comércio global (WWF, 2014, p. 14).

Para tanto, a produção e a expansão da soja possuem uma grande importância econômica não só para o Brasil, mas uma importância econômica global, desde a ração animal até o fornecimento de combustíveis, gerando empregos para inúmeras pessoas que estão de forma direta ou indireta ligadas ao cultivo da soja, contribuindo para a economia local, regional e até mesmo federal, possibilitando o crescimento dos países. De acordo com Amélio Dall'Agnol (2011, p. 3) a soja teve papel central no desenvolvimento da agricultura comercial no Brasil, inicialmente contando com o suporte do trigo. Ela foi determinante para impulsionar a mecanização das lavouras, modernizar os sistemas de transporte e ampliar as fronteiras agrícolas. Além disso, contribuiu para a profissionalização e crescimento do comércio exterior, influenciou positivamente a alimentação da população, estimulou a urbanização e promoveu a ocupação de áreas interiores do país, que antes estavam mais concentradas nas regiões Sul, Sudeste e no litoral do Nordeste. A cultura também fomentou o avanço tecnológico em outras lavouras, especialmente o milho, e ajudou a descentralizar a agroindústria nacional, fortalecendo a produção de suínos e aves no Centro-Oeste, nova fronteira agrícola do Brasil.

Seguindo nesse contexto, a soja é a peça central para o agronegócio brasileiro e mundial, gerando impactos profundos em diversas áreas, como na economia, social, meio ambiente e tecnologia. No Brasil, a produção atingiu cerca de 169,5 milhões de toneladas na safra 2024/25, consolidando o país como maior produtor mundial de soja e um dos principais exportadores globais (EMBRAPA, 2025). Alguns dos impactos da soja para o crescimento do país são a geração de empregos e renda para diversas famílias brasileiras, empregando produtores, transportadores, processadores e exportadores; estima-se que a cadeia da soja responda por aproximadamente 2,5 milhões de empregos e cerca de 6% do PIB do agronegócio nacional.

Diante desse cenário, o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de soja, e o complexo soja (grão, farelo e óleo) respondeu por cerca de 40% do valor das exportações do agronegócio em 2023, reforçando sua relevância na balança comercial (CEPEA, 2024). A oleaginosa é um dos principais itens da pauta de exportação, especialmente para China, Europa e países asiáticos. Com a

expansão da soja impulsiona o mercado de fertilizantes, sementes melhoradas, defensivos agrícolas e máquinas agrícolas de alta tecnologia. A produção de soja movimenta cooperativas, agropecuárias e indústrias de esmagamento, que produzem óleo e farelo de soja. (WWF, 2014, p.14-15).

3.2 GERMINAÇÃO E ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA SOJA

A palavra “germinar” tem origem no latim *germinare*, que significa “brotar”, “começar a crescer”. Esse termo deriva de *germen*, que significa “broto”, “semente”, “origem”. Etimologicamente, germinar carrega a ideia de início da vida vegetal, ou seja, o momento em que a semente dá início ao desenvolvimento de uma nova planta. A germinação é essencial para o ciclo de vida das plantas e para a produção agrícola. (Origem da Palavra, 2011).

Nesse contexto, devemos destacar algumas diferenças existentes entre sementes e grãos. Embora ambos possam germinar, a semente passa por um rigoroso controle de qualidade (genético, físico, fisiológico e sanitário), o que garante alto desempenho no campo. Já o grão, mesmo podendo germinar, não possui todos esses atributos e, por isso, seu uso pode comprometer a produtividade e o sucesso econômico da lavoura. A semente de soja de alta qualidade é aquela que apresenta vigor, germinação, sanidade e purezas física e genética elevadas, além de estar livre de sementes de plantas daninhas, fatores que garantem o bom estabelecimento da lavoura e altos níveis de produtividade. (Krzyzanowski, 2004).

Assim, a pureza genética de uma semente é essencial para que a cultivar (variedade escolhida) consiga manifestar todo o seu potencial agronômico. Quando a semente é geneticamente modificada, ela apresenta características boas e importantes, como a capacidade de produzir bem, possui resistência contra doenças, o tipo de grão tem cor, tamanho e formato favoráveis para a semeadura, e também outro fator que deve ser frisado é em relação as qualidades organolépticas, que estão relacionadas ao aroma, textura e sabor da semente de soja. Quando não há pureza genética, todos esses fatores podem ser perdidos, prejudicando a qualidade de desempenho da lavoura. (Krzyzanowski; França-Neto; Henning; 2018, p. 2-3).

A caracterização dos estádios de desenvolvimento da planta de soja é essencial para a descrição dos vários períodos que a lavoura atravessa durante o ciclo da cultura do plantio da soja. O sistema proposto por Fehr e Caviness (1977) divide

os estádios de desenvolvimento de soja em estádios vegetativos e estádios reprodutivos. Os estádios vegetativos são designados pela letra V e os reprodutivos pela letra R. Para tanto, os estádios vegetativos compreendem desde a emergência da plântula até a completa formação da estrutura vegetativa, incluindo o número de nós com folhas completamente desenvolvidas no caule principal.

Segundo Neumaier *et al*. (2000, p. 23), a definição dos estádios vegetativos da soja, a partir do estádio VC, baseia-se na identificação do último nó da haste que apresenta uma folha completamente desenvolvida. O nó, por ser uma estrutura permanente na haste, ao contrário das folhas, que são temporárias e podem se desprender, é utilizado como referência na classificação dos estádios. Os nós cotiledonares, que são opostos na haste e contêm ou continham os cotilédones, não são considerados na contagem a partir do estádio V1, pois não possuem folhas verdadeiras.

O bom desempenho das folhas jovens da soja se dá com a transformação de seus folíolos. No início, esses folíolos têm a aparência de pequenos cilindros enrolados. Com o desenvolvimento e crescimento, eles se desenrolam gradativamente, abrindo-se até que suas bordas se afastem por completo. Essa etapa marca o amadurecimento da folha. Uma folha é considerada totalmente desenvolvida quando seus folíolos já estão completamente abertos, enquanto os folíolos da folha logo acima dela ainda não se encostam. Isso mostra que a folha analisada já terminou de crescer, enquanto a folha superior ainda está em desenvolvimento. Esse critério é utilizado para padronizar a avaliação do estágio de desenvolvimento foliar. Da mesma forma, a folha mais alta (apical) é considerada completamente formada quando seus folíolos já estão abertos, semelhantes às folhas mais velhas abaixo dela. Isso permite identificar visualmente o avanço do crescimento vegetativo da planta. (Neumaier *et al*, 2000, p.24).

Conforme os autores (Moseley *et al*, 2025), no estádio VE, a planta de soja é considerada emergida quando os cotilédones ultrapassam a superfície do solo e ficam visíveis acima do terreno. Esse momento marca o início da fase vegetativa: o hipocótilo se alonga, puxa os cotilédones para fora do solo e, a partir daí, a plântula começa a se estabelecer no campo. Nessa etapa, porém, ela ainda depende principalmente das reservas da semente para sustentar o crescimento inicial da parte aérea e das raízes, já que as primeiras folhas verdadeiras ainda não estão plenamente ativas em termos de fotossíntese.

3.3 IMPACTOS DA TOXIDEZ DE ALUMÍNIO NO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE SOJA

O alumínio está entre os 3 metais considerados mais presentes na crosta terrestre (juntamente com o cálcio e o ferro) e abundante nos solos porque está presente na maioria das rochas, na forma de aluminosilicatos (minerais compostos principalmente por Al, silício (Si) e oxigênio (O). Quando essas rochas passam pelo processo de intemperismo (ação da água e do gás carbônico), o alumínio é liberado no solo na forma trocável (Al^{3+}), que pode ser absorvida pelas plantas. O alumínio é um elemento anfótero, ou seja, ele pode se comportar como um cátion (positivo) em solos ácidos e como um ânion (negativo) em solos básicos. O pH do solo é o principal fator que determina se o alumínio estará disponível e em qual forma ele aparecerá. Em solos ácidos (pH baixo), o Al^{3+} se torna mais solúvel e, portanto, mais tóxico para as plantas. Já em pH mais alto, o alumínio se torna menos disponível e menos prejudicial. (Miguel *et al*., 2010, p.15).

A toxidez do alumínio é um dos principais fatores que prejudicam a produção agrícola nas regiões do cerrado brasileiro, que representam cerca de um quarto do território nacional. Nessas áreas, os solos, principalmente os Latossolos, são naturalmente ácidos, com baixa fertilidade e produtividade, pouca capacidade de reter nutrientes e alta concentração de alumínio em formas tóxicas para as plantas. Além disso, esses solos possuem baixos teores de fósforo, essencial para o crescimento das plantas. Nesse contexto, torna-se necessário encontrar alternativas para manter a boa produtividade. Uma das soluções possíveis para esse tipo de solo tem sido a busca de plantas mais adaptadas a essas condições, ao mesmo tempo em que se tenta melhorar a qualidade do solo. Por isso, adaptar as plantas a essas condições difíceis tem se tornado cada vez mais importante, tanto por causa do alto custo da produção de alimentos quanto pela necessidade de usar áreas com solos de baixa qualidade. (Ferreira; Moreira; Rassini, 2006, p.07).

A toxidez do alumínio afeta principalmente o crescimento radicular das plantas sensíveis, inibindo a divisão e o alongamento celular nas regiões meristemáticas das raízes. Esse comprometimento do sistema radicular impede que as raízes atinjam maiores profundidades, tornando-as predominantemente superficiais e limitando a absorção de água e nutrientes. Como consequência, as plantas tornam-se menos

produtivas e mais suscetíveis a estresses hídricos, especialmente durante períodos de estiagem.

A correção da acidez do solo, principal responsável pela solubilização do alumínio tóxico, é eficaz na camada arável de 0 a 20 cm, sendo comumente realizada por meio da calagem, que eleva o pH e promove a precipitação do alumínio em formas não tóxicas (Ernani *et al*., 2007). No entanto, nas camadas subsuperficiais do solo, especialmente entre 20 e 40 cm, a acidez permanece elevada, pois a incorporação de corretivos como o calcário é limitada pela baixa mobilidade do produto no perfil do solo (Caires *et al*., 2006). A aplicação profunda de corretivos e fertilizantes, apesar de teoricamente viável, é tecnicamente difícil e economicamente inviável na maioria dos sistemas produtivos, principalmente em áreas extensas com solos naturalmente ácidos, como os do cerrado brasileiro.

Conforme os autores Miguel *et al*. (2010, p.15), o calcário é muito utilizado na agricultura para a correção da acidez do solo, pois sua aplicação eleva o pH, aumenta os teores de cálcio e magnésio trocáveis e reduz a concentração de elementos tóxicos como o Al, Fe e Mn. Esses efeitos otimizam a disponibilidade de nutrientes essenciais como nitrogênio, enxofre e boro, promovendo maior mineralização da matéria orgânica e aumentando a eficiência do aproveitamento de adubos aplicados. Além disso, o fornecimento de cálcio e magnésio e o estímulo à atividade microbiana são fatores importantes para o desenvolvimento saudável das plantas.

No entanto, a ação corretiva do calcário restringe-se, em grande parte, às camadas superficiais do solo, em função de sua baixa solubilidade, o que limita sua movimentação em profundidade. Essa limitação compromete o crescimento do sistema radicular, uma vez que as raízes necessitam explorar maiores volumes de solo para garantir a adequada absorção de água e nutrientes. A profundidade alcançada pela correção da acidez está diretamente relacionada à eficiência da incorporação mecânica dos corretivos, sendo que a ação do calcário é mais efetiva quando há maior alcance dos discos de arado e das grades. O gesso agrícola, por sua vez, apresenta maior solubilidade em comparação ao calcário, o que favorece sua movimentação ao longo do perfil do solo, contribuindo para a redução da atividade do alumínio em camadas subsuperficiais. Entretanto, tanto as alternativas químicas quanto as mecânicas empregadas para neutralizar a acidez trocável envolvem custos elevados e desafios técnicos, além do risco de provocar desequilíbrios nutricionais, especialmente a deficiência de micronutrientes em determinados tipos de solo. Essa

limitação torna-se ainda mais expressiva em sistemas agrícolas com baixo uso de insumos. Ressalta-se que, nos sistemas de plantio direto, a eficiência da calagem tende a ser reduzida, uma vez que não ocorre revolvimento significativo do solo; ainda assim, a presença de canais formados pela decomposição radicular e pela atividade de organismos do solo pode favorecer parcialmente a movimentação dos corretivos aplicados superficialmente (Caires *et al*., 2011; Tiecher *et al*., 2018).

Dessa forma, quanto maior o alcance e a eficiência desses equipamentos, melhor será a incorporação do calcário, promovendo uma correção mais uniforme e profunda. Além disso, o uso do gesso agrícola tem se destacado por sua capacidade de reduzir a atividade de alumínio em camadas mais profundas do solo, devido à sua maior solubilidade, o que o torna uma alternativa viável em algumas situações. O sistema de plantio direto é extremamente desafiador, onde não há revolvimento do solo com implementos, o que dificulta a incorporação dos corretivos. Apesar disso, o sistema proporciona certa vantagem ao manter canais naturais no solo, oriundos da decomposição de raízes e da atividade da macrofauna, o que favorece a movimentação de corretivos aplicados superficialmente, embora de forma limitada (Miguel *et al*., 2010, p. 17).

Diante dessas limitações, a exploração do potencial genético das plantas surge como uma alternativa estratégica promissora. Espécies, cultivares e variedades apresentam ampla variabilidade quanto à tolerância ao alumínio, o que permite a seleção de genótipos mais adaptados às condições de acidez e toxidez, independentemente do nível de tecnologia utilizado na lavoura. A adoção de cultivares tolerantes permite ganhos de produtividade mesmo sem intervenções químicas profundas, reduzindo custos e ampliando a viabilidade da produção em solos de baixa fertilidade natural (Ferreira; Moreira; Rassini, 2006, p. 08).

Diante disso, tornam-se evidentes os efeitos da toxidez por alumínio sobre o desenvolvimento das plantas, especialmente da soja. Nesse contexto, uma das principais estratégias para mitigar esses efeitos é o melhoramento genético vegetal, uma vez que diferentes genótipos de uma mesma espécie, isto é, cultivares e variedades, apresentam respostas distintas à presença de Al^{3+} no ambiente. Essas diferenças estão relacionadas à capacidade de determinadas plantas em excluir o alumínio da rizosfera ou tolerá-lo internamente por meio de mecanismos fisiológicos e bioquímicos específicos, o que lhes confere maior aptidão para o desenvolvimento radicular mesmo sob condições adversas. A seleção e o uso de genótipos

naturalmente tolerantes constituem uma estratégia vantajosa, pois independe do nível tecnológico da lavoura, podendo ser adotada tanto em sistemas de produção intensivos quanto em propriedades de menor tecnificação. Além disso, essa abordagem promove maior estabilidade produtiva em solos ácidos, reduzindo a dependência de corretivos químicos e minimizando impactos ambientais e econômicos associados ao manejo da acidez do solo (Kochian *et al*., 2015; Rangel *et al*., 2018).

Nem sempre é fácil identificar a toxidez por alumínio nas plantas, uma vez que seus efeitos podem se assemelhar aos sintomas de deficiências nutricionais, especialmente de fósforo e cálcio. Quando a planta apresenta sintomas semelhantes à deficiência de fósforo, observa-se crescimento reduzido e coloração arroxeada em colmos, folhas e nervuras. Já em situações que mimetizam deficiência de cálcio, podem ocorrer deformações em folhas jovens, enrolamento foliar e colapso do ápice vegetativo, comprometendo o crescimento da planta. Essa semelhança sintomatológica dificulta o diagnóstico visual em condições de campo, tornando necessária a realização de análises químicas do solo e da planta para a correta identificação do estresse (Bojórquez-Quintal *et al*., 2017; Rengel; Panda, 2021).

No sistema radicular, os efeitos da toxidez por alumínio são mais evidentes. As raízes afetadas tornam-se curtas, espessas e quebradiças, com baixa formação de ramificações finas. Esses danos radiculares são reconhecidos como um dos principais fatores limitantes à produção agrícola em solos ácidos, nos quais a presença de alumínio trocável ocorre em concentrações elevadas (Kochian *et al*., 2015; Liu *et al*., 2018). Como consequência, as plantas tornam-se menos vigorosas, com menor estatura e redução no número de vagens e grãos. A germinação das sementes também pode ser afetada, resultando em menor emergência e menor uniformidade de plântulas. Em solos ácidos, o alumínio solúvel interfere no metabolismo celular, especialmente nos processos de divisão e elongação celular, sendo a inibição do crescimento radicular um dos primeiros sintomas observados. Além disso, ocorrem alterações fisiológicas associadas ao aumento do estresse oxidativo e ao desequilíbrio nutricional, cujos efeitos variam conforme o genótipo, evidenciando diferenças genéticas quanto à tolerância ao alumínio em plantas de soja (Rengel; Panda, 2021; Steiner *et al*., 2021).

3.4 GERMINAÇÃO E DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA SOB EFEITO DA TOXIDEZ DE ALUMÍNIO

A germinação e o desenvolvimento inicial da soja representam fases críticas do ciclo da cultura, nas quais a planta depende exclusivamente da mobilização das reservas da semente para sustentar os primeiros eventos metabólicos. Nesse período, qualquer fator externo que comprometa a integridade celular ou o metabolismo energético influencia diretamente a emergência e o vigor inicial. Em solos ácidos, o alumínio solúvel (Al^{3+}) destaca-se como um dos principais estresses abióticos que afetam essas etapas. Kochian, Piñeros e Hoekenga (2005) descrevem que o Al^{3+} exerce seus primeiros efeitos tóxicos sobre a radícula, interferindo na divisão e elongação celular na região meristemática, o que reduz a capacidade de crescimento inicial e limita o estabelecimento da plântula.

Durante a germinação, a semente necessita ativar processos metabólicos essenciais, como a respiração celular e a mobilização de carboidratos, lipídios e proteínas. Entretanto, a presença de alumínio altera diretamente a estabilidade das membranas, provoca desorganização estrutural e aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). França, Rodrigues e Lavres Junior (2018) relatam que esse aumento do estresse oxidativo reduz a viabilidade das sementes, diminuindo a porcentagem de germinação e o vigor das plântulas. Em paralelo, Azevedo Neto *et al*. (2001) observaram que a exposição ao Al^{3+} reduz os níveis de ATP, comprometendo o suprimento energético necessário para a germinação, o que resulta em plântulas mais lentas, fracas e menos capazes de sustentar o desenvolvimento inicial.

Outro efeito relevante refere-se à interferência do alumínio na embebição, etapa que marca o início da germinação. Ao afetar a permeabilidade das membranas, o Al^{3+} pode retardar a reidratação dos tecidos embrionários, atrasando a ativação das enzimas responsáveis pela mobilização das reservas. Essa condição prejudica a expansão da radícula, que é o primeiro órgão a emergir. Vasconcelos, Furtini Neto e Faquin (2016) destacam que a interrupção do crescimento do ápice radicular é o sintoma mais imediato da toxidez, refletindo-se em raízes curtas, grossas e com baixa emissão de radicelas, o que limita o volume de solo explorado e compromete a absorção de água e nutrientes essenciais.

Essas alterações iniciais repercutem diretamente nas etapas subsequentes do desenvolvimento. Com a radícula prejudicada, a absorção de cálcio e fósforo,

nutrientes essenciais para a formação da parede celular e para os processos energéticos, torna-se limitada. Ma (2005) explica que o alumínio compete por sítios de ligação nos tecidos radiculares, reduzindo o influxo desses nutrientes e agravando o estresse fisiológico. Essa carência nutricional precoce, associada ao limitado crescimento radicular, torna a plântula menos apta a se estabelecer no campo, especialmente em condições de baixa umidade ou desequilíbrios nutricionais.

Outro aspecto fundamental é a variabilidade genética existente entre cultivares quanto à tolerância ao alumínio nas fases iniciais. Egielewa, Chiejina e Uguru (2017) demonstraram que diferentes cultivares apresentam respostas distintas na germinação e no vigor sob estresse por Al^{3+}, evidenciando que fatores genéticos influenciam diretamente o desempenho inicial. Cultivares tolerantes conseguem manter maior elongação radicular, menor desorganização celular e menor acúmulo de EROs, enquanto cultivares sensíveis apresentam forte redução no crescimento inicial e maior comprometimento da germinação. Essa variabilidade reforça a importância da escolha correta do genótipo para ambientes com acidez elevada.

Além disso, o alumínio interfere em processos regulatórios fundamentais para o desenvolvimento inicial. De acordo com Kochian, Hoekenga e Piñeros (2004), a presença de Al^{3+} provoca alterações no transporte de íons, modifica o potencial de membrana e causa reações metabólicas desordenadas, que afetam a homeostase da célula radicular. Esse conjunto de distúrbios compromete a organização estrutural da raiz e interfere na emissão das primeiras raízes laterais, aumentando o risco de falhas na emergência e reduzindo a uniformidade do estande.

Os efeitos do alumínio na germinação também envolvem alterações hormonais. Vasconcelos, Furtini Neto e Faquin (2016) destacam que o Al^{3+} pode afetar a síntese e a polaridade do transporte de auxinas, hormônios essenciais para o crescimento radicular, reduzindo ainda mais a expansão da radícula. A desregulação hormonal agrava os danos estruturais e metabólicos, dificultando a superação da fase de plântula e comprometendo o início do desenvolvimento vegetativo.

Em síntese, a toxidez de alumínio afeta a soja desde os primeiros instantes da germinação até o estabelecimento inicial da plântula. Os danos às membranas, o aumento do estresse oxidativo, a redução do ATP, a inibição da elongação radicular, as interferências nutricionais e hormonais e a desorganização estrutural da radícula convergem para um crescimento inicial significativamente reduzido. Por isso, compreender esses mecanismos é fundamental para orientar práticas de manejo

voltadas à mitigação da acidez do solo e à seleção de cultivares que apresentem maior tolerância ao alumínio nas fases iniciais, assegurando melhor emergência, vigor e desenvolvimento da cultura.

3.5 INFLUÊNCIA DE SULFATO DE CÁLCIO E ENXOFRE NA GERMINAÇÃO E NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA SOB ESTRESSE DE ALUMÍNIO

A fase de germinação e o desenvolvimento inicial da soja são altamente sensíveis a fatores químicos do solo, sendo o alumínio em sua forma trivalente (Al^{3+}) um dos principais elementos tóxicos em ambientes com acidez elevada. Em solos com pH inferior a 5,5, condição comum em grande parte das regiões produtoras, o Al^{3+} se torna solúvel e interfere negativamente nos processos fisiológicos das sementes e plântulas, especialmente no crescimento e funcionalidade do sistema radicular. O contato direto com o alumínio compromete a absorção de nutrientes e água, inibe a divisão celular nas raízes e desencadeia processos de estresse oxidativo, dificultando o estabelecimento da cultura no campo. Diante dessa limitação, destaca-se a importância de compreender os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na mitigação desse estresse, sobretudo o papel do cálcio como elemento essencial para neutralizar os efeitos tóxicos do alumínio e promover a germinação e o vigor inicial da soja (Custódio *et al*., 2002; Duressa *et al*., 2011; Liu *et al*., 2007).

Nesse contexto, o sulfato de cálcio tem se mostrado um elemento chave na atenuação dos efeitos do alumínio sobre as plantas, especialmente nas fases iniciais da germinação. Além de sua função estrutural na constituição da parede celular e estabilidade de membranas, o sulfato de cálcio atua diretamente na sinalização intracelular, regulação enzimática e manutenção do potencial de membrana. Estudos demonstram que o fornecimento de sulfato de cálcio, mesmo em concentrações moderadas, é capaz de reduzir significativamente a absorção de Al^{3+} pelas raízes, promovendo o crescimento do sistema radicular e assegurando uma germinação mais uniforme. Isso ocorre porque o sulfato de cálcio compete com o alumínio por sítios de ligação na superfície celular, reduzindo o impacto direto do metal tóxico sobre os tecidos vegetais (Yin *et al*., 2014; Liu *et al*., 2007).

Além da sua atuação competitiva frente ao alumínio, o sulfato de cálcio está diretamente relacionado à modulação de respostas antioxidantes em plântulas de soja expostas a estresse por Al^{3+}. A presença de alumínio induz a produção de espécies

reativas de oxigênio, que desencadeiam processos de peroxidação lipídica e danificam proteínas e ácidos nucleicos, levando à redução da viabilidade celular. O fornecimento de Ca^{2+} aumenta a atividade de enzimas antioxidantes como catalase, peroxidase e superóxido dismutase, protegendo os tecidos embrionários e promovendo um ambiente bioquímico mais equilibrado para a germinação e o desenvolvimento inicial. Assim, além de seu papel estrutural, o cálcio contribui para a adaptação fisiológica da planta frente ao estresse abiótico (Yin *et al*., 2014).

Outro aspecto importante está relacionado à atuação do cálcio na regulação da expressão gênica associada à tolerância ao alumínio. Segundo Duressa *et al*. (2011), a aplicação de cálcio altera o padrão de expressão de genes ligados ao transporte iônico, ao metabolismo energético e à síntese de proteínas de defesa, especialmente em cultivares de soja com maior sensibilidade ao alumínio. Essas alterações promovem maior estabilidade celular, permitindo que as plantas se adaptem mais eficientemente às condições de estresse. Portanto, a presença de sulfato de cálcio influencia não apenas processos morfofisiológicos, mas também mecanismos moleculares que definem o grau de tolerância das plantas às condições adversas do solo.

A resposta das plantas ao alumínio também depende da variabilidade genética entre os genótipos de soja. Cultivares com maior capacidade de absorção e uso eficiente do cálcio tendem a apresentar maior tolerância à toxidez por Al^{3+}, mantendo o crescimento radicular mesmo em ambientes de acidez elevada. Conforme demonstram Pires *et al*. (2013), cultivares tolerantes acumulam mais sulfato de cálcio nos tecidos e são capazes de manter a arquitetura radicular funcional sob estresse. Esses resultados evidenciam a importância de se considerar o genótipo na formulação de estratégias de manejo, buscando o uso de cultivares adaptadas a solos ácidos em conjunto com a suplementação de cálcio.

Do ponto de vista prático, o fornecimento de sulfato de cálcio pode ser realizado por meio de práticas agronômicas como a calagem e a aplicação de gesso agrícola. A calagem neutraliza o Al^{3+} por meio do aumento do pH e da elevação da saturação por bases na camada superficial do solo. Já o gesso agrícola contribui com o fornecimento de sulfato de cálcio em profundidade, favorecendo o crescimento das raízes nas camadas subsuperficiais. Ernani, Santos e Cantarella (2007) afirmam que a adoção dessas práticas, quando bem manejadas e ajustadas às características

químicas do solo, promovem condições mais favoráveis à germinação e ao desenvolvimento inicial da soja em ambientes de elevada acidez.

Nesse sentido, o sulfato de cálcio mostra-se fundamental para mitigar os efeitos tóxicos do alumínio nas fases iniciais da cultura da soja, com impactos positivos na germinação, vigor, desenvolvimento radicular e adaptação metabólica. Sua atuação ocorre de forma integrada entre processos fisiológicos, bioquímicos e moleculares, sendo potencializada pelo uso de cultivares tolerantes e por práticas de correção da acidez do solo. A adoção de estratégias que combinem o conhecimento genético das cultivares com o manejo nutricional adequado representa um caminho promissor para aumentar a resiliência da soja em ambientes naturalmente ácidos, contribuindo para sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis (Duressa *et al*., 2011; Liu *et al*., 2007; Pires *et al*., 2013; Yin *et al*., 2014; Ernani; Santos; Cantarella, 2007).

Assim, o enxofre também exerce papel fundamental na tolerância da soja ao alumínio, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento. Uma parte do enxofre absorvido pela planta é transformada em sulfeto de hidrogênio (H_2S), uma molécula sinalizadora que auxilia a raiz a ativar mecanismos de defesa contra o Al^{3+}. Em estudos conduzidos com soja, Wang *et al*. (2019) demonstraram que o H_2S reduz o acúmulo de alumínio nas pontas das raízes e estimula a liberação de citrato, um ácido orgânico que se liga ao alumínio no solo, diminuindo sua toxicidade. A liberação de citrato é reconhecida como um dos mecanismos mais importantes de defesa da soja diante do alumínio, conforme já observado por Yang *et al*. (2001).

Esse processo só é possível porque a soja possui genes específicos que controlam a saída desse citrato para o solo, principalmente GmMATE13 e GmMATE47. Esses genes atuam como transportadores localizados na membrana das células da raiz, funcionando como “portas” que liberam o citrato para a rizosfera. Quando a planta é exposta ao alumínio, esses transportadores têm sua expressão aumentada, elevando a quantidade de citrato exsudado. Pesquisas mais recentes mostram que o gene GmMATE13, em particular, apresenta forte resposta ao alumínio, sendo capaz de aumentar de forma significativa a exsudação de citrato quando superexpresso, o que resulta em menor entrada de Al^{3+} no tecido radicular e maior tolerância ao estresse (Wang *et al*., 2022; Gao *et al*., 2024). O H_2S derivado do enxofre, por sua vez, auxilia na ativação desses transportadores, reforçando esse mecanismo natural de proteção.

Além de favorecer a exclusão do alumínio da superfície radicular, o sulfato de cálcio e o enxofre também contribuem para reduzir os danos internos provocados pelo estresse. A presença de Al^{3+} aumenta a formação de espécies reativas de oxigênio, que degradam membranas e dificultam a germinação. O cálcio atua estabilizando as paredes e as membranas celulares, mantendo a integridade estrutural da raiz, enquanto o enxofre participa da formação de compostos antioxidantes que neutralizam esses radicais tóxicos, diminuindo o impacto do alumínio nos tecidos jovens. Rahman *et al*. (2018) destacam que a capacidade de controlar o estresse oxidativo é essencial para que a plântula mantenha a atividade celular e o crescimento mesmo em condições adversas.

Em termos de prática de cultivo, a disponibilidade adequada de cálcio e enxofre no solo é favorecida por práticas como a calagem e o uso de gesso agrícola. A calagem corrige a acidez da camada superficial e aumenta a saturação por bases, enquanto o gesso fornece cálcio e enxofre em profundidade, melhorando o ambiente químico do subsolo e fortalecendo o crescimento radicular. Quando essas práticas são associadas ao uso de cultivares capazes de ativar eficientemente genes relacionados à exclusão do alumínio, como GmMATE13 e GmMATE47, a soja apresenta maior capacidade de germinar, se estabelecer e crescer em solos ácidos, reduzindo os efeitos negativos da toxicidade por Al^{3+}.

3.6 PAPEL DO SULFATO DE CÁLCIO COMO MITIGADOR DOS EFEITOS TÓXICOS DO ALUMÍNIO NA GERMINAÇÃO E DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA

A toxidez por alumínio é uma das principais limitações à produtividade agrícola em solos ácidos, condição frequente em grande parte do território brasileiro. Quando o pH do solo é inferior a 5,5, o alumínio passa a estar disponível na forma de Al^{3+}, que possui alta reatividade e causa danos severos às plantas. Na soja os efeitos são perceptíveis logo nas fases iniciais, inibindo a germinação e o crescimento radicular. O alumínio compromete diretamente a zona de elongação da raiz, onde ocorrem divisão e diferenciação celular intensas, resultando em espessamento radicular, redução na emissão de radicelas e prejuízos à absorção de água e nutrientes, o que afeta o estabelecimento da lavoura (Kochian *et al*., 2004; Silva *et al*., 2012).

Entre as estratégias para mitigar esses efeitos, destaca-se o uso do sulfato de cálcio, que atua tanto na proteção estrutural das células quanto na regulação

fisiológica. O sulfato de cálcio compete com o Al^{3+} por sítios de ligação na parede celular e membrana plasmática das células radiculares, reduzindo a penetração do alumínio e, consequentemente, seus efeitos tóxicos. Além disso, o cálcio estabiliza a estrutura das membranas e mantém a integridade celular, mesmo sob condições adversas. Sua presença adequada também favorece a organização do citoesqueleto e a atividade mitótica, essenciais para a manutenção do crescimento radicular. Assim, o cálcio desempenha papel duplo: impede o avanço da toxidez e simultaneamente favorece o desenvolvimento vegetal (Rengel, 1992; Kinraide, 1998).

O sulfato de cálcio também está envolvido na sinalização celular frente a estresses abióticos. Quando a planta detecta a presença de alumínio, a homeostase do cálcio intracelular é ativada para sinalizar mecanismos de defesa, que incluem a expressão de genes antioxidantes e o ajuste do metabolismo celular. Além de mensageiro, o cálcio atua como cofator enzimático, permitindo que enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase (SOD) e a catalase (CAT) funcionem adequadamente. Dessa forma, o cálcio contribui para limitar o acúmulo de espécies reativas de oxigênio nas raízes, evitando a peroxidação de membranas e a morte celular precoce. Esse efeito se traduz em maior vigor das plântulas mesmo em condições de acidez elevada (Hepler, 2005; Ma *et al*., 2002).

Para os autores Zhou *et al*. (2014) observaram que a adição de cálcio em meio contendo alumínio resultou em aumento da taxa de germinação e do comprimento radicular em sementes de soja, além da redução dos níveis de malondialdeído (MDA), um indicador de dano oxidativo. Guo *et al*. (2017) relataram que o cálcio restaurou a morfologia radicular, favoreceu a emissão de radicelas e manteve a integridade das células. Esses resultados reforçam a ideia de que o cálcio atua como agente mitigador eficaz não apenas pela sua ação química no solo, mas também por sua atuação direta sobre os tecidos vegetais, sendo importante mesmo em aplicações de curto prazo.

Em solos ácidos, há também interferência do alumínio na disponibilidade de nutrientes, como o fósforo, que é facilmente complexado pelo Al^{3+}. A adição de cálcio ao solo reduz essa complexação, liberando fósforo e promovendo seu aproveitamento pelas plantas. Isso resulta em melhor estado nutricional e fortalecimento da planta para suportar outros estresses. Caires *et al*. (2002) e Corrêa *et al*. (2010) demonstraram que, em Latossolos com alta saturação por alumínio, a aplicação de gesso agrícola, fonte de cálcio e enxofre, proporcionou melhor absorção de fósforo, maior acúmulo de massa radicular e aumento na tolerância ao alumínio. Essa relação

entre cálcio e nutrição reforça sua importância como elemento multifuncional no manejo de solos ácidos.

É importante destacar que a resposta da soja à toxidez do alumínio pode variar entre cultivares, pois há diferenças genéticas na tolerância ao Al^{3+}. Algumas cultivares exsudam ácidos orgânicos como cítrico e málico, que complexam o alumínio na rizosfera e impedem sua entrada nas raízes. No entanto, mesmo essas cultivares mostram desempenho superior quando há sulfato de cálcio disponível no solo, indicando que os efeitos do cálcio potencializam os mecanismos de exclusão já existentes. Ahn e Matsumoto (2006) e Tolra *et al*. (2009) destacam que o uso de sulfato de cálcio melhora o desempenho de cultivares tanto tolerantes quanto sensíveis ao alumínio, sendo um fator agronômico chave para ambientes com acidez natural elevada.

A prática agrícola mais comum para fornecer cálcio ao solo é a calagem, que eleva o pH e reduz a solubilidade do alumínio. Complementarmente, a gessagem permite o fornecimento de cálcio em profundidade sem alterar o pH, sendo eficaz em áreas onde o alumínio se acumula nas camadas subsuperficiais. Caires *et al*. (2002) mostraram que a aplicação de gesso resultou em maior crescimento de raízes em profundidade e em maior resistência à seca, especialmente na fase inicial da soja. Ao planejar a adubação, a escolha da fonte de cálcio deve considerar a profundidade da acidez e a capacidade de retenção de nutrientes do solo, tornando a análise química do solo fundamental para o sucesso da prática (Corrêa *et al*., 2010).

Além dos aspectos estruturais e nutricionais, o cálcio também influencia a regulação hormonal nas raízes. A presença de Al^{3+} interfere no equilíbrio de auxinas, comprometendo o crescimento e a diferenciação celular. Assim, o sulfato de cálcio restabelece a polaridade celular e favorece a redistribuição de auxinas, promovendo o alongamento da raiz principal e a formação de radicelas laterais. Essa atuação é fundamental na soja, cujas raízes precisam explorar grandes volumes de solo para alcançar alto desempenho. Rengel (1992) e Hepler (2005) indicam que o cálcio participa ativamente desse processo, associando suas funções estruturais à modulação hormonal de crescimento radicular sob estresse.

Outro aspecto importante refere-se à forma de aplicação do cálcio e sua disponibilidade para as plantas. Fontes solúveis, como o cloreto de cálcio, têm efeito rápido e são ideais para experimentos controlados, enquanto o gesso agrícola atua de forma gradual, sendo mais indicado para manejo a campo. Guo *et al*. (2017)

demonstraram que mesmo pequenas doses de cálcio solúvel aumentaram significativamente o crescimento radicular de plântulas de soja em meio contendo alumínio. A escolha adequada da fonte, da dose e da forma de aplicação influencia diretamente os resultados agronômicos e permite melhor aproveitamento da resposta da planta à correção da acidez.

Ainda, o sulfato de cálcio atua na dinâmica da água e na microestrutura do solo na região da rizosfera. Ao reduzir a tensão superficial da solução do solo e favorecer a formação de filmes hídricos ao redor das raízes, o cálcio facilita a absorção de água em condições de estresse, como baixa umidade ou compactação superficial. Essa melhora na interface solo- raiz promove um ambiente mais estável para a germinação e o crescimento inicial da soja, reduzindo perdas por déficit hídrico (Ma *et al*., 2002; Caires *et al*., 2002). Esse efeito, somado aos demais já descritos, reforça a complexidade e a importância do cálcio na superação da toxidez por alumínio.

Por fim, também se observa que solos com maior teor de matéria orgânica favorecem a ação do sulfato de cálcio. A matéria orgânica aumenta a CTC (capacidade de troca catiônica) e retém Ca^{2+} por mais tempo na solução do solo, além de favorecer a atividade microbiana e a liberação controlada de nutrientes. Compostos orgânicos presentes na matéria orgânica também atuam como quelantes do Al^{3+}, imobilizando-o e reduzindo sua biodisponibilidade. Dessa forma, práticas como o uso de cobertura vegetal, adubação orgânica e manejo conservacionista amplificam os efeitos positivos do cálcio, beneficiando a germinação e o crescimento radicular da soja em solos ácidos (Corrêa *et al*., 2010; Rengel, 1992).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições controladas de laboratório com o objetivo de avaliar os efeitos de diferentes doses de alumínio, com e sem a presença de cálcio, sobre a germinação, e o crescimento inicial de duas cultivares de soja, sendo uma considerada tolerante e outra sensível à toxidez por alumínio. A pesquisa foi dividida em duas etapas: a primeira avaliou a germinação e dados morfológicos das sementes pelo método do rolo de papel, e a segunda analisou o crescimento radicular em plântulas já germinadas, cultivadas em tubos do tipo Falcon com soluções preparadas.

4.1 DESCRIÇÃO DAS CULTIVARES UTILIZADAS

As cultivares escolhidas para esse experimento foram a DonMario 59IX61 RSF I2X e a Fibra IPRO 64I61 RSF, selecionadas com base em sua distinta resposta à toxidez por alumínio. A DonMario 59IX61 RSF I2X foi classificada como tolerante ao alumínio, conforme descrito por Ribeiro *et al*. (2020), que destacam sua capacidade de manter o crescimento radicular mesmo em ambientes com elevada acidez do solo. Por outro lado, a cultivar Fibra IPRO 64I61 RSF foi identificada como suscetível à toxidez por alumínio, o que é corroborado por estudos como o de Silva *et al*. (2020), que apontam a limitação do desenvolvimento inicial de cultivares sensíveis ao alumínio, especialmente em solos não corrigidos. A seleção dessas cultivares teve como objetivo permitir uma análise comparativa dos efeitos do alumínio e da presença de cálcio sobre o processo de germinação e o crescimento radicular de materiais genéticos contrastantes, contribuindo para a compreensão dos mecanismos de tolerância ao estresse abiótico.

A cultivar DonMario 59IX61 RSF I2X, conforme descrita no *Portfólio de Soja – Digital 2024* da Cambaí Sementes, pertence ao grupo de maturação 6.0, apresenta hábito de crescimento indeterminado e porte médio, com exigência média quanto à fertilidade do solo e bom potencial de ramificação. Seu peso médio de mil sementes é de aproximadamente 173 gramas e as sementes utilizadas possuem umidade 12,5 %, sua população recomendada é de 220 a 300 mil plantas/ha, tendo ciclo de 127 dias. Apresenta excelente pacote fitossanitário, com resistência completa (R) ou moderada (MR) ao cancro da haste, podridão de fitóftora, pústula bacteriana,

Macrophomina phaseolina, além de resistência a nematoides como *Meloidogyne javanica*, *M. incognita* e *Heterodera glycines*. Sua ampla adaptabilidade permite o cultivo em diversas regiões do estado do Rio Grande do Sul, sendo indicada especialmente para as macrorregiões 101 (Campanha, Depressão Central, Serra Sudeste) e 102 (Missões e Alto Vale do Uruguai), inclusive em áreas com solos de maior acidez (Cambaí Sementes, 2024).

A cultivar Fibra IPRO 64I61 RSF, do grupo de maturação 6.4, também possui crescimento indeterminado, elevada exigência nutricional e alto potencial de ramificação. O peso médio de mil sementes é de 156 gramas. A umidade da semente utilizada é de 12,8 %. De acordo com o *Portfólio de Soja – Digital 2024* da Cambaí Sementes, essa cultivar é moderadamente resistente (MR) ao cancro da haste e à podridão radicular causada por *Phytophthora spp.*, e está recomendada para ambientes de alta tecnologia, seu ciclo é de 136 dias e sua população recomendada é de 200 a 280 mil plantas/ha (Cambaí Sementes, 2024). No entanto, estudos como o de Silva *et al*. (2020) apontam sua sensibilidade à toxidez por alumínio, especialmente em solos com baixos teores de cálcio e alta saturação por alumínio, o que pode comprometer seu desempenho inicial. Dessa forma, sua utilização é mais indicada para áreas bem corrigidas e manejadas, dentro das mesmas macrorregiões 101 e 102 do estado.

4.2 SOLUÇÕES UTILIZADAS E SEU PREPARO

As soluções utilizadas nos experimentos foram preparadas com água destilada, utilizando os sais cloreto de alumínio hexahidratado ($AlCl_3 6H_2O$) como fonte de alumínio (Al^{3+}), e sulfato de cálcio ($CaSO_4 2H_2O$). As concentrações das soluções foram definidas com base em estudos prévios sobre toxidez do alumínio em soja e os efeitos mitigadores do cálcio sobre essa toxidez em meio nutritivo (Liu *et al*., 2018; Rengel, 1992).

Foram estabelecidas quatro doses de alumínio: 0 (controle), 25, 75 e 200 µmol L^{-1} de Al^{3+}, com e sem a presença de 750 µmol L^{-1} de sulfato de cálcio, totalizando oito soluções distintas. O volume final de cada solução foi de 1 litro, e o preparo seguiu os procedimentos abaixo descritos.

4.2.1 Cálculo da massa dos sais

O cálculo da massa dos sais necessária para o preparo das soluções foi realizado a partir da relação entre a concentração desejada, o volume de solução a ser preparado e a massa molar do sal utilizado, corrigida conforme o grau de pureza do reagente. A fórmula analítica empregada foi:

$$m = (C\ x\ PM\ x\ V)/P$$

Onde m= massa ser pesada (g), C= concentração desejada (mol L^{-1}), PM= peso molecular do sal utilizado (g mol^{-1}), V= volume da solução (L), neste caso, 1 L, e P= pureza do reagente.

Aplicando-se esta equação ao cloreto de alumínio hexahidratado ($AlCl_3 6H_2O$), cuja massa molar é de 241,43 g mol^{-1} e pureza de 99%, para a obtenção de uma solução primária de 2.500 µmol L^{-1}, obteve-se o valor de 0,6096 g. Da mesma forma, para o preparo da solução estoque de 10.000 µmol L^{-1} de sulfato de cálcio di-hidratado ($CaSO_4 2H_2O$), com massa molar de 172,17 g mol^{-1} e pureza de 98%, foi calculada a necessidade de 1,7568 g do sal para 1 L de solução.

Assim, por meio da aplicação sistemática dessa fórmula, foi possível determinar de forma precisa a massa de cada sal a ser pesada, garantindo a obtenção de soluções com as concentrações definidas experimentalmente.

A partir destas soluções primárias, foram obtidas as concentrações de interesse por diluição, pipetando-se 10 mL para a dose de 25 µM, 30 mL para 75 µM e 80 mL para 200 µM, cada uma completada para 1 L em balão volumétrico com água destilada para as concentrações de alumínio. Para o sulfato de cálcio a dose de 750 µM (30 mg/L) (Menosso *et al*., 2000) foi obtida por meio da pipetagem de 75 mL que também foi completada para o volume de 1 litro com água destilada.

Todas as soluções foram inicialmente preparadas em balões volumétricos de 1 L, e, em seguida, transferidas para potes de vidro previamente higienizados, devidamente identificados e armazenados sob refrigeração em geladeira com controle de temperatura e umidade, a fim de preservar a estabilidade e minimizar perdas por degradação ou precipitação.

4.3 EXPERIMENTO 1: AVALIAÇÃO DA GERMINAÇÃO E DO VIGOR DE DIFERENTES CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDAS A DOSES DE ALUMÍNIO, COM E SEM CÁLCIO, PELO MÉTODO DO ROLO DE PAPEL

Este experimento teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes concentrações de alumínio, com ou sem a presença de sulfato de cálcio, sobre a germinação e o vigor de duas cultivares de soja com diferentes níveis de tolerância ao estresse por alumínio. Para isso, foi adotado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial trifatorial 4 × 2 × 2, envolvendo quatro doses de alumínio (0, 25, 75 e 200 µmol L^{-1}), duas condições de sulfato de cálcio (ausente e presente a 750 µmol L^{-1}) e duas cultivares de soja (uma tolerante e uma suscetível). Cada combinação de tratamento foi repetida três vezes, com 20 sementes por repetição, totalizando 48 unidades experimentais e 960 sementes avaliadas. Os rolos foram mantidos em germinador do tipo BOD, sob temperatura constante de 24 °C e fotoperíodo de 12 horas, considerado ideal para a germinação da soja. (Marcos-Filho, 2015).

A germinação foi conduzida pelo método do rolo de papel, conforme as Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009), com adaptações experimentais. Para cada rolo, utilizaram-se duas folhas de papel germitest sobrepostas, sobre as quais as sementes foram distribuídas em fileiras equidistantes. Em seguida, adicionou-se uma terceira folha de papel por cima das sementes, totalizando três folhas por rolo. Os papéis foram previamente embebidos com volume de solução correspondente a 2,5 vezes seu peso seco, respeitando os tratamentos estabelecidos. As soluções foram preparadas nas quatro concentrações definidas, e metade das combinações recebeu a adição de cálcio, na dose única de 750 µmol L^{-1}, fornecido na forma de sulfato de cálcio ($CaSO_4 2H_2O$) conforme metodologia adaptada de Menosso *et al*., (2000). Após a disposição das sementes, os papéis foram enrolados cuidadosamente, formando cilindros compactos, que foram acondicionados em sacos plásticos vedados até o término do período experimental.

4.3.1 Avaliação do percentual de germinação

A contagem da germinação foi realizada no 5° e 8° dia após a montagem dos rolos. Foram consideradas germinadas as sementes que apresentaram protrusão da

radícula com comprimento igual ou superior a 2 mm, critério estabelecido pelas RAS. O cálculo da porcentagem de germinação foi feito com base na seguinte equação:

$$Germinação\ (\%) = \left(\frac{Número\ de\ sementes\ germinadas}{Número\ total\ de\ sementes}\right) x\ 100$$

Esse parâmetro permitiu avaliar o efeito das diferentes soluções sobre a viabilidade das sementes em condições controladas.

4.3.2 Avaliação do índice de velocidade de germinação (IVG)

O índice de velocidade de germinação (IVG) foi calculado com base na fórmula proposta por Maguire (1962), que expressa o vigor das sementes em função da velocidade com que germinam:

$$IVG = \frac{G1}{N1} + \frac{G2}{N2} + \ldots \frac{Gn}{Nn}$$

Em que G1, G2, Gn correspondem ao número de sementes germinadas na primeira, segunda e última contagem, respectivamente, e N1, N2, Nn ao número de dias decorridos da implantação do experimento até a primeira, segunda e última contagem, respectivamente. As contagens foram realizadas todos os dias, até o 8º dia. Valores mais altos de IVG indicam maior vigor fisiológico e maior uniformidade no processo de germinação, sendo este um parâmetro confiável para diferenciação entre tratamentos e entre cultivares.

Ao final do período experimental, as plântulas normais foram separadas e a parte aérea e parte radicular foram coletadas e medidas com o auxílio de um paquímetro digital, após medidas foram agrupadas por tratamentos e repetições e colocadas em sacos de papel que foram levados em estufas de ar forçado a 50 °C, onde permaneceram até peso constante, no fim foram pesadas em balança analítica para determinação da massa seca da parte aérea e massa seca de raiz. (Marcos-Filho, 2015).

4.4 EXPERIMENTO 2 : AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO RADICULAR DE DIFERENTES CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDAS A DOSES DE ALUMÍNIO, COM E SEM CÁLCIO, EM TUBOS FALCON

Este experimento teve como objetivo avaliar o crescimento radicular de duas cultivares de soja com diferentes níveis de tolerância ao alumínio, quando expostas a diferentes doses do íon Al^{3+}, com e sem a adição de cálcio, em solução. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial trifatorial 4 × 2 × 2, envolvendo quatro concentrações de alumínio (0, 25, 75 e 200 µmol L^{-1}), duas condições de cálcio (ausente e presente a 750 µmol L^{-1}) e duas cultivares de soja (tolerante e suscetível). Cada combinação de tratamento foi repetida três vezes, totalizando 48 unidades experimentais, compostas por uma plântula por tubo Falcon.

As sementes foram previamente germinadas em água destilada através do método de rolo de papel, sendo selecionadas aquelas que apresentaram emissão da radícula. As plântulas uniformes foram transferidas individualmente para tubos Falcon de 50 mL, contendo 50 mL das mesmas soluções preparadas no experimento anterior. O volume foi suficiente para manter as raízes submersas sem afetar a parte aérea, garantindo a aeração adequada (LIMA *et al*., 2011). As unidades experimentais foram mantidas em câmara BOD, sob temperatura constante de 24 °C, por um período de oito dias. Ao final, realizou- se a mensuração do comprimento radicular e também a determinação da massa seca das raízes após secagem em estufa a 50 °C até peso constante, seguida de pesagem em balança de precisão (4 casas decimais), conforme metodologia adaptada de Rengel (1992).

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos nos experimentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema trifatorial. Quando detectada significância estatística para o fator ou interação ($p \leq 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância quando fatores qualitativos e, análise de regressão quando fatores quantitativos. Para a execução da ANOVA e dos testes subsequentes, foi utilizado o software estatístico Sisvar.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 1: GERMINAÇÃO E VIGOR DE SEMENTES DE SOJA SOB DOSES DE ALUMÍNIO, COM E SEM SULFATO DE CÁLCIO, PELO MÉTODO DO ROLO DE PAPEL

Na Tabela 1 apresentada, a variável G (%) refere-se à germinação, enquanto IVG corresponde ao índice de velocidade de germinação. As variáveis CR (mm) e CA (mm) representam, respectivamente, o comprimento de raiz e o comprimento da parte aérea das plântulas. A MSR (g) indica a massa seca de raiz, e a MSA (g) a massa seca da parte aérea. Já a variável CRF (mm) corresponde ao comprimento de raiz avaliado nos tubos Falcon, utilizado para a análise do crescimento radicular em solução. S.cálcio indica o reagente sulfato de cálcio.

De modo geral, as variáveis apresentaram respostas distintas aos fatores experimentais. O IVG não foi influenciado pelos tratamentos, assim como a germinação. Para as variáveis morfológicas, o alumínio exerceu efeito predominante sobre o comprimento de raiz e de parte aérea, evidenciando sua importância no desenvolvimento inicial das plântulas.

Tabela 1- Valores de p- valor da ANOVA para IVG, germinação, comprimento de raiz, comprimento de parte aérea e massa seca de raiz e de parte aérea de plântulas de soja submetidas a diferentes doses de alumínio, na presença ou ausência de sulfato de cálcio, em duas cultivares, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.

Fatores	IVG	G (%)	CR (mm)	CA (mm)	MSR (g)	MSA (g)
Alumínio	0.3144	0.5541	0.0289*	0.0018*	0.1398	0.7115
S.Cálcio	0.4530	0.9975	0.8492	0.2470	0.7496	0.9488
Cultivar	0.6830	0.1670	0.9144	0.9814	0.8786	0.4641
Alumínio*S.Cálcio	0.6263	0.6303	0.9895	0.9159	0.9800	0.9978
Alumínio*Cultivar	0.8190	0.9688	1,0000	0.4882	0.9926	0.9989
S.Cálcio*Cultivar	0.9428	0.7260	0.9848	0.5602	0.8568	0.9897
Interação tripla	0.3746	0.3225	0.9658	0.9541	0.9997	0.9950
CV (%)	4,05	4,14	18,25	24,58	28,21	44,4

*Significativo pela ANOVA a 5% de probabilidade de erro.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para o IVG, nenhum dos efeitos principais ou interações apresentou significância ($p > 0,05$), indicando que alumínio, cálcio e cultivares não alteraram a velocidade de germinação nas doses avaliadas. Bewley e Black (1994) destacam que a germinação é um processo fisiológico altamente estável, pouco afetado por variações químicas moderadas no ambiente, o que ajuda a explicar a falta de resposta nessa variável.

Para a germinação (%), não foi identificado efeito significativo dos fatores avaliados, incluindo cultivar, alumínio e cálcio, bem como de suas interações, indicando que a capacidade germinativa das sementes manteve- se elevada e estável independentemente dos tratamentos aplicados. Esse comportamento evidencia que, mesmo diante de condições potencialmente estressantes, a germinação pode não ser sensível a variações químicas do meio, estando fortemente associada a características genéticas próprias de cada material. Nesse sentido, Marcos-Filho (2015) destaca que diferenças genéticas podem resultar em padrões germinativos distintos; contudo, quando as condições são favoráveis, tais diferenças podem não se expressar estatisticamente, como observado neste estudo. Além disso, embora Delhaize e Ryan (1995) ressaltem que a resposta das plantas ao alumínio é amplamente influenciada pelo genótipo e pela composição química da solução, os resultados indicam que essa interação não se manifestou de forma significativa na fase de germinação, sugerindo que os efeitos do alumínio tendem a ser mais pronunciados em estádios posteriores do desenvolvimento, especialmente no crescimento radicular.

No comprimento da raiz, constatou-se efeito significativo de alumínio ($p = 0,0289$), indicando que o aumento das doses interferiu no crescimento radicular das plântulas. Kochian (1995) descreve que o alumínio é um dos principais fatores responsáveis pela redução do crescimento de raízes em ambientes ácidos, atuando rapidamente na inibição da elongação celular. De maneira semelhante, para o comprimento da parte aérea, o alumínio também foi o único fator significativo ($p = 0,0018$), o que demonstra que a parte aérea também sofre efeitos negativos associados à presença do elemento. Foy (1988) explica que essa diminuição ocorre porque o alumínio limita a absorção e o transporte de nutrientes essenciais, refletindo não apenas no sistema radicular, mas também no crescimento da parte aérea.

Observa-se também que as variáveis biomassa (massa seca de raiz e massa seca de parte aérea) não foram influenciadas de forma significativa por nenhum dos

fatores avaliados ou por suas interações ($p > 0,05$). A ausência de resposta do alumínio sobre a produção de massa está de acordo com o que afirma Epstein e Bloom (2005), os quais destacam que reduções significativas em biomassa tendem a ocorrer apenas após períodos mais prolongados de exposição ao alumínio, uma vez que a planta costuma priorizar mecanismos de compensação estrutural nas fases iniciais. Taiz e Zeiger (2017) também apontam que o acúmulo de massa é menos sensível aos estresses imediatos quando comparado a variáveis de crescimento primário, como o alongamento radicular.

A Tabela 2 apresenta as médias de germinação, avaliadas no 5º e 8º dias, das cultivares de soja Fibra IPRO 64I61 RSF e DonMario 59IX61 RSF I2X, em função de doses de alumínio, na presença ou ausência de sulfato de cálcio. De modo geral, observa-se que ambas as cultivares apresentaram elevadas porcentagens de germinação, variando entre 93,3% e 100%, o que indica que, nas condições deste experimento, as doses de alumínio avaliadas não foram suficientes para causar redução expressiva na germinação das sementes.

O coeficiente de variação de 4,14% evidencia baixa variabilidade experimental, conferindo boa confiabilidade aos resultados obtidos. Para a cultivar Fibra IPRO 64I61 RSF, os valores de germinação permaneceram praticamente constantes em todas as combinações de doses de alumínio e presença ou ausência de sulfato de cálcio, oscilando entre 98,3% e 100%, demonstrando elevada estabilidade germinativa frente aos tratamentos aplicados.

De forma semelhante, a cultivar DonMario 59IX61 RSF I2X apresentou germinação elevada na maior parte dos tratamentos, com valores entre 93,3% e 100%. Embora se observe numericamente uma redução da germinação na dose de 200 $\mu mol\ L^{-1}$ de alumínio mesmo na presença de sulfato de cálcio, essa variação não foi suficiente para caracterizar efeito significativo dos fatores avaliados, conforme indicado pela análise de variância. Assim, mesmo na condição de maior estresse potencial, ambas as cultivares mantiveram alto desempenho germinativo, evidenciando boa tolerância inicial ao alumínio nas condições experimentais adotadas.

Tabela 2- Médias de germinação do 5º e 8º dias (%) de duas cultivares de soja em função das doses de alumínio e presença ou ausência de sulfato de cálcio (S.cálcio), em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.

Dose de Al (µmol L^{-1})	S.Cálcio	Germinação cultivar Fibra (%)	Germinação cultivar Don Mario (%)
0	Com	100^{ns}	100^{ns}
0	Sem	100	96,7
25	Com	100	100
25	Sem	100	98,3
75	Com	98,3	96,7
75	Sem	98,3	96,7
200	Com	100	93,3
200	Sem	98,3	100
CV (%)			4,14
Média Geral		99,3	97,7

CV= Coeficiente de variação.
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Esses resultados indicam que, nas concentrações utilizadas, o alumínio não foi suficientemente tóxico para reduzir de forma expressiva a emergência das plântulas. Resultados semelhantes foram encontrados por Custódio *et al.* (2002), ao verificarem que a presença de alumínio não afetou significativamente a germinação, embora tenha reduzido o comprimento de hipocótilo e de raiz, evidenciando que esse elemento tende a interferir mais intensamente no crescimento inicial do que na porcentagem de sementes germinadas. De maneira complementar, Ferreira, Moreira e Rassini (2006) destacam que a redução do crescimento radicular constitui o principal efeito da toxidez de alumínio em culturas anuais, o que reforça a interpretação de que, no presente experimento, a germinação se manteve elevada, enquanto os impactos mais marcantes do alumínio tendem a se manifestar em variáveis de vigor e desenvolvimento de raízes.

Ao comparar os tratamentos com e sem sulfato de cálcio, verifica-se que a germinação praticamente não se altera, mantendo-se elevada em todas as combinações, o que indica que, nas condições avaliadas, o cálcio não promoveu mudanças numéricas expressivas nessa variável. Esse comportamento está de acordo com Rengel (1992), que ressalta o papel do cálcio na estabilidade de membranas e na homeostase iônica, atenuando os efeitos tóxicos do Al^{3+} sobre as células radiculares, muitas vezes com reflexos mais evidentes em parâmetros de crescimento do que na porcentagem de germinação.

Além disso, observa-se que a cultivar Fibra manteve a germinação praticamente constante em todas as doses de alumínio, independentemente da presença de sulfato de cálcio, enquanto a DonMario apresentou pequena diminuição apenas na combinação de 200 µmol L^{-1} de alumínio apesar da presença de sulfato de cálcio, em que a germinação caiu para 93,3%. Essa diferença, ainda que modesta em termos absolutos, sugere maior sensibilidade da DonMario em relação à Fibra nessa condição específica. Ferreira, Moreira e Rassini (2006) salientam que espécies e cultivares podem diferir amplamente quanto à tolerância ao alumínio, o que contribui para explicar essas oscilações pontuais, ao mesmo tempo em que reforça que, de modo geral, a toxicidade de Al tende a se expressar com maior intensidade em caracteres de vigor e crescimento radicular do que na simples porcentagem de germinação, conforme também relatado por Custódio *et al.* (2002).

Tabela 3- Índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de duas cultivares de soja submetidas a diferentes doses de alumínio e presença ou ausência de sulfato de cálcio (S.cálcio), em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.

Dose de Al (µmol L^{-1})	S.Cálcio	Cultivar	Médias
0	Com	Fibra	28,02^{ns}
25	Com	Fibra	28,36
75	Com	Fibra	27,78
200	Com	Fibra	28,02
0	Sem	Fibra	27,86
25	Sem	Fibra	28,69
75	Sem	Fibra	27,95
200	Sem	Fibra	28,12
0	Com	DonMario	28,69
25	Com	DonMario	29,02
75	Com	DonMario	27,38
200	Com	DonMario	27,07
0	Sem	DonMario	27,71
25	Sem	DonMario	28,45
75	Sem	DonMario	28,38
200	Sem	DonMario	28,52
CV (%)			4,05
Média geral			28,13

ns= não significativo.
CV= Coeficiente de variação.
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Os valores médios de IVG apresentados na Tabela 3 mostram que não houve efeito significativo das doses de alumínio, da presença de sulfato de cálcio ou das

cultivares sobre a velocidade de germinação das sementes. A estabilidade dessa variável é consistente com o comportamento fisiológico da germinação, já que o IVG tende a ser menos influenciado por estresses químicos moderados quando as sementes mantêm integridade fisiológica adequada. De acordo com Carvalho e Nakagawa (2012), a velocidade de germinação é fortemente associada ao vigor próprio das sementes, sendo pouco alterada quando o ambiente não impõe limitações severas à absorção de água ou à ativação metabólica inicial. Essa característica ajuda a explicar por que as sementes de Fibra IPRO 64I61 RSF e DonMario 59IX61 RSF I2X apresentaram valores semelhantes de IVG, independentemente do nível de alumínio ou do fornecimento de cálcio.

Além disso, Peske, Villela e Meneghello (2019) indicam que parâmetros de vigor relacionados à velocidade de germinação apresentam menor sensibilidade imediata a estresses abióticos quando comparados a variáveis de crescimento, pois refletem etapas metabólicas iniciais que, em muitos casos, podem ocorrer mesmo em ambientes com moderadas restrições químicas. Isso reforça a consistência dos resultados observados, nos quais não se verificou diferença estatística entre os tratamentos.

Tabela 4- Médias gerais do comprimento da parte aérea (CA) e parte radicular (CR) em mm de plântulas de soja em função dos fatores sulfato de cálcio (S.cálcio) e cultivar, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.

Fator	Nível	CA (mm)	CR (mm)
S.Cálcio	Com	58,45^{ns}	99,59^{ns}
	Sem	53,76	98,59
Cultivar	Fibra	56,15^{ns}	99,37^{ns}
	DonMario	56,06	98,81
CV (%)		24,58	18,32
Média Geral		56,11	99,09

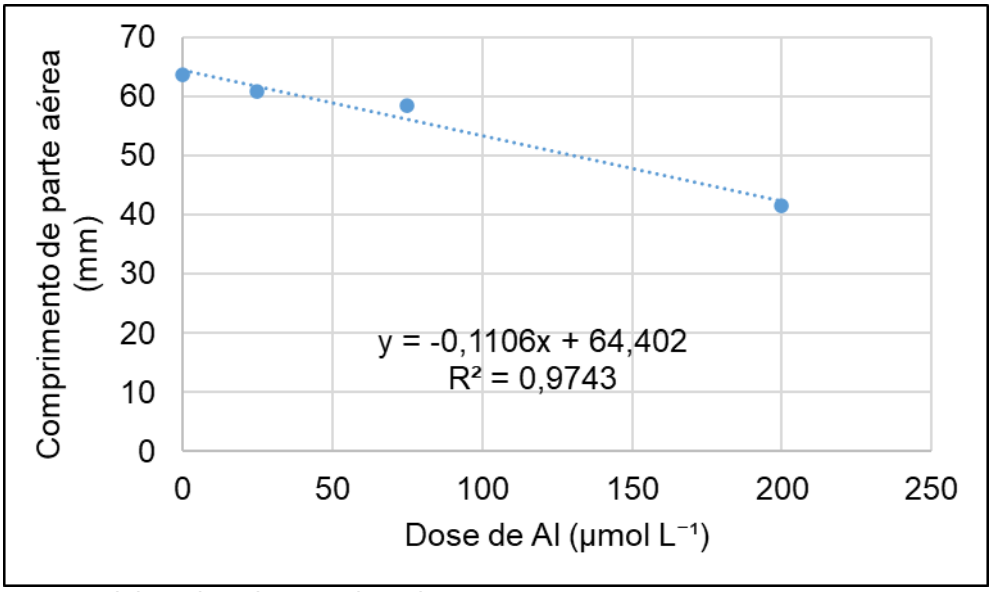
ns= não significativo.
CV= Coeficiente de variação.
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram que o comprimento da parte aérea das plântulas não foi influenciado significativamente pelos fatores sulfato de cálcio e cultivar ($p > 0,05$), indicando que essas variáveis não alteraram o desenvolvimento inicial do hipocótilo. De forma semelhante, o comprimento da parte radicular também não diferiu entre os níveis de cálcio e entre as cultivares, conforme

indicado pelos testes não significativos. A literatura mostra que, nas primeiras etapas do desenvolvimento, o crescimento da parte aérea costuma ser menos sensível a variações nutricionais ou estruturais do ambiente, enquanto o sistema radicular tende a responder de forma mais rápida a estresses químicos. De acordo com Ferreira *et al*. (2018), o alongamento da parte aérea apresenta maior estabilidade fisiológica nas fases iniciais, sendo menos suscetível aos estresses quando comparado às raízes, o que ajuda a explicar por que Fibra IPRO 64I61 RSF apresentou média de 56,15 mm e DonMario 59IX61 RSF I2X média de 56,06 mm de parte aérea, valores muito próximos entre si. Do mesmo modo, os comprimentos médios de parte radicular permaneceram elevados e semelhantes entre os tratamentos com cálcio (99,59 mm) e sem cálcio (98,59 mm), bem como entre as cultivares Fibra (99,37 mm) e DonMario (98,81 mm), reforçando a ausência de efeito desses fatores sobre o crescimento inicial medido neste experimento.

Embora sulfato de cálcio e cultivar não tenham sido significativos, o fator alumínio apresentou efeito significativo sobre o comprimento da parte aérea ($p = 0,0018$), conforme indicado na ANOVA. As médias utilizadas para a construção do Gráfico da Figura 1 reforçam essa tendência de queda progressiva: 63,69 mm (0 µmol L^{-1}), 60,74 mm (25 µmol L^{-1}), 58,50 mm (75 µmol L^{-1}) e 41,49 mm (200 µmol L^{-1}). Essa redução progressiva indica que o alumínio exerce efeito negativo no alongamento celular, o que está em consonância com os mecanismos fisiológicos descritos por Barceló e Poschenrieder (2002), os quais afirmam que o alumínio prejudica os processos de expansão celular ao interagir com componentes da parede celular e reduzir o alongamento do eixo caulinar.

Figura 1- Comprimento da parte aérea (mm) de plântulas de soja submetidas a diferentes doses de alumínio, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

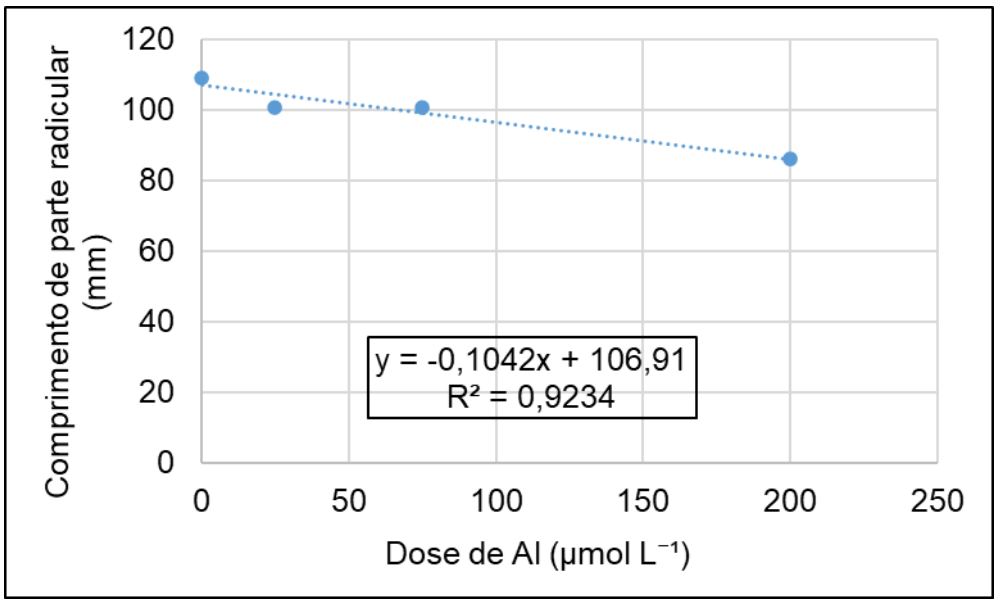
A Figura 1 apresentada evidencia de forma clara essa tendência linear negativa. O modelo ajustado ($Y = –0,1106x + 64,402$; $R^2 = 0,9743$) indica que o aumento das doses de alumínio promove diminuição consistente no comprimento da parte aérea. O elevado valor de R^2 confirma a adequação do modelo, refletindo o comportamento progressivo de queda já observado nas médias. Esse padrão é fisiologicamente esperado, pois, segundo Rengel e Zhang (2003), o alumínio pode comprometer o crescimento da parte aérea ao reduzir o transporte de água e nutrientes essenciais provenientes do sistema radicular, afetando diretamente a elongação dos tecidos da porção superior da plântula.

O mesmo se observa na Figura 2, onde as médias utilizadas demonstram essa tendência: 109,15 mm (0 µmol L^{-1}), 100,59 mm (25 µmol L^{-1}), 100,70 mm (75 µmol L^{-1}) e 85,92 mm (200 µmol L^{-1}). A redução mais acentuada na maior dose indica que os efeitos tóxicos do alumínio intensificam- se à medida que sua concentração aumenta. Esse comportamento está alinhado com a descrição de Kochian *et al*. (2015), que destacam que o alumínio inibe a elongação radicular ao interferir nos processos de divisão celular e no metabolismo do ápice.

O gráfico de regressão (Figura 2) confirma o padrão observado nas médias. O modelo linear ajustado ($Y = –0,1042x + 106,91$; $R^2 = 0,9234$) mostra que a relação entre a dose de alumínio e o comprimento radicular é tendencialmente decrescente.

O elevado valor de R^2 demonstra que o ajuste descreve bem a tendência fisiológica esperada. Segundo Zhang *et al*. (2019), respostas lineares negativas são comuns em estudos de toxicidade por alumínio, especialmente quando as plantas não possuem mecanismos eficientes de exclusão ou desintoxicação.

Figura 2- Comprimento da parte radicular (mm) de plântulas de soja submetidas a diferentes doses de alumínio, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Tabela 5- Médias da massa seca de parte aérea e massa seca de raiz (mg) de plântulas de soja em função de doses de alumínio, presença ou ausência de sulfato de cálcio (S.cálcio) e cultivares, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.

Dose de Al (µmol L^{-1})	S.Cálcio	Cultivar	Massa da parte aérea (mg)	Massa da parte radicular (mg)
0	Com	Fibra	7,14^{ns}	1,17^{ns}
25	Com	Fibra	6,75	1,24
75	Com	Fibra	6,73	1,13
200	Com	Fibra	5,3	0,91
0	Sem	Fibra	6,75	1,15
25	Sem	Fibra	6,68	1,12
75	Sem	Fibra	6,51	1,10
200	Sem	Fibra	5,8	0,90
0	Com	DonMario	7,5	1,22
25	Com	DonMario	7,41	1,18
75	Com	DonMario	7,23	1,14
200	Com	DonMario	6,4	0,90
0	Sem	DonMario	7,14	1,19
25	Sem	DonMario	7,57	1,12
75	Sem	DonMario	7,46	1,10
200	Sem	DonMario	6,1	0,94
CV (%)			44.40	28,21
Média geral			6,78	1,09

ns= não significativo.
CV= Coeficiente de variação.
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Os valores apresentados na Tabela 5 mostram que a massa seca de raiz não foi influenciada significativamente pelos fatores avaliados, conforme indicado anteriormente na ANOVA. As médias observadas variaram pouco entre os tratamentos, com valores próximos tanto para Fibra IPRO 64I61 RSF quanto para DonMario 59IX61 RSF I2X. Na presença de sulfato de cálcio, as médias oscilaram de 1,24 mg (25 µmol L^{-1}) a 0,91 mg (200 µmol L^{-1}) para Fibra, enquanto para DonMario variaram entre 1,22 mg (0 µmol L^{-1}) e 0,90 mg (200 µmol L^{-1}). Na ausência de sulfato de cálcio, o comportamento foi semelhante, com valores de 1,15 mg (0 µmol L^{-1}) a 0,90 mg (200 µmol L^{-1}) para Fibra e de 1,19 mg (0 µmol L^{-1}) a 0,94 mg (200 µmol L^{-1}) para DonMario. Esse comportamento está de acordo com Lambers *et al.* (2008), que indicam o acúmulo de massa seca como um indicador mais tardio, resultante da integração de diversos processos fisiológicos, podendo apresentar resposta mais discreta a estresses de curta duração. De maneira semelhante, Marschner (2012)

descreve que, em períodos experimentais reduzidos, os efeitos do alumínio tendem a manifestar-se de forma mais evidente na elongação radicular do que na produção de biomassa, uma vez que a limitação de crescimento precede a redução de massa acumulada.

No caso da massa seca de parte aérea, também não foram observadas diferenças significativas em função dos fatores avaliados, conforme indicado pela ANOVA. As médias para Fibra IPRO 64I61 RSF, na presença de sulfato de cálcio, variaram de 7,14 mg (0 µmol L^{-1}) a 5,30 mg (200 µmol L^{-1}), enquanto na ausência do mesmo oscilaram de 6,88 mg (25 µmol L^{-1}) a 5,80 mg (200 µmol L^{-1}). Para DonMario 59IX61 RSF I2X, os valores seguiram padrão semelhante, variando entre 7,50 mg (0 µmol L^{-1}, com cálcio) e 6,40 mg (200 µmol L^{-1}, com cálcio), e entre 7,57 mg (25 µmol L^{-1}, sem cálcio) e 6,10 mg (200 µmol L^{-1}, sem cálcio). Apesar de se observar tendência de redução nas maiores doses de alumínio, especialmente em 200 µmol L^{-1}, essas oscilações não foram estatisticamente significativas, o que indica ausência de resposta fisiológica consistente da parte aérea frente às doses de alumínio ou à oferta de sulfato de cálcio no período inicial de crescimento. Esse padrão pode ser explicado pelo fato de que a massa seca de parte aérea é um parâmetro acumulativo e tende a responder mais lentamente a condições de estresse, como sugerem Taiz e Zeiger (2017), ao destacarem que a biomassa aérea costuma ser menos imediatamente afetada por distúrbios radiculares, sobretudo em avaliações de curta duração. Além disso, Kochian *et al.* (2015) apontam que o alumínio atua primordialmente sobre o ápice radicular, o que justifica o fato de alterações morfológicas iniciais serem mais perceptíveis no sistema radicular do que na parte aérea.

Embora o cálcio exerça papel fundamental na estabilidade das membranas celulares e na regulação de processos metabólicos (Marschner, 2012), sua atuação nem sempre resulta em diferenças mensuráveis na acumulação de biomassa quando o período experimental é curto ou quando os níveis de alumínio não são suficientemente severos para comprometer o transporte e a partição de fotoassimilados.

5.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 2: CRESCIMENTO RADICULAR DE PLÂNTULAS DE SOJA SOB DOSES DE ALUMÍNIO, COM E SEM CÁLCIO, EM TUBOS FALCON

O comprimento de raiz avaliado nos tubos Falcon apresentou efeito significativo pela ANOVA do alumínio ($p = 0,0000$), bem como das interações alumínio × sulfato de cálcio ($p = 0,0026$) e tripla ($p = 0,0204$), evidenciando que o crescimento radicular em solução é fortemente influenciado pelas doses de alumínio e condicionado tanto pela presença de sulfato de cálcio quanto pelo genótipo. Esses resultados corroboram Cumming *et al.* (1992), que relatam a rápida interferência do alumínio na elongação celular, modulada pela composição iônica do meio, e Kinraide (1993), ao destacar o papel do cálcio na redução da atividade tóxica do alumínio por competição por sítios de ligação na parede celular. A significância da interação tripla reforça, ainda, a dependência genética da tolerância ao alumínio, conforme descrito por Miyasaka *et al.* (1989), refletindo respostas radiculares diferenciadas entre cultivares sob as mesmas condições de exposição.

Para o comprimento médio das raízes dos tubos falcon, a interação tripla entre alumínio, sulfato de cálcio e cultivares apresentou significância na ANOVA, o que exigiu o desdobramento dessa interação. Inicialmente, procedeu-se ao desdobramento fixando o fator cultivar, a fim de avaliar separadamente o comportamento das cultivares Fibra IPRO 64I61 RSF e DonMario 59IX61 RSF I2X frente às combinações entre alumínio e sulfato de cálcio (Tabela 6). Em seguida, realizou-se um segundo desdobramento fixando o fator alumínio, permitindo identificar, dentro de cada dose aplicada, eventuais diferenças entre a presença e ausência de cálcio para cada cultivar. Essa abordagem possibilitou compreender de forma mais precisa a resposta morfológica das plântulas diante da interação complexa entre os três fatores.

Tabela 6- Comprimento médio de raízes (mm) de plântulas de duas cultivares de soja, em função de doses de alumínio em solução e da presença ou ausência de sulfato de cálcio (S.cálcio), em ensaio conduzido em tubos Falcon, sob DIC. Cerro Largo, 2025.

Dose de Al (µmol L^{-1})	S.Cálcio	Cultivar Fibra (mm)	Cultivar DonMario (mm)
0	Com	79,65 b*	120,58 a*
0	Sem	120,55 a	97,72 a
25	Com	97,47 a	90,72 a
25	Sem	47,87 b	81,62 a
75	Com	110,86 a	103,58 a
75	Sem	51,22 a	49,89 a
200	Com	71,34 a	78,29 a
200	Sem	43,28 a	41,34 a
CV (%)			24,13

*Médias seguidas por letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Letras na linha comparam cultivares dentro de cada combinação de Al × S.Ca (Tukey, 5%).
CV= Coeficiente de variação.
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

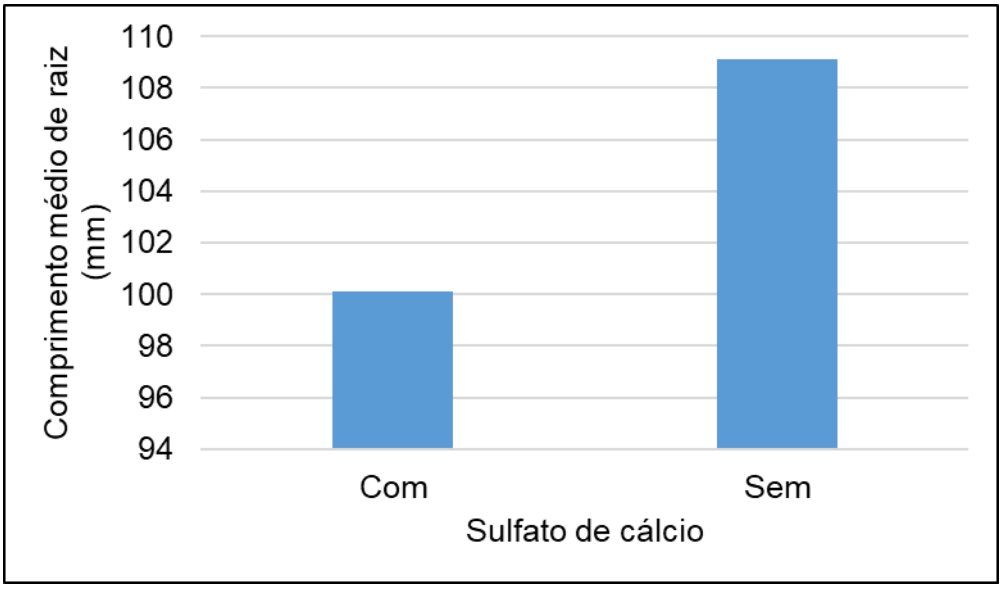
Quando a interação tripla foi desdobrada fixando-se o fator cultivar, observou-se que as duas cultivares apresentaram comportamento semelhante na maioria das combinações entre alumínio e sulfato de cálcio. Em praticamente todos os tratamentos, as médias de comprimento radicular de Fibra IPRO 64I61 RSF e DonMario 59IX61 RSF I2X não diferiram estatisticamente, o que indica que ambas responderam de forma equivalente ao alumínio em solução, tanto na presença quanto na ausência de sulfato de cálcio.

As única exceções ocorreram na condição sem alumínio (0 µmol L^{-1}) e com sulfato de cálcio, e na condição 25 µmol L^{-1} sem sulfato de cálcio em que a DonMario apresentou maior comprimento radicular em comparação à Fibra, evidenciando superioridade inicial da cultivar quando não havia estresse por alumínio. No entanto, à medida que o alumínio foi introduzido no sistema, as diferenças entre cultivares desapareceram, sugerindo que o estresse imposto pelo alumínio igualou o desempenho radicular entre elas, independentemente da presença de sulfato de cálcio.

Essa resposta semelhante sob estresse é compatível com o comportamento descrito na literatura, onde cultivares podem divergir em condições de ausência de alumínio, mas apresentar respostas convergentes quando o alumínio se intensifica, devido à limitação generalizada da elongação radicular (Kochian *et al*., 2015; Marschner, 2012).

Para fins de visualização gráfica, o fator cultivar foi considerado como fonte de variação experimental, dentro do erro de 5%, permitindo avaliar o efeito do sulfato de cálcio em cada dose fixa de alumínio. Assim, foram elaborados gráficos independentes para as doses de 0, 25, 75 e 200 µmol L^{-1} de Al, evidenciando a resposta média do crescimento radicular à presença e ausência de sulfato de cálcio.

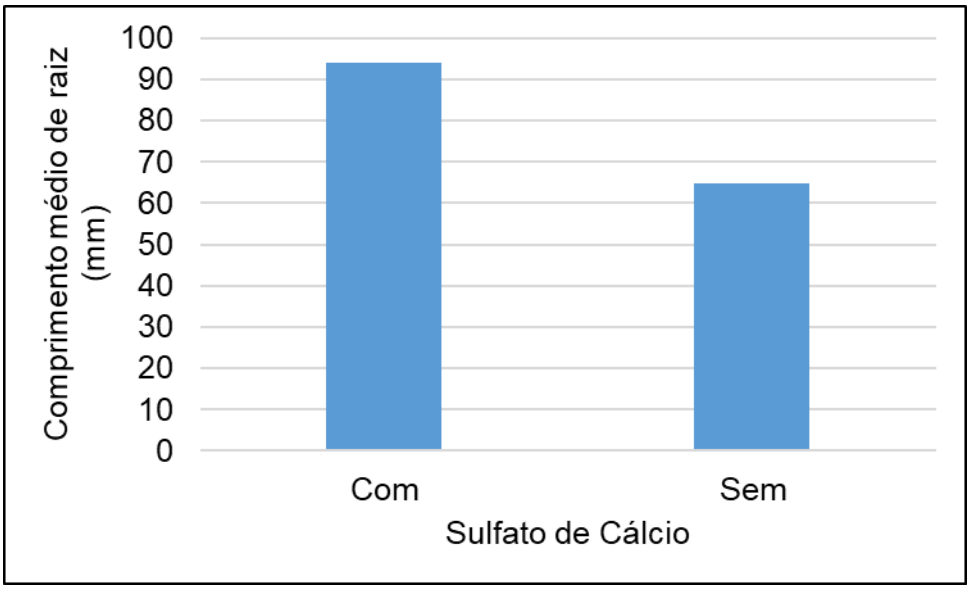
Figura 3- Comprimento médio de raiz de plântulas de soja (mm), em função da presença ou ausência de sulfato de cálcio, na dose de 0 µmol L^{-1} de alumínio, avaliado em tubos Falcon. Cerro Largo, 2025.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na dose de 0 µmol L^{-1} de alumínio (Figura 3), o comprimento médio de raiz foi maior na ausência de sulfato de cálcio, com valor de 109,13 mm, em comparação à condição com cálcio, que apresentou média de 100,11 mm. No entanto, esse comportamento não segue o padrão esperado, uma vez que, em condições sem estresse por alumínio, a presença de sulfato de cálcio tende a favorecer o crescimento radicular. Assim, a diferença observada pode estar associada à variabilidade experimental inerente ao ensaio, caracterizando-se como um possível efeito de erro experimental, e não necessariamente como uma resposta fisiológica consistente ao tratamento. Ressalta-se que não foram identificadas falhas metodológicas durante a condução do experimento, indicando que esse resultado pontual não compromete a validade do ensaio como um todo, mas reflete a variabilidade natural dos dados obtidos em condições controladas de laboratório.

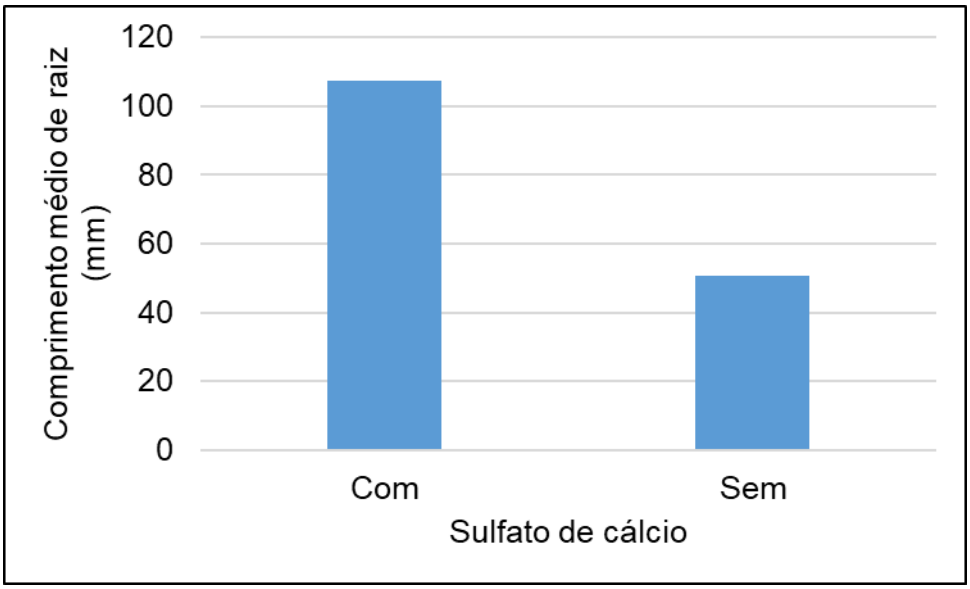
Figura 4- Comprimento médio de raiz de plântulas de soja (mm), em função da presença ou ausência de sulfato de cálcio, na dose de 25 µmol L^{-1} de alumínio, avaliado em tubos Falcon. Cerro Largo, 2025.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na dose de 25 µmol L^{-1} de alumínio (Figura 4), observa-se efeito positivo da presença de sulfato de cálcio sobre o crescimento radicular das plântulas de soja, evidenciado pelo maior comprimento médio de raiz na condição com sulfato de cálcio, que atingiu 94,09 mm, em comparação à ausência de sulfato de cálcio, cuja média foi de 64,74 mm. Esse resultado indica que, mesmo em níveis moderados de alumínio na solução, o sulfato de cálcio contribuiu para atenuar os efeitos negativos desse elemento sobre o desenvolvimento radicular, promovendo maior elongação das raízes. Dessa forma, os dados demonstram de maneira clara o potencial do sulfato de cálcio em favorecer o crescimento radicular sob condições de estresse por alumínio, reforçando a importância desse nutriente na mitigação dos efeitos tóxicos do alumínio no estágio inicial de desenvolvimento das plântulas.

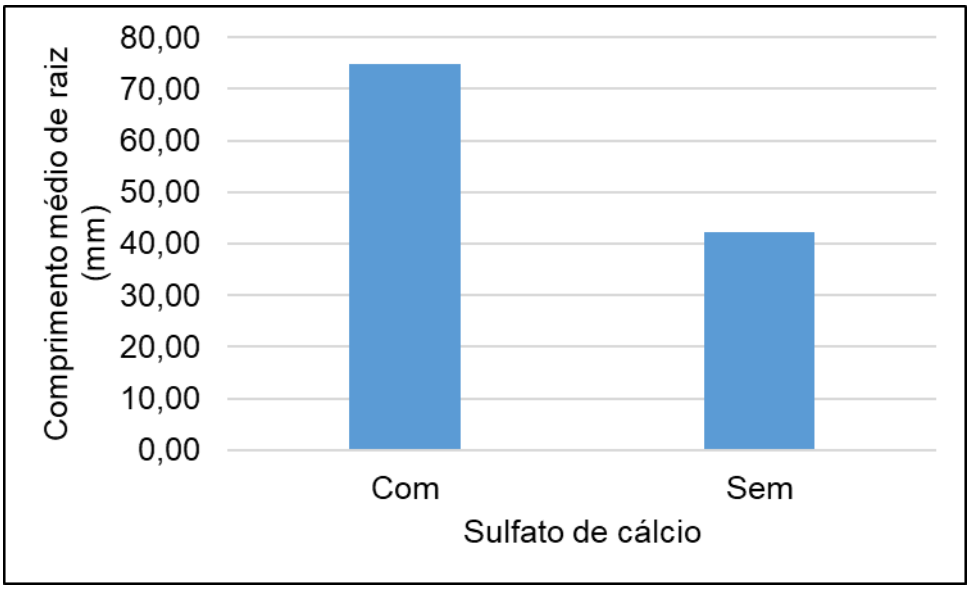
Figura 5- Comprimento médio de raiz de plântulas de soja (mm), em função da presença ou ausência de sulfato de cálcio, na dose de 75 µmol L^{-1} de alumínio, avaliado em tubos Falcon. Cerro Largo, 2025.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na dose de 75 µmol L^{-1} de alumínio (Figura 5), o efeito benéfico do sulfato de cálcio sobre o crescimento radicular torna-se ainda mais evidente. As plântulas cultivadas na presença de sulfato de cálcio apresentaram comprimento médio de raiz de 107,22 mm, valor substancialmente superior ao observado na ausência de sulfato de cálcio, que foi de 50,56 mm. Essa significativa diferença demonstra que, em condições de maior estresse por alumínio, o sulfato de cálcio exerceu papel determinante na mitigação dos efeitos tóxicos desse elemento, possibilitando maior alongamento do sistema radicular. Assim, os resultados indicam que o sulfato de cálcio contribuiu de forma consistente para a manutenção do crescimento das raízes, evidenciando sua importância na proteção do desenvolvimento inicial das plântulas quando submetidas a concentrações mais elevadas de alumínio na solução.

Figura 6- Comprimento médio de raiz de plântulas de soja (mm), em função da presença ou ausência de sulfato de cálcio, na dose de 200 µmol L^{-1} de alumínio, avaliado em tubos Falcon. Cerro Largo, 2025.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na dose de 200 µmol L^{-1} de alumínio (Figura 6), observa-se que a presença de sulfato de cálcio resultou em maior comprimento médio de raiz, com valor de 74,82 mm, enquanto na ausência de sulfato de cálcio a média foi de 42,31 mm. Esse resultado indica que, mesmo sob elevada concentração de alumínio na solução, o sulfato de cálcio contribuiu para atenuar os efeitos tóxicos desse elemento, favorecendo o crescimento radicular das plântulas.

Para o fator alumínio foi seguido o que a Tabela 7 mostra a seguir:

Tabela 7- Coeficientes da regressão exponencial, significância dos coeficientes e significância do modelo via ANOVA do desdobramento, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.

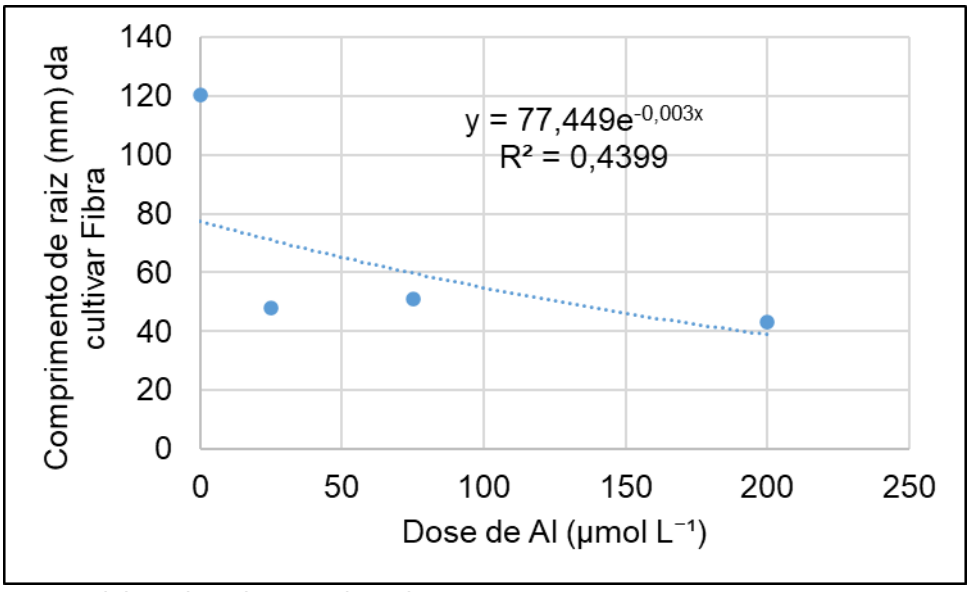
Condição (S.Ca × Cultivar)	Modelo	b_0	b_1	R^2 (%)	p-valor*	p(b_1)**
Com S.Ca + Fibra	Exponencial	95,99	−0,0000	48,17	0,0759	0,0656
Com S.Ca + DonMario	Exponencial	104,96	−0,0000	54,31	0,0685	0,0474*
Sem S.Ca + Fibra	Exponencial	73,21	−0,0000	16,63	0,0000*	0,0272*
Sem S.Ca + DonMario	Exponencial	76,41	−0,0000	43,78	0,0033*	0,0107*

*p-valor do fator Alumínio dentro de S.Cálcio×Cultivar, obtido da ANOVA do desdobramento.
**p-valor associado ao coeficiente b_1 da regressão exponencial.
*Significativo a 5% de probabilidade de erro.
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 7 apresenta os modelos de regressão exponencial ajustados para cada combinação entre sulfato de cálcio (S.Ca) e cultivar no desdobramento da interação tripla, evidenciando que as respostas ao alumínio variaram conforme a condição experimental. Na presença de cálcio, a cultivar Fibra IPRO 64I61 RSF não apresentou efeito significativo do alumínio, uma vez que tanto o p-valor do modelo quanto o do coeficiente b_1 foram superiores a 5%, indicando ausência de relação consistente entre as doses de Al e o comprimento radicular. Para a DonMario 59IX61 RSF I2X, o modelo exponencial apresentou R^2 moderado (54,31%) e significância do coeficiente b_1, embora o p-valor global do modelo tenha sido marginal, sugerindo um efeito do alumínio de menor magnitude e mais discreto nessa condição.

Na ausência de sulfato de cálcio, por outro lado, ambas as cultivares apresentaram regressões exponenciais significativas, com p-valor do modelo e do coeficiente b_1 inferiores a 5%, indicando que o aumento das doses de alumínio promoveu redução do comprimento de raiz. Embora o R^2 tenha sido relativamente baixo para a Fibra (16,63%) e moderado para a DonMario (43,78%), os resultados confirmam que, sem a presença de sulfato de cálcio, o alumínio exerce efeito negativo mais evidente sobre o crescimento radicular, e que a intensidade desse efeito difere entre as cultivares, refletindo respostas fisiológicas distintas ao estresse.

Figura 7- Regressão exponencial do comprimento de raiz da cultivar Fibra IPRO 64I61 RSF em função de doses de alumínio, na ausência de sulfato de cálcio, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.

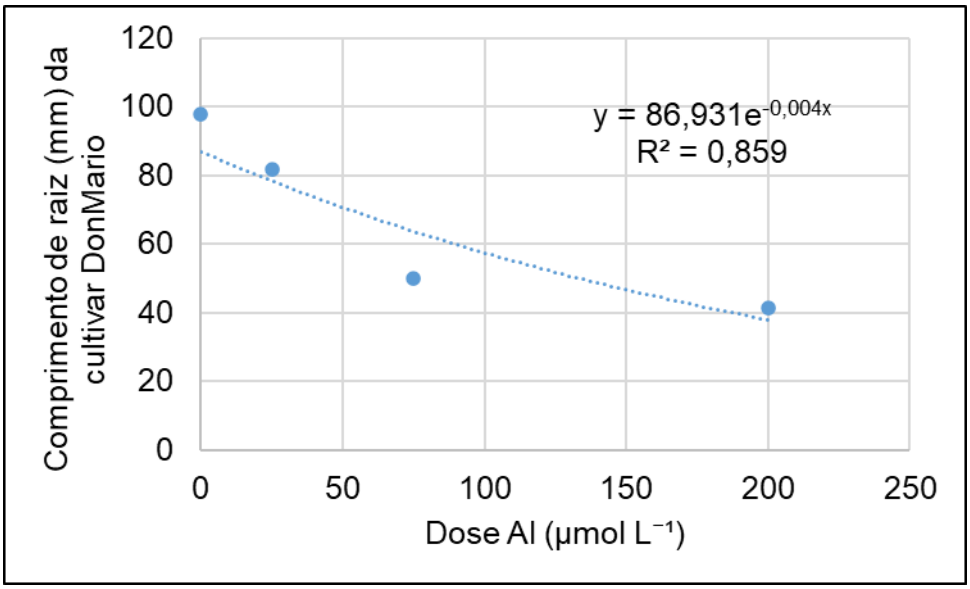


Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na ausência de sulfato de cálcio, o comprimento de raiz da cultivar Fibra IPRO 64I61 RSF apresentou comportamento de queda exponencial em resposta às doses de alumínio, conforme mostra a Figura 7. As médias observadas foram de 120,55 mm na ausência de alumínio, reduzindo-se para 47,87 mm na dose de 25 µmol L^{-1} e mantendo valores mais baixos nas doses subsequentes (51,22 mm a 75 µmol L^{-1} e 43,28 mm a 200 µmol L^{-1}). O modelo exponencial ajustado ($y = 77{,}449e^{-0{,}003x}$; $R^2 = 0{,}4399$) evidencia uma redução acentuada do comprimento radicular já nas menores concentrações de alumínio, seguida da manutenção das raízes em um patamar inferior de desenvolvimento à medida que as doses aumentam.

Esse padrão de queda rápida inicial, com inibição do crescimento radicular logo nas primeiras doses de alumínio, é compatível com o descrito por Kochian *et al*., que destacam que, na ausência de mecanismos de proteção, entre eles a atuação do cálcio na estabilização da parede celular e na manutenção da integridade das membranas, o alumínio exerce efeito imediato sobre a região de alongamento radicular, reduzindo de forma expressiva a taxa de elongação logo após a exposição ao estresse.

Figura 8- Regressão exponencial do comprimento de raiz da cultivar DonMario 59IX61 RSF I2X em função de doses de alumínio, na ausência de sulfato de cálcio, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo, 2025.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na ausência de sulfato de cálcio, o comprimento de raiz da cultivar DonMario 59IX61 RSF I2X apresentou comportamento de queda exponencial em função das

doses de alumínio, conforme evidenciado na Figura 8. As médias foram de 97,72 mm na ausência de alumínio, 81,62 mm a 25 µmol L^{-1}, 49,89 mm a 75 µmol L^{-1} e 41,34 mm na dose de 200 µmol L^{-1}, demonstrando redução progressiva do crescimento radicular à medida que o teor de alumínio aumenta. O modelo exponencial ajustado ($y = 86{,}931e^{-0{,}004}x$; $R^2 = 0{,}859$) indica bom grau de explicação da variação observada, reforçando a tendência de declínio contínuo do comprimento de raízes nessa cultivar sob estresse por alumínio, na ausência de cálcio.

Comparativamente à Fibra IPRO 64I61 RSF, cuja resposta sem cálcio mostrou queda acentuada inicial seguida de estabilização em patamar reduzido, a DonMario apresentou trajetória de redução mais regular ao longo das doses, condizente com o ajuste exponencial obtido. Esse padrão está de acordo com o que descrevem Ryan e Delhaize (2010), ao apontarem que o alumínio inibe progressivamente a elongação radicular ao comprometer processos essenciais na zona de crescimento, como a integridade das membranas, o fluxo iônico e a deposição de componentes da parede celular, resultando em diminuição contínua do crescimento das raízes com o aumento da exposição ao metal.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar o efeito do alumínio, associado ou não à presença de cálcio, sobre a germinação e o crescimento inicial de plântulas de soja das cultivares Fibra IPRO 64I61 RSF e DonMario 59IX61 RSF I2X. De modo geral, verificou-se que o alumínio, nas concentrações utilizadas, não exerceu efeito significativo sobre fatores como o índice de velocidade de germinação, e houve interação tripla no fator germinação.

Por outro lado, o desenvolvimento do sistema radicular mostrou-se sensível à presença de alumínio, sobretudo na ausência de sulfato de cálcio, confirmando que as raízes constituem a principal estrutura afetada na fase inicial de crescimento. Observou-se redução significativa do comprimento de raiz com o aumento das doses de alumínio, com respostas mais severas nos tratamentos sem suplementação cálcica. Nessas condições, a cultivar Fibra apresentou diminuição significativa e manutenção do crescimento radicular em níveis baixos, enquanto a cultivar DonMario exibiu declínio progressivo, com melhor ajuste ao modelo exponencial, evidenciando maior estabilidade de crescimento frente ao incremento das concentrações de alumínio.

Dessa forma, conclui-se que o cálcio desempenhou papel significativo na mitigação dos efeitos tóxicos do alumínio sobre o crescimento radicular, especialmente para a cultivar Fibra, e que o genótipo influencia diretamente a tolerância das plantas ao estresse por alumínio. A cultivar DonMario apresentou desempenho relativamente superior em ambiente sem suplementação de cálcio, indicando maior capacidade de adaptação a condições adversas. Esses resultados reforçam a relevância da escolha adequada de cultivares e do manejo da nutrição cálcica como estratégias essenciais para a implantação e o estabelecimento inicial da cultura da soja em solos ácidos com potencial de toxidez por alumínio.

REFERÊNCIAS

AHN, S. J.; MATSUMOTO, H. **The role of the plasma membrane in aluminum tolerance of plant roots**. Plant Physiology, Rockville, v. 142, n. 3, p. 1019 -1026, 2006.

AZEVEDO NETO, A. D. *et al*. **Effect of aluminum on nutrient uptake and accumulation in sorghum**. Journal of Plant Nutrition, New York, v. 24, n. 7, p. 1075 –1088, 2001.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. *Environmental and Experimental Botany*, v. 48, p. 75–92, 2002.

BEWLEY, J. D.; BLACK, M. *Seeds: physiology of development and germination*. 2. ed. New York: Plenum Press, 1994.

BOJÓRQUEZ-QUINTAL, E. *et al*. **Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils**. Frontiers in Plant Science, Lausanne, v. 8, p. 1-18, 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para análise de sementes*. Brasília: MAPA/ACS, 2009.

CAIRES, E. F. *et al*. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 315-325, 2002.

CAIRES, E. F. *et al*. **Soil acidity and liming management in tropical soils**. Advances in Agronomy, San Diego, v. 112, p. 1-41, 2011.

CAIRES, E. F. *et al*. **Surface application of lime for crop grain production under a no-till system**. Agronomy Journal, Madison, v. 98, n. 4, p. 1048-1054, 2006.

CAMBAÍ SEMENTES. *Portfólio de Soja – Digital 2024*. Santa Maria: Cambaí Sementes, 2024.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. *Sementes: ciência, tecnologia e produção*. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Exportações do agronegócio brasileiro**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2024.

CORRÊA, J. C. *et al*. **Gesso agrícola na melhoria da fertilidade do solo e produtividade das culturas**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 575-584, 2010.

CUMMING, J. R.; TAYLOR, G. J. Mechanisms of aluminum tolerance in plants: an overview. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 22, p. 457–464, 1992.

CUSTÓDIO, A. A. P. *et al*. Estresse por alumínio e por acidez em cultivares de soja. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 313–319, 2002.

CUSTÓDIO, C. C. *et al*. **Efeito do cálcio na germinação de sementes sob estresse por alumínio**. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 683–689, 2002.

DALL'AGNOL, A. **A soja no Brasil: passado, presente e futuro**. Londrina: Embrapa Soja, 2011.

DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology*, v. 107, n. 2, p. 315–321, 1995.

DURESSA, D. *et al*. **Calcium enhances aluminum tolerance in soybean**. Plant and Soil, Dordrecht, v. 346, n. 1–2, p. 347-357, 2011.

EGIELEWA, S. J.; CHIEJINA, N. V.; UGURU, M. I. **Aluminum toxicity effects on germination and seedling growth of soybean**. Journal of Plant Studies, Toronto, v. 6, n. 1, p. 14-22, 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Produção brasileira de soja – Safra 2024/25**. Brasília, 2025.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja em números**. Brasília, 2022.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005.

ERNANI, P. R.; SANTOS, J. C. P.; CANTARELLA, H. Correção da acidez do solo. In: NOVAIS, R. F. *et al*. (org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 301-352.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT statistical database**. Rome, 2019.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977.

FERREIRA, D. F. *et al*. Crescimento inicial de plântulas e sensibilidade diferencial de tecidos vegetais sob estresses químicos. *Revista Brasileira de Agrociência*, v. 24, p. 67–76, 2018.

FERREIRA, M. E.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. *Toxidez de alumínio em culturas anuais*. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006.

FERREIRA, R. P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. **Toxidez de alumínio em plantas**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006.

FOY, C. D. Plant adaptation to mineral stress in problem soils. *Iowa State Journal of Research*, v. 62, n. 4, p. 355–391, 1988.

FRANÇA, M. G. C.; RODRIGUES, F. A.; LAVRES JUNIOR, J. **Aluminum toxicity and oxidative stress in plants**. Plant Physiology and Biochemistry, Paris, v. 122, p. 188-199, 2018.

GAO, Y. *et al*. **Overexpression of GmMATE13 improves aluminum tolerance in soybean**. Plant Science, Amsterdam, v. 336, p. 111-123, 2024.

GOMES, F. A. **Mercado internacional da soja**. São Paulo: Atlas, 2023.

GUO, T. *et al*. **Calcium alleviates aluminum toxicity in soybean roots**. Environmental and Experimental Botany, Oxford, v. 136, p. 64-72, 2017.

HEPLER, P. K. **Calcium: a central regulator of plant growth and development**. The Plant Cell, Rockville, v. 17, n. 8, p. 2142-2155, 2005.

KINRAIDE, T. B. Aluminum enhancement of plant growth in acid rooting media: a case of reciprocal alleviation of toxicity. *Plant Physiology*, v. 99, p. 1465–1470, 1993.

KINRAIDE, T. B. **Three mechanisms for the calcium alleviation of mineral toxicities**. Plant Physiology, Rockville, v. 118, n. 2, p. 513-520, 1998.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 46, p. 237–260, 1995.

KOCHIAN, L. V. *et al*. **Plant adaptation to acid soils**. Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, v. 66, p. 571-598, 2015.

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A. **How do crop plants tolerate acid soils?** Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, v. 55, p. 459-493, 2004.

KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; HOEKENGA, O. A. **The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance**. Plant and Soil, Dordrecht, v. 274, p. 175-195, 2005.

KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; LI, G. Aluminum stress in plants: physiology, molecular biology and genetics. *Plant and Soil*, v. 384, p. 1–24, 2015.

KRZYZANOWSKI, F. C. **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: Embrapa Soja, 2004.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; HENNING, A. A. **Sementes de soja: produção, qualidade e tecnologia**. Londrina: Embrapa Soja, 2018.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F. S.; PONS, T. L. *Plant physiological ecology*. 2. ed. New York: Springer, 2008.

LIU, J. *et al*. **Aluminum toxicity and tolerance mechanisms in plants**. Journal of Integrative Plant Biology, Beijing, v. 60, p. 1–14, 2018.

LIU, J. *et al***. Aluminum-induced oxidative stress and antioxidant responses in soybean**. Plant Physiology and Biochemistry, Paris, v. 45, p. 25-32, 2007.

LIU, K.; ZHENG, L.; WANG, L.; LU, X.; WANG, X.; SHI, L. Comparative proteomic analysis of soybean roots under aluminum stress and calcium mitigation. *Journal of Proteomics*, v. 172, p. 100–112, 2018.

MA, J. F. *et al*. **Calcium alleviates aluminum toxicity by preventing aluminum uptake in plants**. Plant Physiology, Rockville, v. 130, n. 4, p. 1991-1997, 2002.

MA, J. F. **Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants**. Plant and Cell Physiology, Oxford, v. 41, n. 4, p. 383-390, 2005.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, v. 2, n. 2, p. 176–177, 1962.

MARCOS-FILHO, J. *Fisiologia de sementes de plantas cultivadas*. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015.

MARSCHNER, P. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2012.

MENOSSO, O. G.; COSTA, J. A.; ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Tolerância de genótipos de soja ao alumínio em solução. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 11, p. 2157–2166, nov. 2000.

MIGUEL, P. S. B. *et al*. **Acidez e gessagem em solos tropicais**. Lavras: UFLA, 2010.

MIYASAKA, S. C. *et al*. Mechanisms of aluminum tolerance in plants. In: *PROCEEDINGS OF THE WORKSHOP ON PLANT–SOIL INTERACTIONS AT LOW pH*. 1989. p. 123–128.

NEUMAIER, N. *et al*. **Estádios de desenvolvimento da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2000.

ORIGEM DA PALAVRA. Germinar. 2011. Disponível em: https://origemdapalavra.com.br. Acesso em: 12 abr. 2025.

PESKE, S. T.; VILLELA, F. A.; MENEGHELLO, G. E. *Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos*. 3. ed. Pelotas: UFPel, 2019.

PIRES, M. C. *et al*. C**alcium sulfate improves aluminum tolerance in soybean**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 48, n. 9, p. 1203-1211, 2013.

RAHMAN, A. *et al*. **Sulfur-mediated alleviation of aluminum toxicity in plants**. Plant Physiology and Biochemistry, Paris, v. 132, p. 318–329, 2018.

RANGEL, A. F. *et al*. **Genetic variability for aluminum tolerance in soybean**. Euphytica, Dordrecht, v. 214, p. 1-13, 2018.

RENGEL, Z. Role of calcium in aluminium toxicity. *New Phytologist*, Lancaster, v. 122, n. 3, p. 499–513, 1992.

RENGEL, Z. **Role of calcium in aluminum toxicity**. New Phytologist, Oxford, v. 121, n. 4, p. 499-513, 1992.

RENGEL, Z.; PANDA, S. K. **Aluminum toxicity and tolerance in plants**. Journal of Plant Physiology, Stuttgart, v. 261, p. 153-158, 2021.

RENGEL, Z.; ZHANG, W. H. Role of dynamics of intracellular calcium in aluminium toxicity syndrome in plants. *New Phytologist*, Oxford, v. 159, n. 2, p. 295–300, 2003.

RIBEIRO, C. *et al*. Tolerância de cultivares de soja ao alumínio em condições de acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, 2020.

RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminum tolerance in plants through regulation of organic acid exudation. *Trends in Plant Science*, v. 15, p. 489–497, 2010.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2015.

SILVA, L. F. *et al*. Desempenho de cultivares de soja em solos ácidos com diferentes níveis de saturação por alumínio. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 50, n. 3, p. 1–8, 2020.

SILVA, S. *et al*. **Aluminum stress in soybean: physiological and biochemical responses**. Acta Physiologiae Plantarum, Heidelberg, v. 34, p. 1295–1304, 2012.

STEINER, F. *et al*. **Aluminum toxicity in crop plants**. Agronomy, Basel, v. 11, n. 3, p. 1-20, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TIECHER, T. *et al*. **Soil acidity management in no-tillage systems**. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 174, p. 29-38, 2018.

TOLRA, R. *et al*. **Aluminum tolerance in plants: mechanisms and management**. Plant Science, Amsterdam, v. 177, n. 2, p. 131-137, 2009.

VASCONCELOS, R. L.; FURTINI NETO, A. E.; FAQUIN, V. **Aluminum toxicity in plants**. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 40, n. 2, p. 124-136, 2016.

WANG, Y. *et al*. **GmMATE13 confers aluminum tolerance in soybean**. Plant Biotechnology Journal, Oxford, v. 20, n. 5, p. 876-889, 2022.

WANG, Y. *et al*. **Hydrogen sulfide improves aluminum tolerance in soybean**. Plant Physiology and Biochemistry, Paris, v. 144, p. 153-162, 2019.

WWF – World Wide Fund for Nature. **The growth of soybean production**. Brasília, 2014.

YANG, Z. M. *et al*. **Aluminum-induced citrate secretion in soybean roots**. Plant Physiology, Rockville, v. 126, n. 4, p. 1579-1587, 2001.

YIN, L. *et al*. **Calcium-mediated enhancement of aluminum tolerance in soybean**. Plant Growth Regulation, Dordrecht, v. 74, n. 3, p. 245–256, 2014.

ZHANG, Y. *et al*. Aluminum-induced root growth inhibition and its mechanisms in plants: a review. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 18, p. 1403–1412, 2019.

ZHOU, Q. *et al*. **Calcium improves germination and seedling growth under aluminum stress**. Journal of Plant Nutrition, New York, v. 37, n. 14, p. 2201-2215, 2014.