

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INTERAÇÃO ENTRE ALUMÍNIO E MANGANÊS NO  
CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE MUDAS DE CANA-  
ENERGIA E CANA-DE-AÇÚCAR**

**Diego Correia Sodré  
Engenheiro Agrônomo**

**2022**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INTERAÇÃO ENTRE ALUMÍNIO E MANGANÊS NO  
CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE MUDAS DE CANA-  
ENERGIA E CANA-DE-AÇÚCAR**

**Discente: Diego Correia Sodré**

**Orientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta**

*Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).*

S679i

Sodré, Diego Correia

Interação entre alumínio e manganês no crescimento e nutrição de mudas de cana-energia e cana-de-açúcar / Diego Correia Sodré. -- Jaboticabal, 2022

80 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Jairo Osvaldo Cazetta

1. Saccharum officinarum. 2. Agrocombustíveis. 3. Plantas Efeito do alumínio. 4. Plantas Efeito do manganês. 5. Interação genótipo-ambiente. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: INTERAÇÃO ENTRE ALUMÍNIO E MANGANÊS NO CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE MUDAS DE CANA-ENERGIA E CANA-DE-AÇÚCAR

**AUTOR: DIEGO CORREIA SODRÉ**

**ORIENTADOR: JÁIRO OSVALDO CAZETTA**


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JÁIRO OSVALDO CAZETTA (Participação Virtual)  
Departamento de Tecnologia / FCAV UNESP Jaboticabal

p/   
Prof. Dr. DANIEL PEREIRA PINHEIRO (Participação Virtual)  
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) / Capanema/PA

p/   
Prof. Dr. CÉSAR MARTORELI DA SILVEIRA (Participação Virtual)  
CTA / FCAV / UNESP - Jaboticabal

p/   
Prof. Dr. JESSIVALDO RODRIGUES GALVÃO (Participação Virtual)  
Departamento de Solos-Universidade Federal Rural da Amazônia / Belém / PA

p/   
Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 18 de outubro de 2021

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**DIEGO CORREIA SODRÉ** – natural da cidade de Belém, Estado do Pará, nasceu no dia 17 de setembro de 1991. Iniciou o curso de graduação em Agronomia na Universidade Federal Rural da Amazônia – Campus de Belém – UFRA, no ano de 2010. Durante o período de graduação foi estagiário no programa de educação tutorial – PET Agronomia, realizando diversas atividades no eixo pesquisa-ensino-extensão, assim como atividades técnico-científicas no departamento de solos da universidade. Em 2015, conclui o curso de Agronomia. Em 2015, iniciou o curso de Mestrado junto ao programa pós-graduação em Agronomia da UFRA de Belém, concluindo em julho de 2017. Em agosto de 2017, iniciou o curso de Doutorado em Agronomia, pelo Programa de Ciência do Solo, na Faculdade de ciências agrárias e veterinárias-Unesp, Campus de Jaboticabal.

### **AGRADEÇO**

*A Deus hoje e sempre ter iluminado meus caminhos e estar ao meu lado nesses anos em busca deste tão almejado título.*

### **DEDICO**

*À minha mãe Ana Claudia Lopes Correia, que foi muito mais que uma mãe, foi uma amiga e meu porto seguro psicológico para todo os momentos.*

### **OFEREÇO**

*À minha tia/madrinha Edilene Gonzaga Sodré, por todo apoio financeiro e muitos conselhos durante toda minha vida estudantil, pois sem a mesma nada disso teria sido possível.*

### **HOMENAGEIO**

*À minha querida e já falecida avó Dalva Lopes Corrêa. Foi a pessoa que sempre quis que seus netos fossem “doutores” ou seja, formados, e mesmo em dificuldades devido a seu câncer, nunca deixou de nos amar e sonhar com um excelente futuro para nós.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a DEUS, pelo dom da vida e por ter me ajudado a segurar os fardos pesados nos momentos que mais precisei durante este período.

À FCAV/UNESP, que é a realização concreta de um sonho/objetivo, ao Departamento de Tecnologia e ao programa de Ciência do Solo, pela oportunidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta, por todos os conhecimentos passados e o apoio durante a realização da pesquisa.

Ao técnico do laboratório de análise de plantas Senhor Carlos por toda paciência e dedicação nos momentos de realizar e ensinar a manipular os equipamentos.

Aos Professores, Dr<sup>a</sup>. Mara Cristina Pessôa da Cruz, Dr. Renato de Mello Prado, Dr. Afonso Lopes pela amizade e oportunidade de ser seu aluno.

Aos colegas de laboratório, Bruno, Laura, Maria, Leonardo, Bianca e Paula, por toda ajuda e companheirismo dentro e fora do ambiente de trabalho.

À empresa GRANBIO pela parceria que resultou na disponibilidade do material Vertex para realização deste trabalho.

À república Caboré formada pelos amigos Isaias, Jonathan e Paulo, pelos momentos de convivência e pelo companheirismo morando juntos.

Aos amigos de Curso que a Unesp me proporcionou: Antônio, Gelza, Michael (Shaolin), que levarei para vida toda, e muitos outros que fizeram parte da minha história em Jaboticabal.

Aos meus pais, Pedro e Claudia, que apesar das dificuldades, sempre acreditaram em mim e estiveram ao meu lado.

Aos meus irmãos Saulo, Debora, Dayana e Glauber, pelo companheirismo, amizade e por sempre estarem no meu coração;

Aos meus avós Varlindo e Floripes, por proporcionarem uma criação digna e formada em cima de valores e princípios, por estarem ao meu lado em todos os momentos e por sempre desejarem o melhor para mim;

Aos meus tios Heliomar, Edilene e Alexandre, porque tudo que sou hoje devo a cada um de vocês. Em primeiro lugar agradeço ao meu tio Heliomar pela amizade, por sempre estar pronto a ajudar, em tudo durante minha jornada no ensino fundamental e médio. Agradeço de coração à minha tia e madrinha Edilene, por sempre acreditar em mim, me ajudar de diversas formas. E por fim, e não menos importante, agradeço imensamente a meu tio Alexandre por sempre acreditar em meu potencial, pelos puxões de orelha e por sempre estar presente, me incentivando a sempre estudar.

Aos meus familiares tios, primos, cunhada e sobrinhos, pelo amor, compreensão, e por acreditarem nos meus estudos, sempre buscando me dar forças;

À minha querida e amada namorada Carmen Andrea por todo suporte, ajuda e colaboração no decorrer das etapas de desenvolvimento e finalização de meu trabalho, além de sua amizade e amor que me acolheu e me auxiliou de todas as formas possíveis, nunca medindo esforços para me amparar e me apoiar nos momentos de dificuldades pessoais, psicológicas e financeiras, a amo e agradeço muito.

A todas as pessoas que confiaram em mim e me auxiliaram a transpor os obstáculos dessa trajetória para que pudesse alcançar esse objetivo



## SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iii
ABSTRACT .....	iv
LISTA TABELAS .....	v
LISTA FIGURAS .....	vi
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1. Introdução.....	1
2. Revisão De Literatura .....	2
3. Referências Bibliográficas .....	9
CAPÍTULO 2 - INTERAÇÃO DA TOXICIDADE DE ALUMÍNIO E MANGANÊS SOBRE OS ASPECTOS DE MATÉRIA SECA E NUTRICIONAIS EM CANA-DE- AÇÚCAR.....	15
1. Introdução.....	16
2. Material e Métodos .....	17
2.1. Local do experimento .....	17
2.2. Cana-de-açúcar utilizada .....	17
2.3. Instalação e condução do experimento.....	17
2.4. Variáveis analisadas .....	18
2.5. Análises estatística.....	19
3. Resultados e Discussão .....	19
4. Conclusão.....	40
5. Referências Bibliográficas .....	41
CAPÍTULO 3 - BIOMETRIA E ESTADO NUTRICIONAL DE MUDAS DE CANA- ENERGIA E CANA-DE-AÇÚCAR EM CONDIÇÕES DE ESTRESSE POR ALUMÍNIO.....	46
1. Introdução.....	47

2. Materiais e Métodos.....	48
3. Resultados e Discussão .....	52
4. Conclusão.....	58
5. Referências Bibliográficas .....	59
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
APÊNDICE .....	63
APÊNDICE A .....	64

## INTERAÇÃO ENTRE ALUMÍNIO E MANGANÊS NO CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE MUDAS DE CANA-ENERGIA E CANA-DE-AÇÚCAR

**RESUMO** – A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima utilizada para a produção de açúcar e etanol no Brasil, o maior produtor mundial desta cultura. As toxicidades por alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) e manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ) são duas das principais restrições à produção de culturas em solos ácidos. Embora se conheça relativamente bem o efeito tóxico desses elementos isoladamente, pouco se sabe sobre o efeito interativo deles. Além disso, a maioria dos estudos de toxicidade de Al e Mn são realizados com genótipos de cana-de-açúcar tradicionais, sendo escassos estudos sobre toxicidade de Al e Mn em genótipos de cana-energia. Portanto, na presente tese foram desenvolvidos experimentos com mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) e cana-energia (Vertex 9 e Vertex 2), nas condições de hidroponia alternativa adaptado em casa de vegetação com o objetivo verificar se a toxicidade de Al e Mn agem de forma independente ou de forma interativa sobre aspectos da nutrição nitrogenada e sobre o crescimento das plantas. Para isso foram desenvolvidos dois experimentos. No primeiro avaliou-se a interação fitotóxica do  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  em mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000), e constou de um esquema fatorial  $2 \times 5$ , sendo 2 níveis de Al (presença e ausência), combinados com 5 níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  (0, 200, 400, 600, 800  $\text{mg L}^{-1}$ ). O segundo experimento constou de um esquema fatorial  $3 \times 2$ , no qual as mudas dos 3 genótipos (IACSP95-5000, Vertex 9 e Vertex 2) foram submetidas a 2 níveis de Al (ausência e presença de 60  $\text{mg L}^{-1}$ ). Ambos os experimentos foram instalados e conduzidos no delineamento inteiramente casualizado, com 4 repetições. Transcorrido 50 dias da aplicação dos tratamentos, foram avaliados os efeitos dos mesmos sobre as variáveis biométricas das plantas, o teor, o acúmulo e as eficiências nutricionais (absorção, translocação e utilização) de nitrogênio para ambos os experimentos. No primeiro experimento ainda foi avaliado o efeito dos tratamentos sobre os teores de fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio. Observou-se efeito significativo ( $p > 0,01$ ) para interação  $\text{Al}^{3+} \times \text{Mn}^{2+}$  na maioria das variáveis avaliadas, sendo que o efeito fitotóxicos da interação é maior que a soma individual dos efeitos. Os efeitos fitotóxicos causados pela interação dos metais foram prejudiciais ao desenvolvimento das mudas de cana-de-açúcar, com destaque para teor, acúmulo e eficiência de utilização de nitrogênio que foram drasticamente reduzidos. A cana-energia apresentou maior tolerância que a cana-de-açúcar quando submetidas ao mesmo nível de alumínio do sistema. somente a variável eficiência de utilização de N a cana-de-açúcar foi mais eficaz que os de cana-energia quando submetidas a ausência de alumínio (Al0)

**Palavras-chave:** Estresse abiótico, genótipo, IACSP5000, *Saccharum spp*, Vertex 2, Vertex 9

## ALUMINUM AND MANGANESE INTERACTION ON THE GROWTH AND NUTRITION OF ENERGY CANE AND SUGAR CANE SEEDLINGS

**ABSTRACT** – Sugarcane is the main raw material used to produce sugar and ethanol in Brazil, the world's largest producer of this crop. Aluminum ( $\text{Al}^{3+}$ ) and manganese ( $\text{Mn}^{2+}$ ) toxicities are two of the main constraints to crop production in acidic soils. Although the toxic effect of these elements in isolation is relatively well known, little is known about their interactive effect. In addition, most studies of Al and Mn toxicity are carried out with traditional sugarcane genotypes, with few studies on Al and Mn toxicity in energy cane genotypes. Therefore, two experiments were carried out with sugarcane seedlings (IACSP95-5000) and energy cane (Vertex 9 and Vertex 2), under alternative hydroponics conditions adapted in a greenhouse, to verify if Al and Mn toxicity act independently or interactively on aspects of nitrogen nutrition and plant growth. The first experiment evaluated the phytotoxic interaction of  $\text{Al}^{3+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$  in sugarcane seedlings (IACSP95-5000), using a completely randomized 2x5 factorial scheme design, with 2 levels of  $\text{Al}^{3+}$  (presence and absence), combined with 5 levels of  $\text{Mn}^{2+}$  (0, 200, 400, 600, 800  $\text{mg L}^{-1}$ ). The second experiment consisted of a 3x2 factorial scheme, in which the seedlings of the 3 genotypes (IACSP95-5000, Vertex 9 and Vertex 2) were submitted to 2 levels of  $\text{Al}^{3+}$  (absence and presence, 60  $\text{mg L}^{-1}$ ). Both experiments were installed and conducted in a completely randomized design, with 4 replications. After 50 days, treatment effects on biometric variables such as content, accumulation, and nutritional efficiencies (absorption, translocation, and utilization) of nitrogen were evaluated for both experiments. In the first experiment, was also evaluated the effect on phosphorus, potassium, sulfur, calcium, and magnesium was also evaluated. A significant effect ( $p>0.01$ ) was observed for  $\text{Al}^{3+} \times \text{Mn}^{2+}$  interaction in most of the variables evaluated, and the phytotoxic effect of the interaction is greater than the individual sum of the effects. The phytotoxic effects caused by the interaction of metals were harmful to the development of sugarcane seedlings, with emphasis on nitrogen content, accumulation, and efficiency of use, which were drastically reduced. The energy cane showed greater tolerance than the sugar cane when submitted to the same level of aluminum in the system. only the variable N utilization efficiency in sugarcane was more effective than energy cane when subjected to the absence of aluminum (Al0)

**Keywords:** Abiotic stress, genotype, IACSP5000, *Saccharum spp*, Vertex 2, Vertex 9

## LISTA TABELAS

### CAPÍTULO 2

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância das variáveis massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR), em relação aos tratamentos utilizados no experimento.....20

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância do teor e acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na parte aérea e raiz, em relação aos tratamentos utilizados no experimento.....22

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância das eficiências nutricionais (absorção, translocação e utilização) dos nutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), em relação aos tratamentos utilizados no experimento.....23

### CAPÍTULO 3

**Tabela 1.** Características da cana-energia. Fonte: GranBio Investimentos S.A. ....49

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância das variáveis de altura de planta relativa (AP), diâmetro de colmo (DC), área foliar de planta (AFP), volume de raiz (VR), e relação parte aérea / raiz (P/R) em relação aos tratamentos utilizados no experimento.....52

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância das variáveis de teor de nitrogênio na parte aérea (Teor N Pa), teor de nitrogênio na raiz (Teor N Ra), acúmulo de nitrogênio na parte aérea (Ac. N Pa), acúmulo de nitrogênio na raiz (Ac. N Ra), eficiência de absorção de nitrogênio (Ef. Absor), eficiência de translocação de nitrogênio (Ef. Trasl) e eficiência de utilização de nitrogênio (Ef. Util) em relação aos tratamentos utilizados no experimento.....55

## LISTA FIGURAS

### CAPÍTULO 2

- Figura 1.** Massa seca da parte aérea (MSPA) de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de alumínio ( $Al^{3+}$ ) (A) e níveis de manganês ( $Mn^{2+}$ ) (B) em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.....20
- Figura 2.** Massa seca de raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a interação entre presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....21
- Figura 3.** Teor e acúmulo de nitrogênio (N) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....24
- Figura 4.** Teor e acúmulo de nitrogênio (N) na raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....26
- Figura 5.** Eficiências de absorção (A), translocação (B) e utilização (C) de nitrogênio (N) de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....27
- Figura 6.** Teor e acúmulo de fósforo (P) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....29
- Figura 7.** Teor e acúmulo de fósforo (P) na raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....29

- Figura 8.** Eficiências de absorção (A), translocação (B, C) e utilização (D, E) de fósforo de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....31
- Figura 9.** Teor e Acúmulo de potássio (K) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....32
- Figura 10.** Teor e Acúmulo de potássio (K) na raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....33
- Figura 11.** Eficiências de absorção (A), translocação (B) e utilização (C) de potássio (K) de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....34
- Figura 12.** Teor e acúmulo de enxofre (S) parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....35
- Figura 13.** Teor e acúmulo de enxofre (S) na raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....36
- Figura 14.** Eficiências de absorção (A) e utilização (B) de enxofre (S) de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.....37
- Figura 15.** Acúmulo de cálcio (Ca) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar. ....38

**Figura 16.** Teor e acúmulo de magnésio (Mg) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.....39

### **CAPÍTULO 3**

**Figura 1.** Valores relativos de altura de planta, diâmetro de colmo, área foliar de planta, volume de raiz e relação parte aérea / raiz de três genótipos de cana (G1 = energia tipo 2; G2 = energia tipo 9 e G3 = açúcar (IACSP95-5000)) submetidas à ausência ou presença de  $Al^{3+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado. ....54

**Figura 2.** Eficiências (absorção, translocação e utilização), teor e acúmulo de nitrogênio (N) na parte aérea e raiz de três genótipos de cana (G1 = energia tipo 2; G2 = energia tipo 9 e G3 = açúcar (IACSP95-5000)) submetidas à ausência ou presença de  $Al^{3+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado.....57

### **APÊNDICE**

**Figura 1A.** Sistema radicular de cana-energia e cana-de-açúcar submetidas a à ausência ou presença de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado.....65



## CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

### 1. Introdução

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das mais importantes no cenário socioeconômico brasileiro, por ser a principal matéria-prima utilizada pela indústria para a produção de açúcar e etanol. O Brasil se destaca como um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, com produção na safra de 2020/2021 de aproximadamente 654 milhões de toneladas em 8,6 milhões de hectares. O estado de São Paulo é o maior produtor, com 4,4 milhões de hectares de área colhida, cuja produção é destinada a fabricação de açúcar e etanol (CONAB, 2021).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2016), o consumo de etanol produzido a partir da cana-de-açúcar no mercado global foi de 28,79 bilhões de litros em 2015, com um crescimento estimado de 50 bilhões de litros até 2030. O Brasil se destaca no mundo por sua liderança na produção e uso de biocombustíveis, mantendo-se como um dos principais fornecedores, devido ao déficit entre a oferta e a demanda mundial desse produto (Neves e Kalaki, 2016; EPE, 2018). Nesta perspectiva, observa-se crescente utilização de etanol, visando produção maior de biomassa de cana-energia por ser uma planta de fácil adaptabilidade a solos com baixa fertilidade e com custo de produção menor em comparação a cana-de-açúcar (Nunes Junior, 2016).

Apesar da boa perspectiva de demanda de açúcar e etanol para os próximos anos, fatores abióticos relacionados a causas edafoclimáticas respondem por grande parte do estresse para a planta, destacando-se a toxicidade por alumínio (Al), que em plantas é considerado um dos principais fatores que limitam a produtividade vegetal na agricultura (Zhou et al., 2015; Maia et al., 2018; Yan et al., 2019). No caso da toxicidade por manganês (Mn), ele aparece inicialmente em folhas jovens, caracterizando-se por clorose marginal. A elevada disponibilidade de Mn e de Al comumente ocorre em solos com valores de pH abaixo de 5,5, condição na qual geralmente a maioria das plantas tende a acumular níveis tóxicos desses elementos em seus tecidos, afetando seu crescimento (Guo et al., 2015; Yang et al., 2015).

Frequentemente, níveis tóxicos de alumínio e de manganês nos solos ocorrem simultaneamente, afetando o crescimento e a produtividade das plantas. Entretanto, a existência de interação entre a ação tóxica do Al e do Mn é ainda pouco estudada.

Existem evidências de que sob condições de baixo pH, o Al pode diminuir o acúmulo de Mn ou retardar seus sintomas de toxicidade. No entanto, os efeitos do Mn na toxicidade do Al variam com espécies de plantas e condições experimentais (Khan e McNeilly, 1998; Culvenor, 1985; Taylor et al., 1998; Blair e Taylor, 1997). Assim é necessário promover e investigar se há interação entre a toxicidade de alumínio e manganês e seus mecanismos em plantas superiores. Desse modo, objetivou-se avaliar se existe relação de interação entre  $Al^{3+}$  e doses de  $Mn^{2+}$ , com a finalidade de observar a interferência no desenvolvimento inicial e nutrição de mudas de cana-de-açúcar, bem como verificar se existe resposta diferenciada entre cana-de-açúcar e cana-energia.

## 2. Revisão De Literatura

A cana-de-açúcar foi descrita primeiramente por Linneu (1753), pertence à família Poaceae, gênero *Saccharum* (Brumbley et al., 2009). Por ser uma planta de clima tropical, a faixa principal de sua distribuição geográfica está entre as latitudes 35° norte e 35° sul, sendo o Brasil um dos seus maiores produtores, com produção de 668.747.323 toneladas segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017).

A cana é uma planta C4 de alta produtividade, que se adapta às condições de alta intensidade luminosa, elevadas temperaturas, e que necessita de grandes quantidades de água (Altpeter e Oraby, 2010; Segato et al., 2006). A planta cresce em forma de touceira, sendo sua parte aérea formada por colmos, folhas, inflorescências e frutos, enquanto a subterrânea por raízes e rizomas. As raízes são fasciculadas, sendo que 85% delas encontram-se nos primeiros 50 cm e aproximadamente 60% entre os primeiros 20-30 cm de profundidade, havendo pequenas variações nessa porcentagem dependendo, sobretudo, das variedades (Mozambani et al., 2006).

A cana é cultivada em cerca de 26 milhões de hectares, em mais de 109 países, com colheita mundial de 1,94 bilhões de toneladas (FAO, 2021). O aumento do

interesse por esta cultura se deve à necessidade de diminuir o consumo e a dependência de combustíveis fósseis, sendo a cana uma das melhores alternativas para o setor de biocombustíveis pelo seu grande potencial na produção de etanol e subprodutos (Altpeter e Oraby, 2010). Por esse motivo, existe significativa expansão em sua área cultivada, diretamente relacionada a junção de vários fatores de produção, como: variedades melhoradas, tratamentos fitossanitários, práticas culturais e utilização de corretivos e fertilizantes (Vitti et al., 2006). No mundo, as unidades produtoras vêm buscando operar com maior eficiência por meio da produção de etanol originário de fontes renováveis. No Brasil, as grandes áreas cultiváveis e as condições edafoclimáticas adequadas para o cultivo de cana-de-açúcar, tornam o País em um importante exportador dos produtos oriundos dessa cultura (CONAB, 2021).

A indústria da cana-de-açúcar também tem buscado cada vez mais a eficiência energética gerando energia elétrica pelo uso do bagaço como combustível para mover os geradores, o que pode diminuir custos de produção e ainda agregar sustentabilidade para a atividade. A produção movimenta a economia do Brasil em todos os aspectos desde geração de empregos até a importância elevada do uso de defensivos agrícolas. De acordo com as estatísticas da FAO (2021), as culturas de milho, trigo, arroz e batata são ricamente produzidas em todo o mundo; entretanto, a cana-de-açúcar, cresce predominantemente em regiões tropicais e subtropicais, aumentando fortemente a importância da produção no Brasil, que se encontra inteiramente ligada ao uso desta matéria prima para produção de biocombustíveis (CONAB, 2021).

No Brasil prepondera a energia elétrica gerada através de hidroelétricas, mas há o problema de flutuação na produção devido ao período de seca. Tendo em conta que a energia termoelétrica, gerada pela queima de petróleo, que complementa a queda da produção das hidroelétricas é muito onerosa e poluidora, a energia renovável de biomassa produzida tanto pela queima de bagaço quanto pela produção de etanol de segunda geração tem sido cada vez mais levadas em consideração. Por isso, aumentou o interesse pelo bagaço, bem como seu valor no mercado, impulsionando pesquisas relacionadas com o aumento do teor e qualidade energética da fibra dessa matéria prima (Leal et al., 2013; Silva et al., 2019). Essa demanda por fibra

impulsionou melhoramentos genéticos para a obtenção de variedades chamadas de cana-energia ou cana fibra que produzem mais fibra que as variedades tradicionais de cana-de-açúcar, mas ainda faltam estudos que informem sobre seu comportamento sob fatores estressantes e aspectos nutricionais.

A cana-energia foi geneticamente modificada para ser mais produtiva na fabricação de biocombustíveis, bioquímicos e geração de energia renovável. Essas variedades possuem características diferentes da cana tradicional: folhas mais estreitas, caule mais fino e perfilhamento mais profuso. A cana-energia tem grande rusticidade, pois seu vigoroso sistema radicular e presença de rizomas lhe confere maior tolerância ao estresse hídrico e maior eficiência no uso de nutrientes (Matsuoka et al., 2014; Nunes Jr, 2016). Na cana-energia, a partição do carbono é mais orientada para a produção de fibras do que para o acúmulo de açúcares solúveis, resultando em quantidade de biomassa maior do que 300 toneladas por hectare (Abreu et al., 2020). Portanto, trata-se de uma cana mais resistente e menos exigente em relação à cana-de-açúcar sacarina (Oliveira, 2016).

A possibilidade de grande demanda por cana-energia, induziu o interesse pelo desenvolvimento de genótipos para esse fim. Há pelo menos duas empresas de melhoramento genético (GRANBIO e VIGNIS) com variedades Vertix e Vignis (VG), que investem na produção de cana-energia e confirmam que além de possuir o dobro do teor de fibra, ainda conta com uma maior longevidade, sendo possível realizar dez cortes em uma mesma lavoura, além de possuir menos exigência em relação ao solo e maior resistência a pragas e doenças.

Contudo, em qualquer lugar onde as plantas cresçam, existirão fatores de estresses que limitarão, em maior ou menor grau, o seu desenvolvimento. O stress provoca alterações funcionais e prejudica as condições ótimas para a vida vegetal. Os organismos respondem de forma diferente a tais condições, sendo que muitas vezes os sintomas podem não ser visíveis de imediato (Larcher, 2006; Pandey et al., 2017). As perturbações ambientais podem se dividir em estresse abiótico, relacionado principalmente aos fatores edafoclimáticos, e estresse biótico, causado por organismos vivos (competição por recursos vitais entre plantas, alelopatia, parasitismo), microrganismos (fungos, bactérias e vírus), animais (herbivoria, pisoteio) e pela ação

do homem (poluição, compactação do solo, uso de agroquímicos, fogo, entre outros) (Larcher, 2006; Pandey et al., 2017).

Do ponto de vista sustentável, o empenho pelo aumento da produtividade das culturas na agricultura moderna requer o conhecimento cada vez maior das influências que o meio ambiente causa nas plantas cultivadas, especialmente nas novas variedades, e sua comparação com as variedades tradicionais. A proteção eficaz das culturas exige que se tenha conhecimento apropriado sobre o efeito isolado e interativo dos estresses que podem acometer as plantas, bem como a detecção precoce e precisa dos diferentes tipos de estresses abióticos, de modo a permitir a utilização das estratégias de controle de maneira eficaz e sustentável (Behmann et al., 2015).

Um fator abiótico muito importante presente na maioria dos solos brasileiros é o alumínio (Al) que é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre. Este é um metal branco prateado, com número atômico 13, densidade relativamente baixa ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ) e é um bom condutor de calor e eletricidade. Na maioria das condições, o Al se encontra em forma sólida e não tóxica para as plantas (Ma, 2007; Jones e Ryan, 2017). No solo, o Al está presente em várias formas minerais, predominantemente como alumino-silicatos ou óxidos insolúveis e outras formas precipitadas como jurbanita (R'bia et al., 2011). No entanto, em solos muito ácidos, a dissolução do mineral aumenta devido à transformação do Al em íons com elevada carga iônica (+3) o que, aliado a um pequeno raio cristalino, confere ao mesmo uma elevada reatividade, tornando-o muito solúvel e tóxico para as plantas (Jones e Ryan, 2017; Vitorello et al., 2005).

Quando o pH do solo está abaixo de 5,5, argilas de aluminossilicato e minerais de hidróxido de alumínio liberam alumínio-hidroxi cátions e  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , por dissolução e forma a espécie mononuclear  $\text{AlOH}_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , e  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ , e complexos solúveis com ligantes inorgânicos tais como sulfato e fluoreto,  $\text{AlF}_2^+$ ,  $\text{AlF}_3^+$ , e  $\text{Al}(\text{SO})_4^-$  (Panda e Matsumoto, 2007; Krstic et al., 2012). As espécies químicas mais tóxicas de Al são  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  (Kinraide, 1998).

A fitotoxicidade do alumínio tem como principal sintoma a inibição do alongamento da raiz devido à indução de mudanças na estrutura do tecido e processos bioquímicos que afetam a absorção de água e nutrientes (Butare et al.,

2011). Há vários possíveis mecanismos responsáveis por essa inibição, no entanto, o mecanismo exato pelo qual o Al causa inicialmente a inibição do alongamento da raiz não foi determinado (Freitas et al., 2017; Ma, 2007). O  $Al^{3+}$  pode interagir com a parede celular da raiz, romper a membrana plasmática e inibir os processos de transporte na membrana plasmática. Pode inibir a atividade enzimática e a replicação do DNA, interromper as vias de transdução de sinal, inibir a formação de microtúbulos e causar disfunção mitocondrial. O alumínio também pode interagir com a homeostase do Ca dentro da célula da raiz e outros constituintes simplásticos, como a calmodulina (Ma, 2007).

Tamas et al. (2006) estabeleceram que o  $Al^{3+}$  pode inibir a absorção de água pelas raízes e iniciar o estresse hídrico. Arp e Strucel (1989) também relataram que Al inibe a absorção de água em *Picea mariana* Britton em 7 dias de tratamento utilizando Al. O processo de inibição do crescimento da raiz e do broto é a mais precoce mudança morfológica induzida por Al (Mossor-Pietraszewska, 2001). A redução no sistema radicular devido à toxicidade foi observada em muitas culturas, como grama verde (Panda et al., 2003), arroz (Macêdo et al., 2008; Awasthi et al., 2017), cevada (Tamas et al., 2006), *Jatropha curcas* L. (Tistama et al., 2012) e milho (Souza et al., 2016).

Segundo Ma (2007), nas raízes expostas a uma baixa concentração de Al por um curto período, serão afetados apenas o apoplasto e a parede celular. Por outro lado, nas raízes expostas a uma alta concentração de Al por longo tempo, adicionalmente serão afetadas a membrana plasmática, o DNA e as enzimas. Existem evidências de que a toxicidade do Al interfere com a absorção de outros elementos. Foi verificado, por exemplo, que o Al reduziu o conteúdo e o acúmulo de Ca, Fe e Mn no arroz de sequeiro (Freitas et al., 2017); e de Fe, Ca, Mg, K, P e N nas raízes e brotos de cinco cultivares de feijão (Derakhshan, Goli, Akhtar, Sayad e Naz) (Roshani et al., 2014).

O Manganês (Mn) é um nutriente essencial que participa dos diversos processos do ciclo de vida de uma planta, como fotossíntese, respiração, eliminação de espécies reativas de oxigênio (ROS), defesa contra patógenos e sinalização hormonal (Alejandro et al., 2020; Chen et al., 2015; Paschke et al., 2005), portanto, sua presença no solo é importante para o desenvolvimento delas.

Por outro lado, sua elevada disponibilidade pode induzir efeitos tóxicos nos vegetais (Paschke et al., 2007). O excesso de Mn ao nível molecular diminui a

absorção e translocação de outros elementos essenciais como Ca, Mg, Fe e P, inibindo a biossíntese da clorofila, causando um declínio na taxa fotossintética, reduzindo a divisão celular meristemática nas raízes pela inibição da biossíntese de auxina, e levando a um aumento no acúmulo de Mn oxidado e compostos fenólicos oxidados no apoplasto (Alejandro et al., 2020).

O Mn pode ser encontrado no solo em três formas principais: trocável, complexado organicamente e associado a óxidos. Da interação entre essas três formas resulta sua disponibilidade para as plantas. Essa interação depende do tipo de solo, pH e teor de matéria orgânica (Marschner, 2012).

Oliveira Júnior et al. (2000) perceberam que a absorção de manganês decresce com a elevação do pH, devido a formação de hidróxidos e óxidos de manganês, o que é confirmado por Gordon (2007), que relata uma menor quantidade de manganês disponível no solo com pH elevado. Uma vez que as condições do solo que levam à grande disponibilidade de alumínio são as mesmas que conduzem à elevada disponibilidade de manganês, a toxicidade do manganês geralmente também está associada à toxicidade do alumínio em solos das regiões subtropicais e tropicais (Dechan, 1991). Entretanto, não está claro se a toxicidade do Al e do Mn tem ação totalmente independente ou se estão associadas de forma sinérgica ou inibitória.

De acordo com Clarkson (1988), o manganês é pouco regulado na absorção, o que eleva o acúmulo em níveis tóxicos, provocando danos. Algumas espécies, como a taboa, absorvem teores acima de 300 mg·kg<sup>-1</sup>, sendo classificadas como acumuladoras (Kabata-Pendias, 2010; Lindsay, 1979). Almeida et al. (2007) relataram que, na parte aérea da taboa, foram detectados 387 mg·kg<sup>-1</sup> de Mn. Contudo existem plantas que conseguem acumular grandes quantidades de Mn sem sucumbir, sendo por isso consideradas hiperacumuladoras (Baker et al., 2000), tais como *Centrosema pubescens*, *Stylosanthes humilis*, *Lotononis bainesii* (Andrew e Hegarty, 1969) e *Macadamia neurophylla* (Anderson et al., 1999) estão entre as mais tolerantes. Portanto, a concentração tóxica de Mn é dependente da espécie e genótipo da planta (Alejandro et al., 2017).

Nos solos ácidos, que cobrem quase 50% das terras potencialmente cultiváveis no mundo, a toxicidade de Al e Mn são dois dos principais fatores de limitação do crescimento para a grande maioria das culturas (Foy, 1984; Marschner, 2012; Kochian

et al., 2004; von Uexküll e Mutert, 1995), mas ainda não se tem clareza se esses fatores estão ou não associados fisiologicamente.

Similarmente ao caso do Al, a toxicidade por Mn geralmente ocorre em solos com valores de pH abaixo de 5,5 e com excesso de Mn total, além disso, o teor de oxigênio do solo afeta a disponibilidade desse elemento (Dolling et al., 2001). Sob condições semelhantes de oxigênio, a diminuição do pH aumenta a quantidade de  $Mn^{2+}$  em certos solos. Em latossolos ácidos no Brasil com pH 4,7, as plantas que crescem nesses solos acumularam grandes quantidades de Mn ( $1,068 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de peso seco) em seus tecidos e seu crescimento foi reduzido. Corrigindo esses solos para valores de pH acima de 5,5, a solubilidade e a absorção do Mn diminuíram o suficiente para eliminar a toxicidade e aumentar o crescimento (Martini et al., 1974).

Portanto, além de toxicidade de Al, a toxicidade por Mn também é um fator limitante para o crescimento das plantas, e alta tolerância a esses dois fatores é necessária para adaptação particularmente de plantas cultivadas em solos com valor de pH <5. Em condições de baixo pH (4,0 - 4,6), estudos anteriores indicaram que o Al pode diminuir o acúmulo de Mn ou melhorar os sintomas de toxicidade de manganês em milho (Clark 1977), trigo (*Triticum aestivum*) (Blair e Taylor, 1997) e feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) (Taylor et al., 1998), o que propicia um melhor desenvolvimento dessas culturas, mas não existe informação para cana-de-açúcar, e muito menos para cana-energia. Assim, é necessário promover pesquisas sobre a ação conjunta ou a interação entre Al e Mn e seus mecanismos de ação nas distintas variedades de plantas do gênero *Saccharum*.



### 3. Referências Bibliográficas

- Abreu LGF, Grassi MCB, Carvalho LM, Silva JJB, Oliveira JVC, Bressiani JA, Pereira GAG (2020) Energy cane vs sugarcane: Watching the race in plant development. **Industrial Crops and Products**, 156:112868. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112868>.
- Alejandro S, Höller S, Meier B, Peiter E (2020) Manganese in plants: From acquisition to subcellular allocation. **Frontiers in Plant Science**, 11:300. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>.
- Almeida RA, Oliveira LFC, Kliemann HJ (2007) Eficiência de espécies vegetais na purificação de esgoto sanitário. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 37:1-9.
- Altpeter F, Oraby H (2010) Sugarcane. In: Kempken F, Jung C (eds) Genetic Modification of Plants. **Biotechnology in Agriculture and Forestry**, 64:453-472. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-02391-0\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02391-0_23)
- Anderson CWN, Brooks RR, Chiarucci A, LaCoste CJ, Leblanc M, Robinson BH, Simcock R, Stewart RB (1999) Phytomining for nickel, thallium and gold. **Journal of Geochemical Exploration**, 67(1-3):407-415. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(99\)00055-2](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(99)00055-2).
- Andrew CS, Hegarty MP (1969) Comparative responses to manganese excess of eight tropical and four temperate pasture legume species. **Australian Journal of Agricultural Research** 20(4):687 - 696. <https://doi.org/10.1071/AR9690687>.
- Arp PA, Strucel I (1989) Water uptake by black spruce seedlings from rooting media (solution, sand, peat) treated with inorganic and oxalated aluminum. **Water, Air, and Soil Pollution** 44:57-70. <https://doi.org/10.1007/BF00228778>.
- Awasthi JP, Saha B, Regon P, Sahoo S, Chowra U, Pradhan A, Roy A, Panda SK (2017) Morphophysiological analysis of tolerance to aluminum toxicity in rice varieties of Northeast India. **PLOS ONE** 12(4): e0176357. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176357>.
- Baker AJM, Mcgrath SP, Reeves RD, Smith JAC (2000) Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal polluted soils, In: Terry N, Bañuelos GS (Eds) **Phytoremediation of Contaminated Soil and Water**. Boca Raton, USA: CRC Press, p. 85-107.
- Behmann J, Mahlein AK, Rumpf T, Römer C, Plümer L (2015) A review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. **Precision Agriculture** 16(3): 239-260. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9372-7>.
- Blair LM, Taylor GJ (1997) The nature of interaction between aluminum and manganese on growth and metal accumulation in *Triticum aestivum*. **Environmental and Experimental Botany** 37(1):25-37. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(96\)01036-2](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(96)01036-2).

Brumbley SM et al. (2009) Sugarcane. In: Kole C, Hall TC (eds.) **Compendium of Transgenic Crop Plants: Transgenic Sugar, Tuber and Fiber Crops**. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9781405181099.k0701>.

Butare L, Rao I, Lepoivre P, Polania J, Cajiao C, Cuasquer J, Beebe S (2011) New genetic sources of resistance in the genus *Phaseolus* to individual and combined stress factors of combined aluminum toxicity and progressive soil drying stresses. **Euphytica** 181:385-404. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0468-0>.

Chen Z, Sun L, Liu P, Liu G, Tian J, Liao H (2015) Malate Synthesis and Secretion Mediated by a Manganese-Enhanced Malate Dehydrogenase Confers Superior Manganese Tolerance in *Stylosanthes guianensis*. **Plant Physiology**, 167(1): 176-188. <https://dx.doi.org/10.1104%2Fpp.114.251017>.

Clark RB (1977) Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. **Plant and Soil** 47:653-662. <https://doi.org/10.1007/BF00011034>.

Clarkson DT (1988) The uptake and translocation of manganese by plant roots. In: Graham RD, Hannam RJ, Uren NC (Eds) **Manganese in Soils and Plants. Developments in Plant and Soil Sciences**, vol. 33. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-2817-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-009-2817-6_8).

CONAB (2021) **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Safra 2020/21, quarto levantamento. Brasília: Observatório Agrícola, p. 1-57. ISSN: 2318-7921. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>.

Culvenor RA (1985) Tolerance of *Phalaris aquatica* L. lines and some other agricultural species to excess manganese, and the effect of aluminium on manganese tolerance in *P. aquatica*. **Australian Journal of Agricultural Research** 36(5):695-708. <https://doi.org/10.1071/AR9850695>.

Dechen AR, Haag HP, Carmello QAC (1991) Função dos micronutrientes nas plantas. In: Ferreira ME, Cruz MCP (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafos/CNPq. p.65-75.

Dolling P, Moody P, Noble I, Helyar K, Hughes B, Reuter D, Sparrow L (2001) 'Soil acidity and acidification in Australia.' (**National Land and Water Resources Audit Project Report: Canberra**)

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2018) **Cenários de oferta de etanol e demanda de ciclo Otto 2018-2030**. EPE-DPG-SGB-Bios-NT-01-2018-r0. 41p

Freitas LB, Fernandes DM, Maia SCM, Mazziero BG (2017) Aluminum in mineral nutrition of upland rice plants. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 12(1):26–34. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i1a5414>.

FAO (2021) FAOSTAT: Production, Crops. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 15 de junho 2021.

Foy CD (1984) Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soil. In: Adams F (ed) **Soil acidity and liming**, volume 12, 2nd ed. Wisconsin: Amer Soc Agron, Crop Sci Soc Amer, and Soil Sci Soc Amer, pp 57-97. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr12.2ed.c2>.

Guo W, Chen S, Hussain N, Cong Y, Liang Z, Chen K (2015) Magnesium stress signaling in plant: Just a beginning. **Plant Signaling & Behavior** 10(3): e992287. <https://dx.doi.org/10.4161%2F15592324.2014.992287>.

Guo P, Chen LS, Yang LT (2018) Aluminum-responsive genes revealed by RNA-Seq and related physiological responses in leaves of two citrus species with contrasting aluminum-tolerance. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 158:213-222. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.038>.

IBGE (2017) **A geografia da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: IBGE, 170p. ISBN: 9788524044434

Jones DL, Ryan PR (2017) Aluminum Toxicity. In: Thomas B, Murray BG, Murphy DJ (Eds.) **Encyclopedia of Applied Plant Sciences**, 1:211-218. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00120-9>.

Kabata-Pendias A (2010) **Trace elements in soils and plants** 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 548p. <https://doi.org/10.1201/b10158>.

Khan AA, McNeilly T (1998) Variability in aluminium and manganese tolerance among maize accessions. **Genetic Resources and Crop Evolution** 45:525-531. <https://doi.org/10.1023/A:1008699817089>.

Kinraide TB (1998) Three mechanisms for the calcium alleviation of mineral toxicities. **Plant Physiology** 118(2):513-520. <https://dx.doi.org/10.1104%2Fpp.118.2.513>.

Kochian LV, Hoekenga OA, Pineros MA (2004) How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Biology** 55:459-493. PMID: 15377228 <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655>.

Krstic D, Djalovic I, Nikezic D, Bjelic D (2012) Aluminium in acid soils: chemistry, toxicity and impact on maize plants. In: Aladjadjiyan A (Ed). **Food Production: Approaches, Challenges and Tasks**. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/33077>.

Larcher W (2006). **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos, SP: RiMa. p. 531.

Leal MRLV, Walter AS, Seabra JEA (2013) Sugarcane as an energy source. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 3:17-26. <https://doi.org/10.1007/s13399-012-0055-1>.

Lindsay WL (1979) **Chemical equilibria in soils**. New York: Wiley-Interscience, 449p.

Ma JF (2007) Syndrome of Aluminum toxicity and diversity of Aluminum resistance in Higher plants. **International Review of Cytology**, 264: 225-252. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(07\)64005-4](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(07)64005-4).

Macêdo CEC, Jan VVS (2008) Effect of aluminum stress on mineral nutrition in rice cultivars differing in aluminum sensitivity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 12(4):363–369. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400005>.

Maia C, Almeida C, Costa P, Melo Júnior JAG, Silveira G, Peernelli LA, Barbosa MHP, Bhering LL (2018) Phenotypic plasticity of sugarcane genotypes under aluminum stress. **Journal of Experimental Agriculture International** 22(3):1-11. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/40984>.

Marschner P (2012) Mineral nutrition of higher plants, 3rd ed. London: Academic Press, p.324–333. pp 605–626. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>.

Martini JA, Kochhann RA, Siqueira OJ, Borkert CM (1974) Response of soybeans to liming as related to soil acidity, Al and Mn toxicities, and P in some Oxisols of Brazil. **Soil Science Society of America Journal** 38(4):616– 620. <https://doi.org/10.2136/sssaj1974.03615995003800040027x>.

Matsuoka S, Kennedy AJ, Santos EGD, Tomazela AL, Rubio LCS (2014) Energy Cane: Its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany**, article ID 597275. <https://doi.org/10.1155/2014/597275>.

Mossor-Pietraszewska T (2001) Effect of aluminium on plant growth and metabolism. **Acta Biochimica Polonica** 48(3):673–686. PMID: 11833776.

Mozambani AE, Pinto AS, Segato SV, Mattiuz CFM (2006) História e morfologia da cana-de-açúcar. In: Segato SV, Pinto AS, Jendiroba E (Eds.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 11-18.

Neves MF, Kalaki RB (2016) **Gargalos e desafios para o desenvolvimento do setor sucroenergético**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: [http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/acucar-e-alcool/anos-anteriores/cni-gargalos\\_desafios\\_cana](http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/acucar-e-alcool/anos-anteriores/cni-gargalos_desafios_cana).

Nunes Jr D (2016) **Cana Energia um novo produto para o setor sucroenergético**. 2016. Disponível em: <http://www.ideaonline.com.br/conteudo/cana-energia-um-novo-produto-para-o-setor-sucroenergetico-por-dib-nunes-jr-142901.html>. Acesso em: 15 jun. 2021.

Oliveira Jr JA, Malavolta E, Cabral CP (2000) Efeitos do manganês sobre a soja cultivada em solo de cerrado do Triângulo Mineiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 35(8):1629-1636. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000800016>.

Oliveira A (2016) **Cana-energia e alta produtividade por hectare**. Disponível em: <https://www.producaodebiodiesel.com.br/mercado-de-combustiveis/cana-energia-e-alta-produtividade-por-hectare>. Acesso em: 15 jul. 2021.

Panda SK, Matsumoto H (2007) Molecular physiology of aluminum toxicity and tolerance in plants. **Botanical Review** 73(4):326–347. <https://www.jstor.org/stable/27571199>.

Panda SK, Singha LB, Khan MH (2003) Does aluminium phytotoxicity induce oxidative stress in greengram (*Vigna radiata*). **Bulgarian Journal of Plant Physiology** 29(1-2): 77–86.

Pandey P, Irulappan V, Bagavathiannan MV, Senthil-Kumar M (2017) Impact of Combined Abiotic and Biotic Stresses on Plant Growth and Avenues for Crop Improvement by Exploiting Physio-morphological Traits. **Frontiers in Plant Science**, 8: article ID 537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00537>

- Paschke MW, Valdecantos A, Redente EF (2005) Manganese toxicity thresholds for restoration grass species. **Environmental Pollution**, 135(2): 313-322. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.08.006>.
- R'bia O, Horchani F, Smida I, Mejri M, Aschi-Smiti S (2011) Aluminium phytotoxicity and plant acclimation to acidic soils. **International Journal of Agricultural Research** 6(3):194-208. <https://dx.doi.org/10.3923/ijar.2011.194.208>.
- Roshani M, Abbaspour H, Saeidi-sar S (2014) Effect of aluminium stress on germination and mineral nutrition of kidney bean cultivars with different sensitivity to aluminium. **Biosciences Biotechnology Research Asia** 11(2):545-553. <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/1305>.
- Segato SV, Mattiuz CFM, Mozambani AE (2006) Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: Segato SV, Pinto AS, Jendiroba E, Nóbrega JCM (Eds.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.
- Silva RG, Mateus-Rosa T, de Castro FS, Kottapalli P, Kottapalli KR, Zingaretti SM (2019) Microtranscriptome of contrasting sugarcane cultivars in response to aluminum stress. **PLOS ONE** 14(11): e0217806. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217806>.
- Sousa FBF, Cazetta JO, Nascimento SS (2018) The different response of sugarcane genotypes in multiple stress. **Ciência e Agrotecnologia**, 42(5):527-539. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018425020718>.
- Souza LT, Cambraia J, Ribeiro C, Oliveira JÁ, Silva LC (2016) Effects of aluminum on the elongation and external morphology of root tips in two maize genotypes. **Bragantia**, 75(1):19-25. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.142>.
- Tamás L, Huttová J, Mistrík I, Šimonovičová M, Široká M (2006) Aluminium-induced drought and oxidative stress in barley roots. **Journal of Plant Physiology** 163(7):781-784. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.08.012>.
- Taylor GJ, Blamey FPC, Edwards DG (1998) Antagonistic and synergistic interaction between aluminum and manganese on growth of *Vigna unguiculata* at low ionic strength. **Physiologia Plantarum** 104 (2):183–194. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040206.x>.
- Tistama R, Widyastuti U, Sopandie D, Yokota A, Akashi K, Suharsono K (2012) Physiological and biochemical responses to aluminum stress in the root of a biodiesel plant *Jatropha curcas* L. **HAYATI Journal of Biosciences** 19(1):37–43. <https://doi.org/10.4308/hjb.19.1.37>.
- Vitorello VA, Capaldi FR, Stefanuto VA (2005) Recent advances in aluminium toxicity and resistance in higher plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology** 17(1):129-143. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100011>.
- Vitti GC, Oliveira DB, QUINTINO TA (2006) Micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar. In: Segato SV, Pinto AS, Jendiroba E, Nóbrega JCM (Eds.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 121-138.
- Von Uexküll HR, Mutert E (1995) Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil** 171:1–15. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>.

Yan L, Riaz M, Liu J, Liu Y, Zeng Y (2019) Boron alters carboxyl group binding capacity and Al transport pathway to relieve Al toxicity. **BioRxiv**, 12:1-42. <https://doi.org/10.1101/2019.12.12.874412>.

Yang M, Tan L, Xu Y, Zhao Y, Cheng F, Ye S, Jiang W (2015) Effect of Low pH and Aluminum Toxicity on the Photosynthetic Characteristics of Different Fast-Growing Eucalyptus Vegetatively Propagated Clones. **PLOS ONE**, 10(6): e0130963. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0130963>.

Zhou XX, Yang LT, Qi YP, Guo P, Chen LS (2015) Mechanisms on boron-induced alleviation of aluminum-toxicity in citrus grandis seedlings at a transcriptional level revealed by cDNA-AFLP analysis. **PLOS ONE** 10(3): e0115485. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115485>.

## CAPÍTULO 2 - INTERAÇÃO DA TOXICIDADE DE ALUMÍNIO E MANGANÊS SOBRE OS ASPECTOS DE MATÉRIA SECA E NUTRICIONAIS EM CANA-DE-AÇÚCAR.

Diego Correia Sodré<sup>1</sup>, Jairo Osvaldo Cazetta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de tecnologia, laboratório de Análise Química de Plantas, FCAV/Unesp (Jaboticabal, SP).

**RESUMO** – Toxicidade por alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) e manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ) são duas das principais restrições à produção de culturas em solos ácidos. Embora os efeitos isolados sejam relativamente bem conhecidos, ainda não se tem muitas informações do efeito interativo da toxicidade desses elementos. No presente estudo, o ensaio foi conduzido para investigar se há interação entre a fitotoxicidade dos metais  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  em mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000). O experimento foi instalado e conduzido em casa de vegetação em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar, em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial  $2 \times 5$ , com quatro repetições, totalizando 40 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram (ausência ou presença) de toxicidade por  $\text{Al}^{3+}$  x 5 níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  (0, 200, 400, 600, 800  $\text{mg L}^{-1}$ ). Após 50 dias do trasplante das mudas foram avaliados os efeitos dos tratamentos sobre variáveis biométricas o teor, o acúmulo e a eficiências nutricionais (absorção, translocação e utilização) de nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio. Observou-se efeito significativo ( $p > 0,01$ ) para interação  $\text{Al}^{3+}$  x  $\text{Mn}^{2+}$  na maioria das variáveis avaliadas, assim como efeito independente tanto para os tratamentos com alumínio, quanto para níveis crescentes de Mn, indicando que o efeito fitotóxico da interação para a maioria das variáveis é maior que a soma individual dos efeitos. Os efeitos fitotóxicos causados pela interação dos metais foram prejudiciais ao pleno desenvolvimento das mudas de cana-de-açúcar, com destaque para teor, acúmulo e eficiência de utilização de nitrogênio que foi drasticamente afetada.

**Palavras-chave:** IACSP95-5000, teor, acúmulo, eficiência, estresse abiótico, *Saccharum spp.*

## 1. Introdução

A demanda de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) tem se tornado cada vez maior e mais importante no cenário dos combustíveis renováveis, tanto no mercado interno quanto externo. Junto com seus derivados é considerada a segunda maior fonte de energia primária na matriz energética brasileira (Única, 2020; Maia et al., 2018).

Com a expansão do cultivo da cana-de-açúcar no país muitas regiões, onde existem solos ácidos, com elevados teores de elementos tóxicos como alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) e manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ), têm sido encontradas dificuldades no cultivo e na otimização da produtividade (Sousa et al., 2016; Brito, 2015; Goldfray et al., 2010; Caldarelli e Gilio, 2018). Isso por que mundialmente, por volta de 30% da área total e mais de 50% das terras potencialmente aráveis são ácidas (Guo; Chen; Yang, 2018; Riaz et al., 2018). sendo que no Brasil cerca de 60% dos solos apresentam fertilidade afetada pela toxicidade por Al (Nogueirol et al., 2015; Maia et al., 2018).

A toxicidade por alumínio (Al) e manganês (Mn) são os dois fatores principais que limitam o crescimento das plantas em solos ácidos (Marschner, 1995; Kochian et al., 2004). Em solos com  $\text{pH} \leq 5$ , a disponibilidade de alumínio é vista como um dos mais importantes problemas de toxicidade por metais por representar um dos fatores limitantes de crescimento para as plantas (SINGH et al., 2017; PHUKUNKAMKAEW et al., 2021). Essa toxicidade causa efeitos prejudiciais no sistema radicular, inibindo o alongamento celular, causando maior engrossamento e diminuição da permeabilidade celular (BOJÓRQUEZQUINTAL et al., 2017; SIQUEIRA et al., 2020).

A forma dominante em solução de solo do Mn é  $\text{Mn}^{2+}$ , e a toxicidade deste elemento geralmente ocorre em solos com valores de pH de 5,5 ou menos (Marschner, 1995). Em solos que se encontram com elevadas concentrações de manganês, a toxicidade causada pelo metal prejudica a diversidade de organismos do solo, assim com a decomposição de matéria orgânica, além de causar inibição de crescimento e clorose em brotos (Abreu et al., 2019; Rashed, 2010)

Normalmente, as plantas sofrem o efeito combinado de diferentes estresses abióticos (Carlin et al., 2012). No entanto na maioria das pesquisas é estudado um



fator de cada vez (Fonseca Junior et al., 2014; Maia et al., 2018), o que não reflete a realidade dos cultivos. Logo, levanta-se a hipótese de que a toxicidade por Al e Mn não afeta apenas o crescimento vegetal, mas também a eficiência nutricional em mudas de cana-de-açúcar.

Desse modo, objetivou-se avaliar se existe relação de interação entre  $Al^{3+}$  e doses de  $Mn^{2+}$  e se seus efeitos são aditivos, são independentes, são sinérgicos e se interferem negativamente um no outro em mudas de cana-de-açúcar

## **2. Material e Métodos**

### **2.1. Local do experimento**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), Jaboticabal, SP (21°15'22" S e 48°18'58" W), com altitude de 575 m.

### **2.2. Cana-de-açúcar utilizada**

Foi utilizado a cultivar IACSP95-5000 que apresenta as seguintes características: Porte ereto; ótima performance no plantio em colheita mecanizada; ótima brotação de soqueira sob palha; indicada para ambientes médios a favoráveis; perfil responsivo em produção; ótimo desempenho no plantio de inverno.

### **2.3. Instalação e condução do experimento**

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 5, sendo 2 tratamentos em relação a alumínio (ausência e presença de 60 mg L<sup>-1</sup> Al<sup>3+</sup>) e; 5 níveis de Mn<sup>2+</sup> (0, 200, 400, 600 e 800 mg L<sup>-1</sup>), com 4 repetições.

Para realização deste estudo, a solução nutritiva foi fornecida por meio do sistema proposto por Dantas et al. (2001). Resumidamente, as mudas foram obtidas a partir de “minitoletes do colmo” ou “toletes ou minirrebolos” (com 3 cm de comprimento) contendo uma gema, seguindo o método descrito por Carlin et al. (2012) e adaptada por Sousa et al. (2018), que consiste em plantar os minitoletes imediatamente após o corte, em recipientes de plástico com capacidade para 500ml, com orifícios na parte inferior e contendo areia lavada e peneirada (2 mm).

As mudas foram cultivadas sem restrição hídrica por 28 dias, após esse período foram selecionadas por sanidade e homogeneidade. Cada unidade experimental foi composta por duas partes: a primeira, uma muda transplantada a um recipiente plástico com capacidade de 1L (dimensões de 15 cm de altura e 9 x 9 cm de base, com pequenos orifícios na base para permitir a entrada de solução nutritiva), contendo 750 ml de areia lavada; a segunda, um pote de plástico (dimensões 23 cm de diâmetro e 9 cm de altura) em que o primeiro recipiente foi mantido com uma lâmina de 5 cm de solução nutritiva base. A solução nutritiva base foi formulada como uma solução completa (Furlani e Furlani, 1988) sem manganês, da seguinte forma: 3,1 ml L<sup>-1</sup> Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 1,64 mol L<sup>-1</sup>, 3,1 ml L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 0,42 mol L<sup>-1</sup>, 2,2 ml L<sup>-1</sup> KCl 0,25 mol L<sup>-1</sup>, 2,2 ml L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,25 mol L<sup>-1</sup>, 2,2 ml L<sup>-1</sup> KNO<sub>3</sub> 0,24 mol L<sup>-1</sup>, 1,6 ml L<sup>-1</sup> Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0,96 mol L<sup>-1</sup>, 0,3 ml L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0,13 mol L<sup>-1</sup>, 0,6 ml L<sup>-1</sup> FeDDH 0,16 mol L<sup>-1</sup>, 0,6 ml L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>2</sub> 0,03 mol L<sup>-1</sup>, 0,6 ml L<sup>-1</sup> ZnSO<sub>4</sub> 0,005 mol L<sup>-1</sup>, 0,6 ml L<sup>-1</sup> CuSO<sub>4</sub> 0,001 mol L<sup>-1</sup>, e 0,6 ml L<sup>-1</sup> Na<sub>3</sub>MoO<sub>2</sub> 0,001 mol L<sup>-1</sup> com pH de 4,5 ± 0,1.

Para o tratamento com ausência de Al<sup>3+</sup>, as plantas foram cultivadas em solução nutritiva base com pH 5,5 ± 0,1. Quanto ao tratamento com Presença de Al<sup>3+</sup> (60 mg L<sup>-1</sup>) foi utilizado alumínio na forma de AlCl<sub>3</sub>. 6H<sub>2</sub>O junto com a mesma solução nutritiva (com exceção de Mn<sup>2+</sup>) com elevada acidez (4,5 ± 0,1). Os tratamentos com níveis de Mn<sup>2+</sup> foram as concentrações (0, 200, 400, 600, 800 mg L<sup>-1</sup> Mn<sup>2+</sup>) na forma de MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O. O estabelecimento da dose de alumínio (60 mg L<sup>-1</sup>) e os níveis de manganês foram definidos conforme descrito em Sousa et al. (2018). Diariamente, completava-se o nível de solução com água destilada e, a cada dois dias se substituía por uma nova solução.

#### **2.4. Variáveis analisadas**

Transcorridos 50 dias da submissão das mudas aos tratamentos, foram coletadas e todas as plantas divididas em folha, colmo e raízes. A seguir, todas as amostras foram colocadas em sacos de papel devidamente identificados, pesadas para a determinação da massa fresca, e em seguida colocadas em estufa de circulação forçada de ar regulada para 65 ± 5 °C até atingir peso constante, para a determinação da massa de matéria seca de raiz (MSR), colmo (MSC) e folhas (MSF). a massa seca da parte aérea (MSPA) foi obtida pela soma da MSC + MSF.

Depois de determinar a matéria seca, essas amostras foram moídas, peneiradas com uma peneira com malha de abertura 0,5 mm, e submetida a determinação de macronutrientes seguindo a metodologia descrita por Bataglia et al. (1983). O acúmulo de nutrientes foi determinado com base no produto do teor de nutrientes pela matéria seca da planta. A eficiência nutricional foi obtida com base no acúmulo de nutrientes. Em que a eficiência de absorção foi determinada pela proporção do nutriente acumulado na planta inteira pela massa seca de raiz (Swiader; Chyan; Freiji, 1994). A eficiência de translocação foi calculada pela relação entre o nutriente acumulado na parte aérea e o nutriente acumulado em toda a planta (Li; Mckeand; Allen, 1991). A eficiência de utilização foi obtida pelo quociente do quadrado da massa seca de toda a planta pelo nutriente acumulado em toda a planta (Siddiqi; Glass, 1981).

### **2.5. Análises estatística**

Os dados das variáveis MSPA e MSR foram submetidos à análise de variância. Quando os valores de F foram significativos a pelo menos 5% de probabilidade, as médias, para os efeitos do Al, foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, e a resposta ao Mn submetida à análise de regressão polinomial. As análises estatísticas foram processadas utilizando o programa de análise estatística AGROESTAT (Barbosa e Maldonado Junior, 2015).

## **3. Resultados e Discussão**

A massa seca de raiz (MSR) foi influenciada significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo efeito da interação  $Al^3 \times Mn^{2+}$ , enquanto a massa seca da parte aérea (MSPA) foi influenciada ( $p < 0,05$ ) apenas pelos efeitos independente de  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$  (Tabela 1).

A MSPA apresentou crescimento expressivo na ausência de alumínio, com diferença de  $4,15 \text{ g kg}^{-1}$  em relação à presença, ou seja, seu crescimento foi afetado em 40,4% (Figura 1A). Além disso, houve crescimento significativo ( $p < 0,05$ ), à medida que foram aumentados os níveis de Mn na solução nutritiva. A produção de MSPA passou de  $7,87 \text{ g kg}^{-1}$  no nível  $0 \text{ mg L}^{-1}$  de  $Mn^{2+}$ , para  $6,7 \text{ g Kg}^{-1}$  no nível  $800 \text{ mg L}^{-1}$ , que representa uma diminuição de 14,9% (Figura 1B). A redução de matéria seca, ou seja, a planta não cresceu na presença de Al, assim trabalhando com as

concentrações de 0-70 mg L<sup>-1</sup> também foi observada por Sousa et al. (2018) em 24 genótipos de cana-de-açúcar, por Barbosa et al. (2017) em trigo e Riaz et al. (2018) em laranja trifoliada.

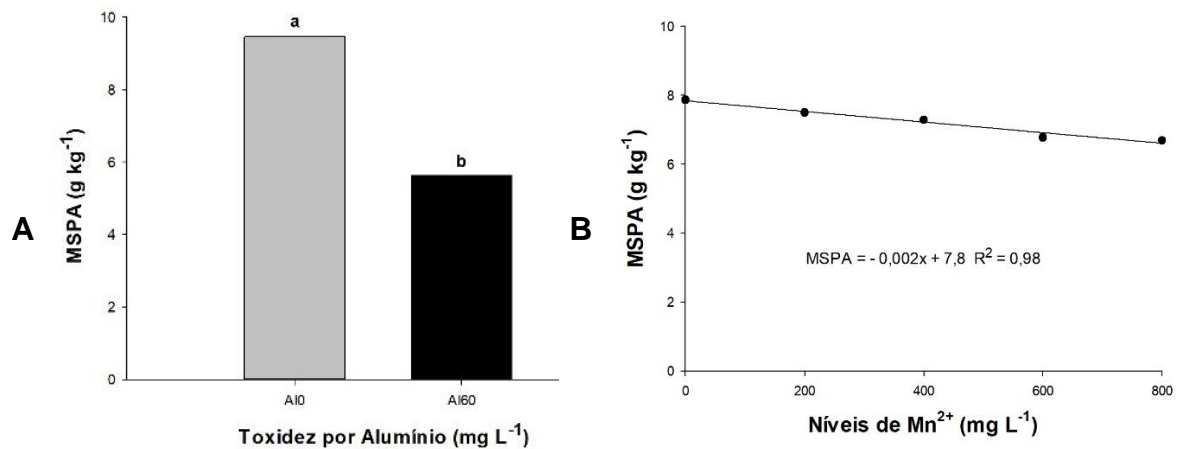
**Tabela 1.** Resumo da análise de variância das variáveis massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR), em relação ao aumento de concentração de Mn, na presença e ausência de Al na solução nutritiva.

Causas de variação	GL	MSPA	MSR
Toxicidade por Al <sup>3+</sup> (Al <sup>3+</sup> )	1	71,0**	124,52**
Níveis de Mn <sup>2+</sup> (Mn <sup>2+</sup> )	4	3,3*	19,61**
Interação Al <sup>3+</sup> x Mn <sup>2+</sup>	4	1,7 <sup>NS</sup>	4,51**
CV (%)		13,9	21,9
Resíduo	30		
Total	39		

(\*): significativo à 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ )

(\*\*): significativo à 1% de probabilidade ( $P < 0,01$ )

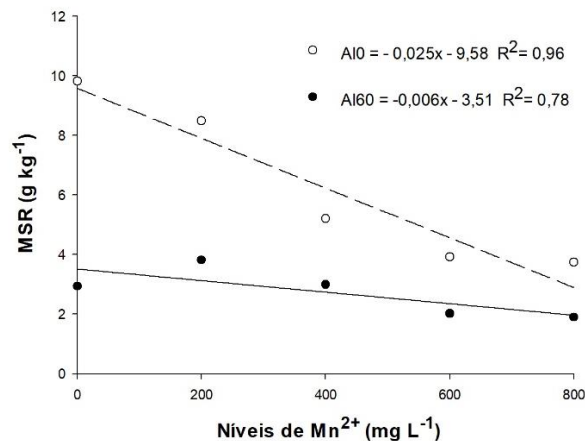
(NS): não significativo ( $P > 0,05$ ).



**Figura 1.** Massa seca da parte aérea (MSPA) de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de alumínio (Al<sup>3+</sup>) (A) e níveis de manganês (Mn<sup>2+</sup>) (B) em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

A massa seca de raiz (MSR) apresentou efeito significativo ( $P < 0,01$ ) para a interação Al<sup>3+</sup>xMn<sup>2+</sup> (Figura 2). Foi observado uma redução linear tanto na presença quanto na ausência de Al<sup>3+</sup>, porém, na ausência de Al<sup>3+</sup>, o nível mais elevado de Mn<sup>2+</sup> (800 mg L<sup>-1</sup>), foi cerca de 21,4% menos prejudicial do que o efeito na presença de Al<sup>3+</sup> na dose 0 de Mn. Diversas pesquisas estudando os efeitos separados do Al<sup>3+</sup> e do Mn<sup>2+</sup> em altas concentrações levam à ocorrência de toxicidade das mudas e a uma

diminuição drástica na matéria seca de raiz (Wang et al., 2016; Sousa et al., 2018). Do mesmo modo, Yang et al. (2009) e Zhong et al. (2009), trabalhando com alumínio e manganês em soja observaram que a toxicidade por manganês tende danificar principalmente os brotos das plantas, embora com o passar do tempo possa ocorrer inibição da biomassa de raiz.



**Figura 2.** Massa seca de raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a interação entre presença e ausência de Al<sup>3+</sup> e níveis de Mn<sup>2+</sup> em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

Os teores de nitrogênio (N) e de potássio (K), e o acúmulo de N na parte aérea, apresentaram efeito significativo ( $P < 0,01$ ) para interação Al<sup>3+</sup> × Mn<sup>2+</sup>, enquanto os demais teores e os acúmulos de nutrientes apresentaram efeitos independentes para Mn<sup>2+</sup> ou Al<sup>3+</sup> na parte aérea da planta. Por sua vez, no sistema radicular só houve efeito de interação Al<sup>3+</sup> × Mn<sup>2+</sup> para acúmulo de fósforo (P) e enxofre (S) e para teor de potássio (K), enquanto as demais variáveis apresentaram efeito independente para Al<sup>3+</sup> ou Mn<sup>2+</sup> (Tabela 2).

As eficiências de absorção e utilização de N apresentaram efeito significativo ( $P < 0,05$ ) para interação Al<sup>3+</sup> × Mn<sup>2+</sup>, enquanto as eficiências de translocação e utilização de P, absorção e utilização de K e utilização de S demonstraram efeitos independentes para ambos os tratamentos na presença de Al<sup>3+</sup> e níveis de Mn<sup>2+</sup>, ao passo que a eficiência de translocação de K foi significativo ( $P < 0,01$ ) apenas para a variável Al<sup>3+</sup> e as eficiências de translocação de N, absorção de P e S somente para níveis de Mn<sup>2+</sup> (Tabela 3).

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância do teor e acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na parte aérea e raiz, em relação aos tratamentos utilizados no experimento.

Causas	GL	Teor N	Ac. N	Teor P	Ac. P	Teor K	Ac. K	Teor S	Ac. S	Teor Ca	Ac. Ca	Teor Mg	Ac. Mg
Parte aérea													
Al <sup>3+</sup>	1	5,09*	46,73**	58,28**	84,56**	134,20**	8,29**	19,50**	161,73**	0,10 <sup>NS</sup>	32,92**	0,03 <sup>NS</sup>	23,46**
Mn <sup>2+</sup>	4	4,18**	6,01**	4,47**	4,78**	2,73*	2,20 <sup>NS</sup>	2,93*	4,33**	0,53 <sup>NS</sup>	1,73 <sup>NS</sup>	3,44*	3,70*
Al <sup>3+</sup> ×Mn <sup>2+</sup>	4	4,57**	5,46**	2,32 <sup>NS</sup>	1,61 <sup>NS</sup>	4,88**	2,69 <sup>NS</sup>	1,83 <sup>NS</sup>	1,28 <sup>NS</sup>	1,28 <sup>NS</sup>	2,69 <sup>NS</sup>	1,11 <sup>NS</sup>	2,05 <sup>NS</sup>
Cv		10,2	7,87	67,3	3,26	0,42	14,08	4,31	20,23	7,03	16,69	16,97	4,31
Resíduo	30												
Total	39												
Raiz													
Al <sup>3+</sup>	1	84,97**	25,11**	7,79**	68,56**	19,67**	37,39**	3,19 <sup>NS</sup>	81,65**				
Mn <sup>2+</sup>	4	4,67**	9,59**	2,32 <sup>NS</sup>	15,65**	3,61*	26,54**	2,92*	19,38**				
Al <sup>3+</sup> ×Mn <sup>2+</sup>	4	2,07 <sup>NS</sup>	1,36 <sup>NS</sup>	0,29 <sup>NS</sup>	9,80**	3,46*	2,48 <sup>NS</sup>	0,66 <sup>NS</sup>	6,45**				
Cv		13,42	16,07	31,1	1,67	33,52	1,9	29,7	2,11				
Resíduo	30												
Total	39												

(\*): significativo à 5% de probabilidade  
 (\*\*): significativo à 1% de probabilidade  
 (NS): não significativo estatisticamente.

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância das eficiências nutricionais (absorção, translocação e utilização) dos nutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S), em relação aos tratamentos utilizados no experimento.

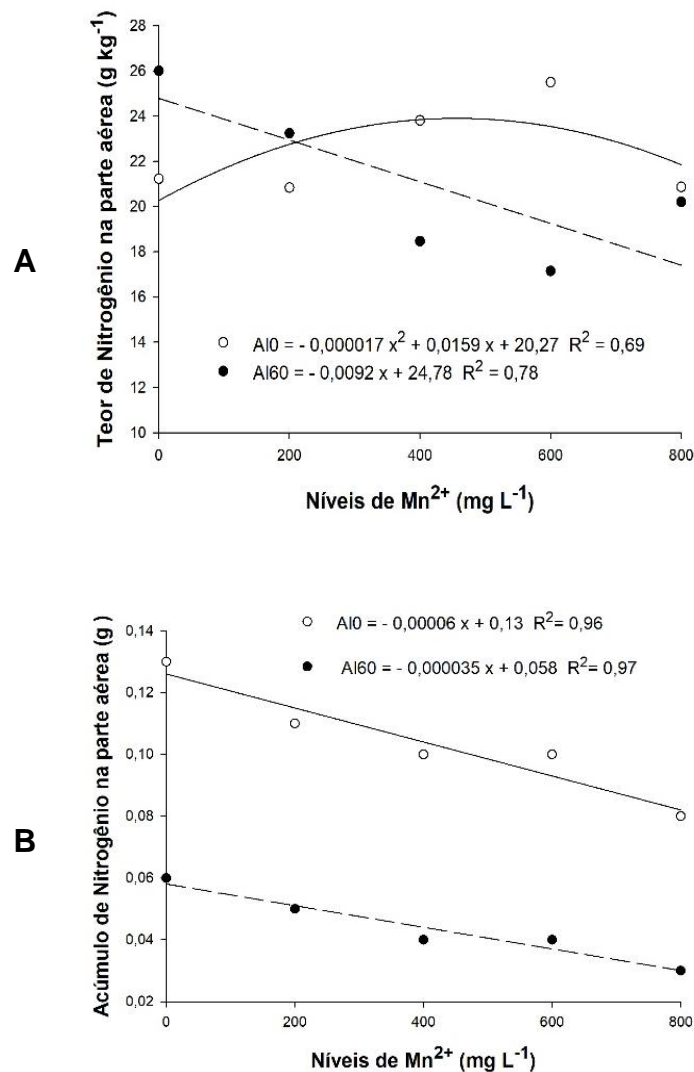
Causas	GL	N			P			K			S		
		Absor	Trasl	Utiliz	Absor	Trasl	Utiliz	Absor	Trasl	Utiliz	Absor	Trasl	Utiliz
Al	1	8,58**	0,09 <sup>NS</sup>	49,29**	0,32 <sup>NS</sup>	4,75*	14,51**	9,2**	37,06**	101,38**	0,69 <sup>NS</sup>	0,14 <sup>NS</sup>	9,89**
Mn	4	6,45**	4,24**	4,94**	5,76**	5,05**	3,41*	8,03**	2,07 <sup>NS</sup>	6,25**	0,01**	2,45 <sup>NS</sup>	2,83*
Al x Mn	4	3,91*	0,22 <sup>NS</sup>	3,97*	1,26 <sup>NS</sup>	0,43 <sup>NS</sup>	1,43 <sup>NS</sup>	1,65 <sup>NS</sup>	0,51 <sup>NS</sup>	0,39 <sup>NS</sup>	1,51 <sup>NS</sup>	0,46 <sup>NS</sup>	0,87 <sup>NS</sup>
Cv		6,69	13,24	11,57	13,68	10,12	16,95	8,86	0,19	2	10,93	2,93	2,15
Resíduo	30												
total	39												

(\*): significativo à 5% de probabilidade

(\*\*): significativo à 1% de probabilidade

(NS): não significativo estatisticamente

O teor de nitrogênio (N) diminuiu de forma linear na presença de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  na solução. Por sua vez, na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  o teor na parte aérea das mudas chegou a um valor máximo de  $23,98 \text{ g kg}^{-1}$  de N, com o nível de  $\text{Mn}^{2+}$  de  $467,6 \text{ mg L}^{-1}$ , sendo que a partir desse valor foi verificado um declínio de (15,8%) (Figura 3A). Por outro lado, o acúmulo de N apresentou efeito significativo ( $P < 0,01$ ) para interação  $\text{Al}^{3+} \times \text{Mn}^{2+}$ , em que tanto na presença quanto na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  houve diminuição linear (figura 3B).



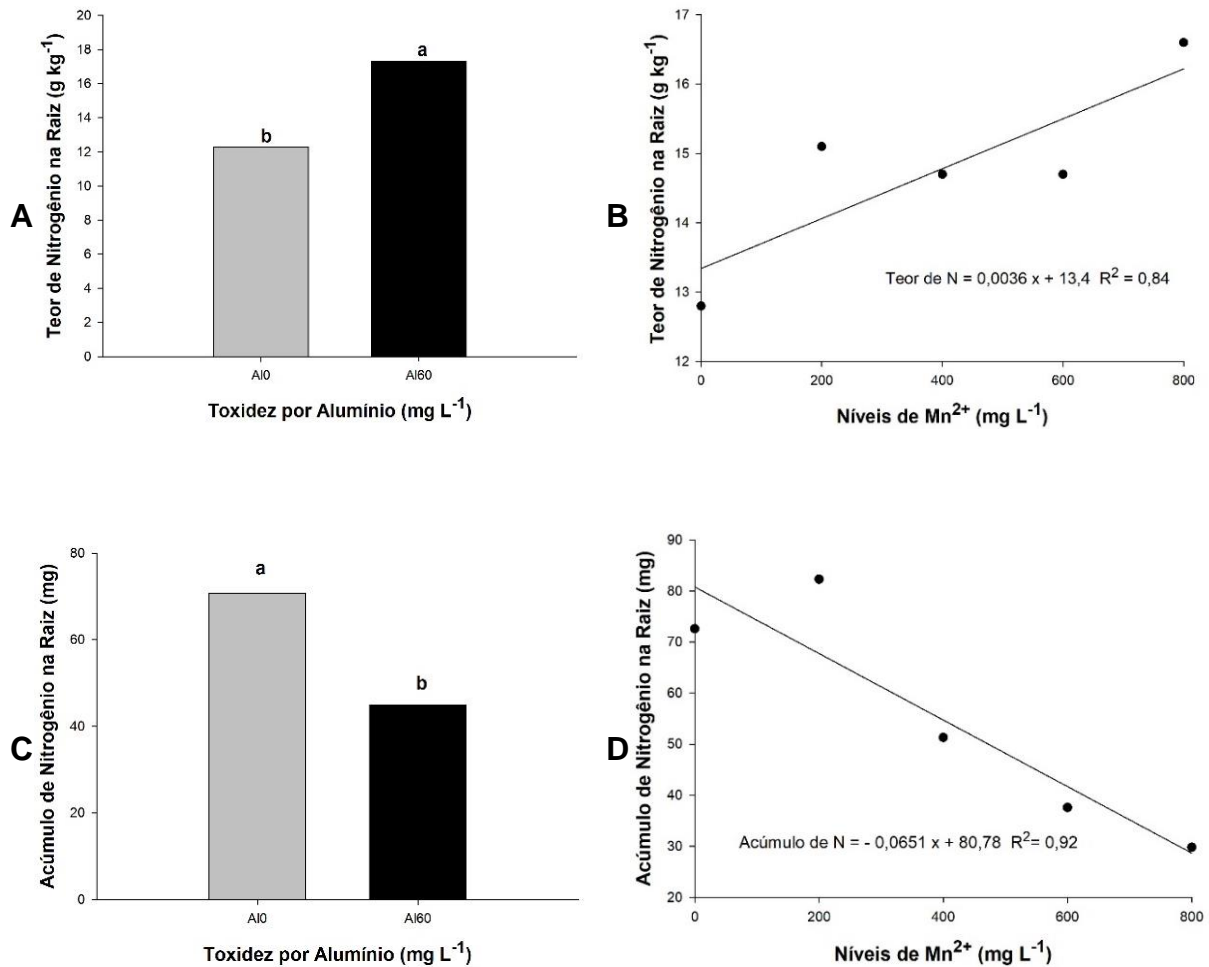
**Figura 3.** Teor e acúmulo de nitrogênio (N) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $\text{Al}^{3+}$  e níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.



O fato do teor e acúmulo de nitrogênio diminuírem na presença de alumínio sugere que a toxicidade na parte radicular influencia diretamente na parte aérea. Tudo aponta que a elevada disponibilidade de  $Al^{3+}$  no ambiente de crescimento contribui para induzir deficiências de nutrientes, devido a sua interferência na precipitação / solubilização de processos na solução, absorção, transporte e uso de nutriente pela planta (FOY, 1974).

Na ausência de  $Al^{3+}$  as mudas apresentaram maior teor (15,7%) e acúmulo (25%) do que na presença de  $Al^{3+}$ . Vale lembrar que os sintomas de toxicidade por alumínio na parte aérea nem sempre são facilmente identificáveis (Souza et al., 2016; Sousa et al., 2018). ao contrário do sistema radicular. A parte aérea apresenta pouco efeito direto, principalmente em período relativamente curto (Rossiello e Jacob-Netto, 2006), o que justificaria os baixos teores e acúmulo de nitrogênio na parte aérea das plantas.

O N no sistema radicular apresentou efeito significativo ( $P < 0,01$ ) para os tratamentos de forma independente, assim como o teor nas mudas (Figura 4A) foi 28,9% maior na presença de  $Al^{3+}$ . O teor de N aumentou de forma significativa ( $P < 0,01$ ) à medida que houve aumento dos níveis  $Mn^{2+}$  (Figura 4B). Tal resultado demonstra efeito de sinergismo ocorrendo entre o N e o Mn. Por sua vez, para o acúmulo de N (Figura 4C), observa-se o inverso do que ocorreu para o teor (Figura 4A), pois na ausência de  $Al^{3+}$  as mudas tenderam a acumular mais N do que na presença dele. Da mesma forma, ocorreu efeito independente de acúmulo de N (Figura 4D) à medida que houve aumento os níveis de  $Mn^{2+}$ , obtendo diminuição linear em conteúdo. A explicação para esses resultados está no fato de que, mesmo as plantas com crescimento limitado absorvem nutrientes, mas outros fatores que limitam o crescimento e a fisiologia impedem que usem os nutrientes absorvidos para transformar em matéria seca, levando a uma concentração desses nutrientes naquela pouca matéria seca.

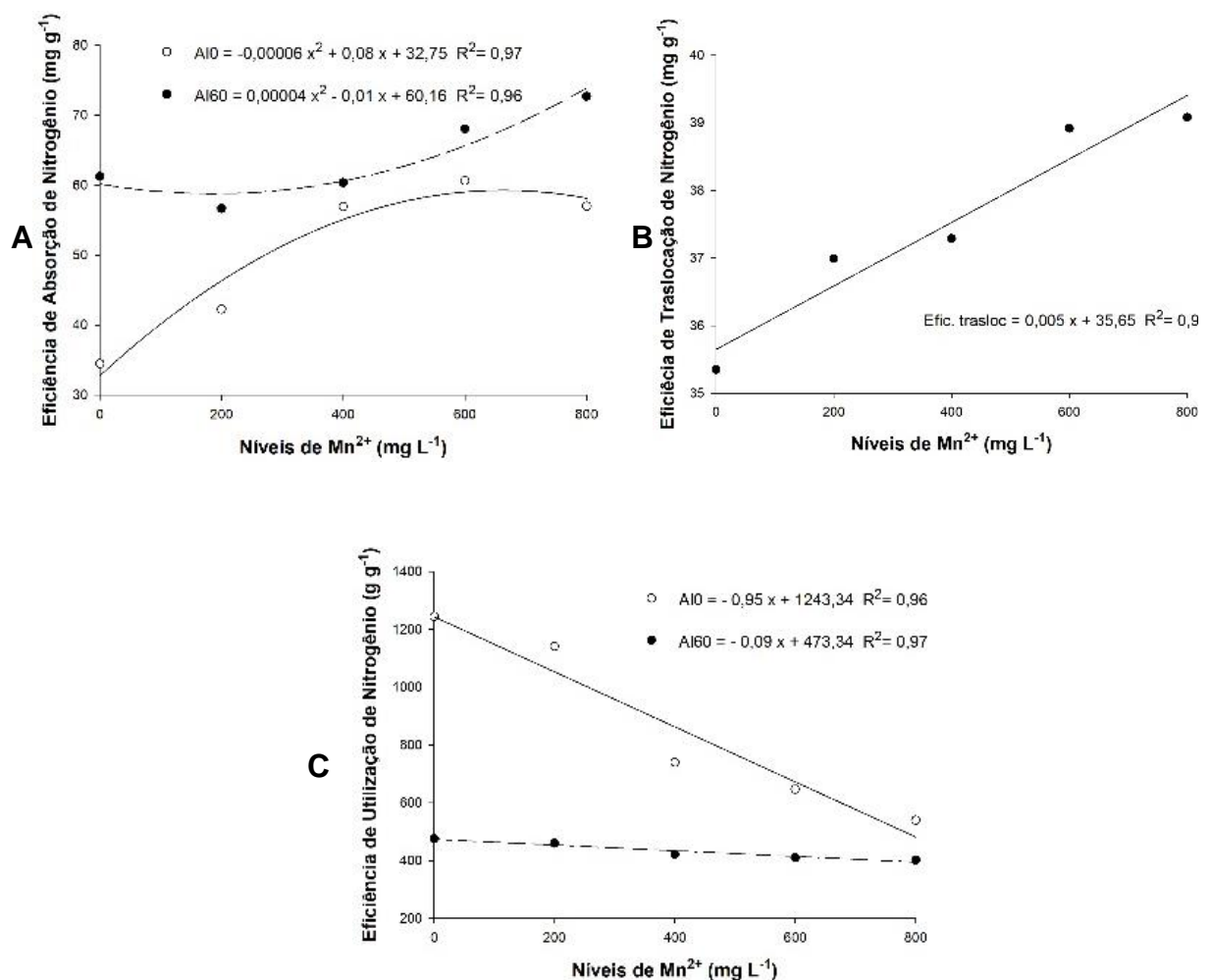


**Figura 4.** Teor e acúmulo de nitrogênio (N) na raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de Al<sup>3+</sup> e níveis de Mn<sup>2+</sup> em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

A eficiência de absorção de nitrogênio (N) apresentou efeito significativo ( $P < 0,05$ ) para interação entre Al<sup>3+</sup> x Mn<sup>2+</sup>, em que na presença de Al<sup>3+</sup> a absorção de N foi maior em comparação a ausência dele, de acordo com os níveis de Mn<sup>2+</sup> (Figura 5A). No entanto, a eficiência de translocação mostrou aumento linear em decorrência do aumento de Mn<sup>2+</sup> (Figura 5B). A eficiência de uso de N diminuiu linearmente na ausência de Al<sup>3+</sup>, em que se observa decréscimo (43%) de 1250 g g<sup>-1</sup> de N na dose 0 mg L<sup>-1</sup> de Mn<sup>2+</sup> para 580 g g<sup>-1</sup> na dose de 800 mg L<sup>-1</sup>, assim como na presença de Al<sup>3+</sup>, em relação a interação com Mn<sup>2+</sup> (Figura 5C).

Certamente, o decréscimo na eficiência de uso explica por que o teor de N aumentou na raiz na presença de Al. Além disso, também pode estar relacionado a alta eficiência de absorção de N, pois em pH abaixo de 5, como observado neste

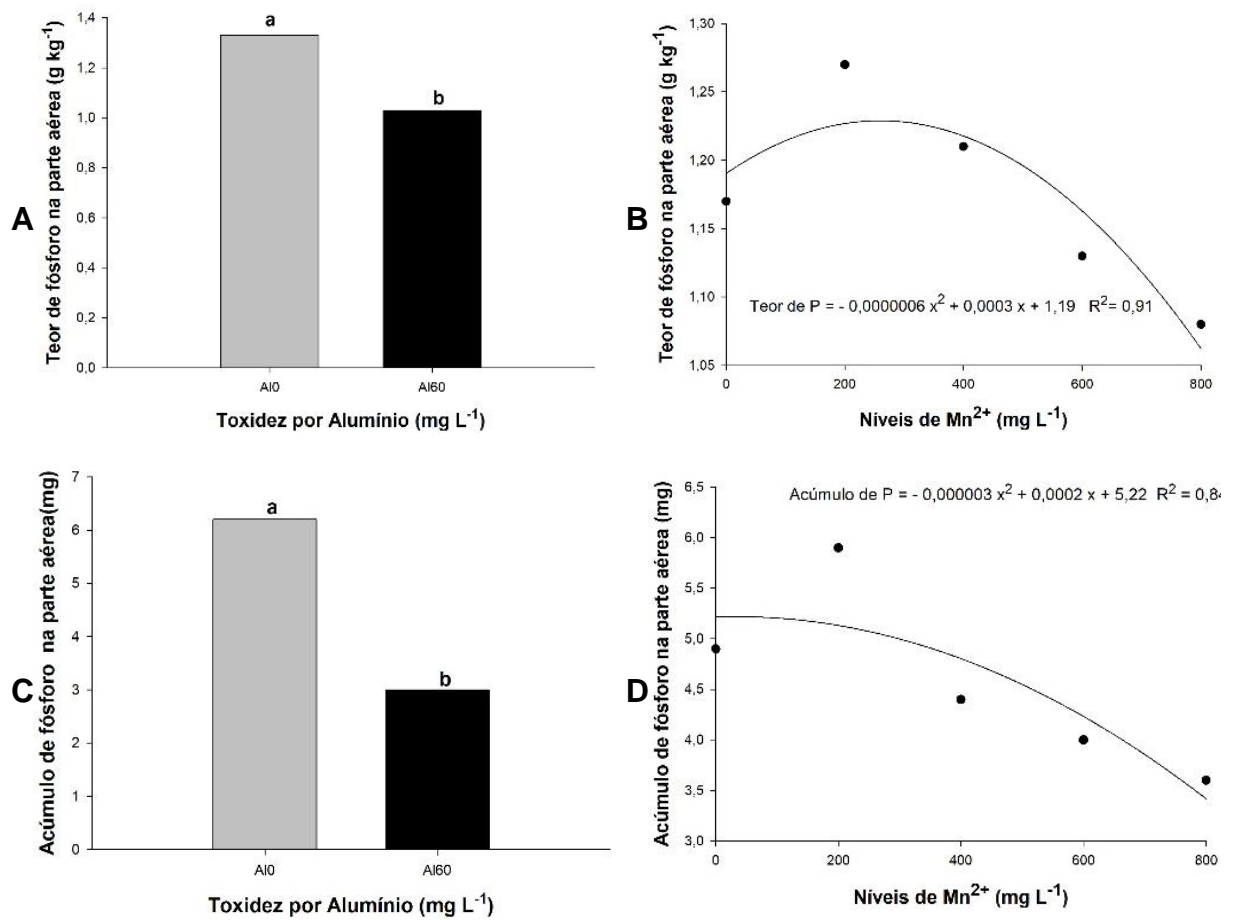
estudo, o N em forma de ânion ( $\text{NO}_3^-$ ) foi favorecido. No entanto, a eficiência de uso de nitrogênio diminuiu linearmente (Figura 5C) com o aumento dos níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  independentemente da presença ou ausência de  $\text{Al}^{3+}$ . Isso pode ser explicado pela interferência do  $\text{Al}^{3+}$  no metabolismo de N, que contribui para diminuição do N na parte aérea e, por consequência, limita a produção de matéria seca por planta. Outro fator que deve estar relacionado a baixa utilização de N são as mudanças ocasionadas pela toxicidade causada pelo  $\text{Al}^{3+}$  que inibe e causa alterações no crescimento das raízes (Zhao e Shen, 2018).



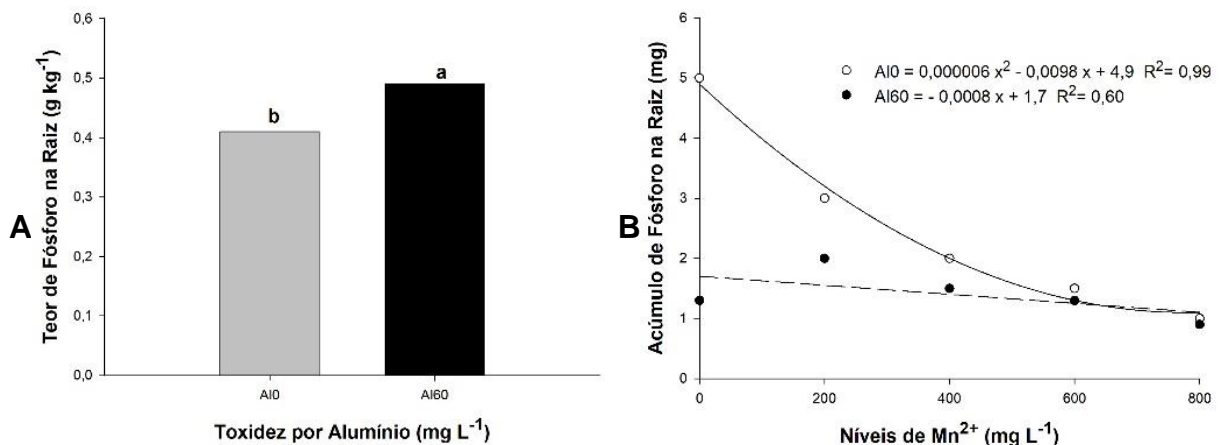
**Figura 5.** Eficiências de absorção (A), translocação (B) e utilização (C) de nitrogênio (N) de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $\text{Al}^{3+}$  e níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

O teor de fósforo (P) na parte aérea (Figura 6A) foi cerca de 22,6% superior na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  do que na presença dele, assim como o efeito independente para níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  que chegou a  $1,3 \text{ g kg}^{-1}$  de P no nível de  $250 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Mn}^{2+}$ , com forma quadrática à medida que se aumentou as concentrações de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 6B). Para o acúmulo de P na parte aérea (Figura 6C) os ganhos na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  foram de  $6,2 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto na presença do mesmo as mudas conseguiram acumular apenas  $3 \text{ g kg}^{-1}$  de P com uma diferença de 51,6%. Por outro lado, no tratamento com níveis crescentes de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 6D) ocorreu o mesmo tipo de efeito quadrático negativo com produção máxima de  $5,22 \text{ mg}$  de P no nível  $33,3 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Mn}^{2+}$ . O teor de fósforo na parte aérea pode estar mais relacionado ao transporte e redistribuição do que sua absorção, assim como aumento no conteúdo de P em alguns casos, o que explicaria um reduzido acúmulo quando submetido a doses mais elevadas de  $\text{Mn}^{2+}$  (Salvador et al., 2000).

No sistema radicular o teor de P (Figura 7A) aumentou ( $P < 0,01$ ) 16,3% na presença de  $\text{Al}^{3+}$  em relação a ausência dele. O acúmulo de P (Figura 7B) teve efeito significativo ( $P < 0,01$ ) para a interação  $\text{Al}^{3+} \times \text{Mn}^{2+}$ , de modo que à medida que se aumentou os níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  houve diminuição tanto na presença quanto na ausência de  $\text{Al}^{3+}$ , demonstrando resultados semelhantes a partir da dose  $600 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Mn}^{2+}$ . É provável que parte do  $\text{Al}^{3+}$  contido no tecido radicular pode precipitar parte do fósforo absorvido, dificultando assim sua translocação para a parte aérea (Jiang et al., 2009; Sade et al., 2016), além do mais, a toxicidade do  $\text{Al}^{3+}$  geralmente reduz a concentração de P na parte aérea, porém o grau de interferência varia de acordo com a espécie de planta (Foy, 1988).

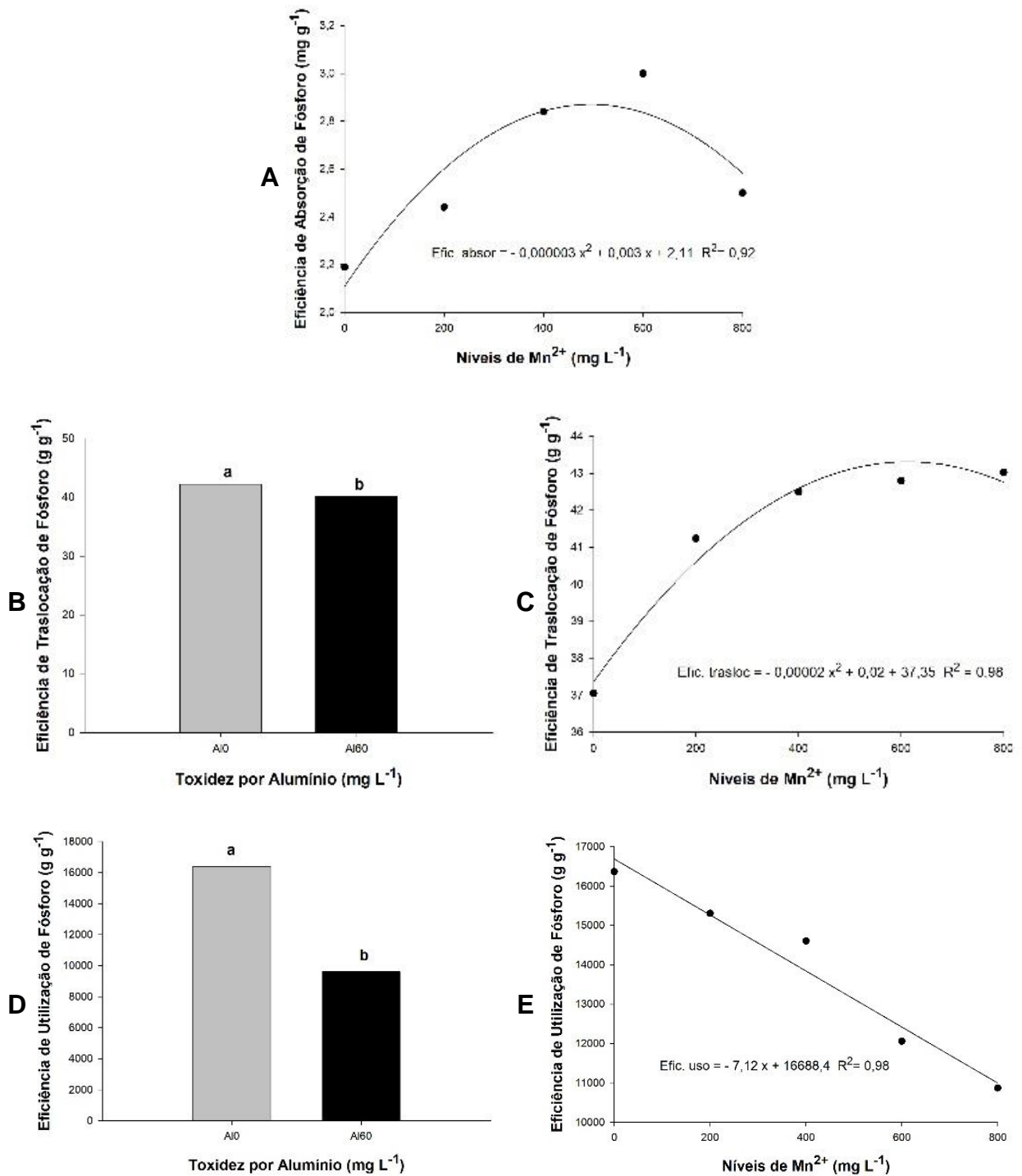


**Figura 6.** Teor e acúmulo de fósforo (P) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de Al<sup>3+</sup> e níveis de Mn<sup>2+</sup> em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.



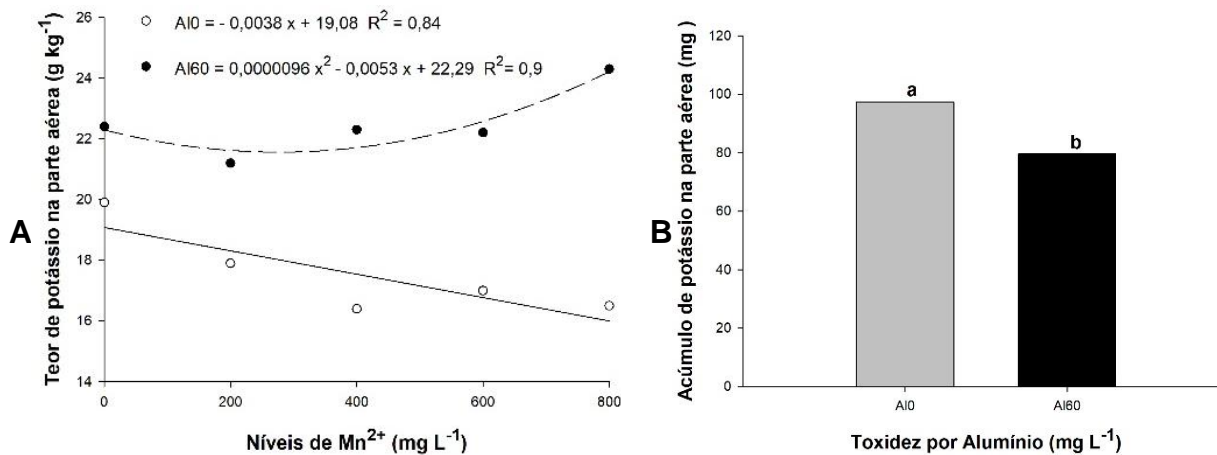
**Figura 7.** Teor e acúmulo de fósforo (P) na raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de Al<sup>3+</sup> e níveis de Mn<sup>2+</sup> em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

A eficiência de absorção de fósforo (P) respondeu de forma quadrática ( $P < 0,01$ ) com  $2,86 \text{ mg g}^{-1}$  no nível  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , posteriormente decaindo à medida em que se aumentou a concentração de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 8A). Por sua vez, a eficiência de translocação respondeu de forma independente para  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ . Para o tratamento com  $\text{Al}^{3+}$ , as mudas foram cerca de  $2,1 \text{ g g}^{-1}$  melhores na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 8B). Com o aumento dos níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  as mudas responderam de forma positiva até  $42,35 \text{ g g}^{-1}$  no nível de  $500 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 8C). Igualmente a eficiência de translocação a eficiência de uso obteve resultados isolados para cada tratamento respondendo de forma mais eficiente na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 8D), com uma diferença de  $680 \text{ g g}^{-1}$  para os tratamentos com  $\text{Al}^{3+}$ , todavia decresceu linearmente à medida que se aumentou os níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 8E). Existem evidências de que a absorção de P pode ser pouco afetada pela toxicidade por Al (Mariano e Keltjens, 2007) e a capacidade de conservar a absorção e translocação de fósforo é um mecanismo de tolerância da planta para  $\text{Al}^{3+}$  (Cabraia et al., 1991), o que poderia justificar o fato da presença do  $\text{Al}^{3+}$  não interferir com a absorção de P e a sua eficiência de translocação em plantas.



**Figura 8.** Eficiências de absorção (A), translocação (B, C) e utilização (D, E) de fósforo de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de Al<sup>3+</sup> e níveis de Mn<sup>2+</sup> em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

Houve efeito significativo ( $P < 0,01$ ) para teor de K na parte aérea (Figura 9A) na presença de  $Al^{3+}$  com um efeito quadrático positivo. Por sua vez, na ausência de  $Al^{3+}$  foi observada diminuição linear à medida que se aumentaram os níveis de  $Mn^{2+}$ . O acúmulo de K na parte aérea (Figura 9B) teve um efeito mais significativo ( $P < 0,01$ ) na ausência de  $Al^{3+}$  com valores de 97,2 mg de K cerca de 18,11% maior que em comparação a 79 mg de K na presença de  $Al^{3+}$ . Diversos trabalhos têm demonstrado que o alumínio pode danificar significativamente a condução de vasos de plantas, incluindo o transporte das raízes para a parte aérea (Hatamian, et al., 2020; Souri et al., 2019).

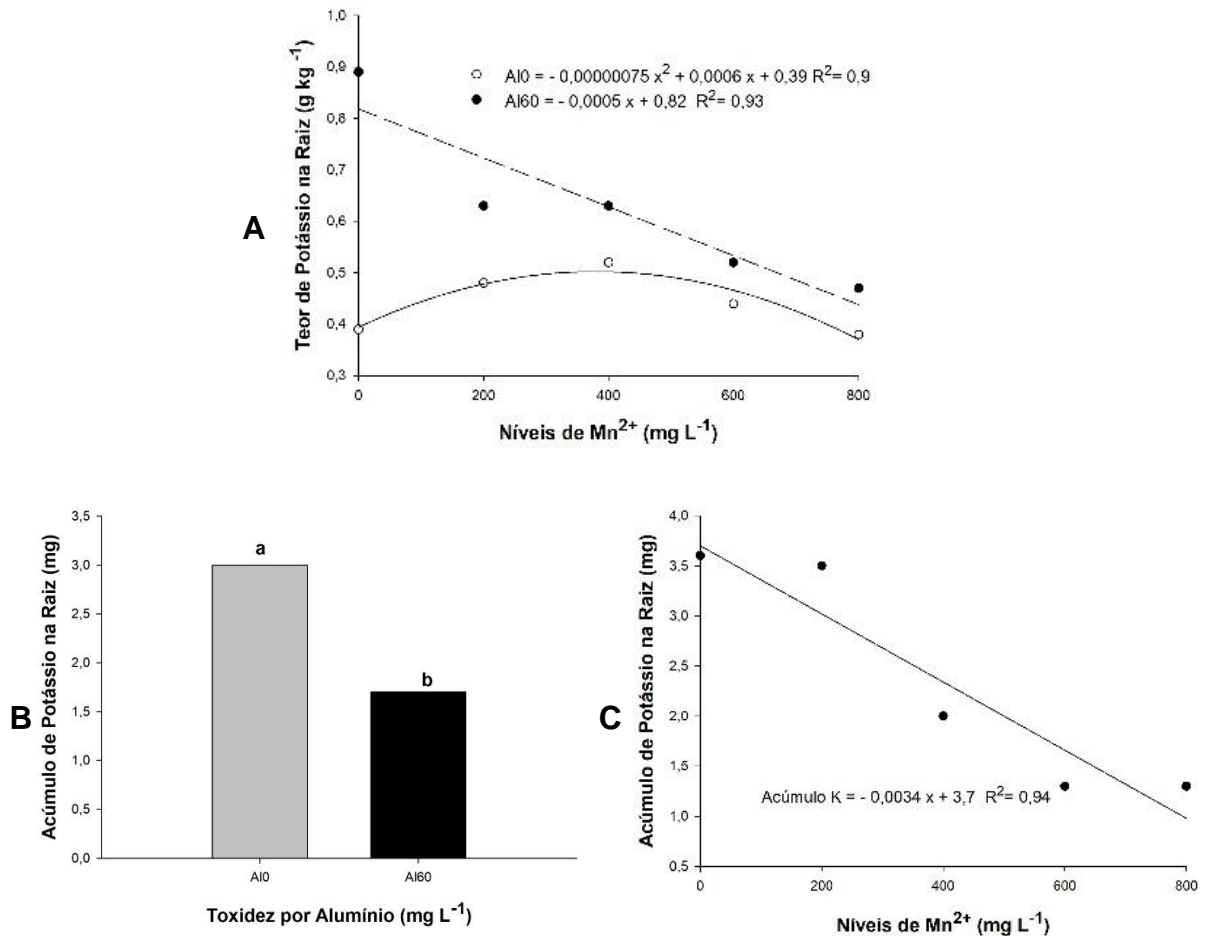


**Figura 9.** Teor e Acúmulo de potássio (K) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

Ocorreu efeito ( $P < 0,01$ ) para interação entre  $Al^{3+} \times Mn^{2+}$  no teor de K no sistema radicular (Figura 10A). Tanto na presença quanto na ausência de  $Al^{3+}$  à medida que os níveis de  $Mn^{2+}$  foram crescendo os teores de K diminuíram. O acúmulo de K (Figura 10B) foi 43,3% superior na ausência de  $Al^{3+}$  Para os níveis de  $Mn^{2+}$  (Figura 10C) ocorreu um efeito linear negativo com uma redução de 63,95% da dose 0 para 800  $mg\ L^{-1}$  de  $Mn^{2+}$ . Uma redução no conteúdo de nutrientes sob condições de alta concentração de  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$  como encontrados para N, P, K na raiz e na parte aérea é comum, pois além da formação anormal da raiz e a redução desses elementos em



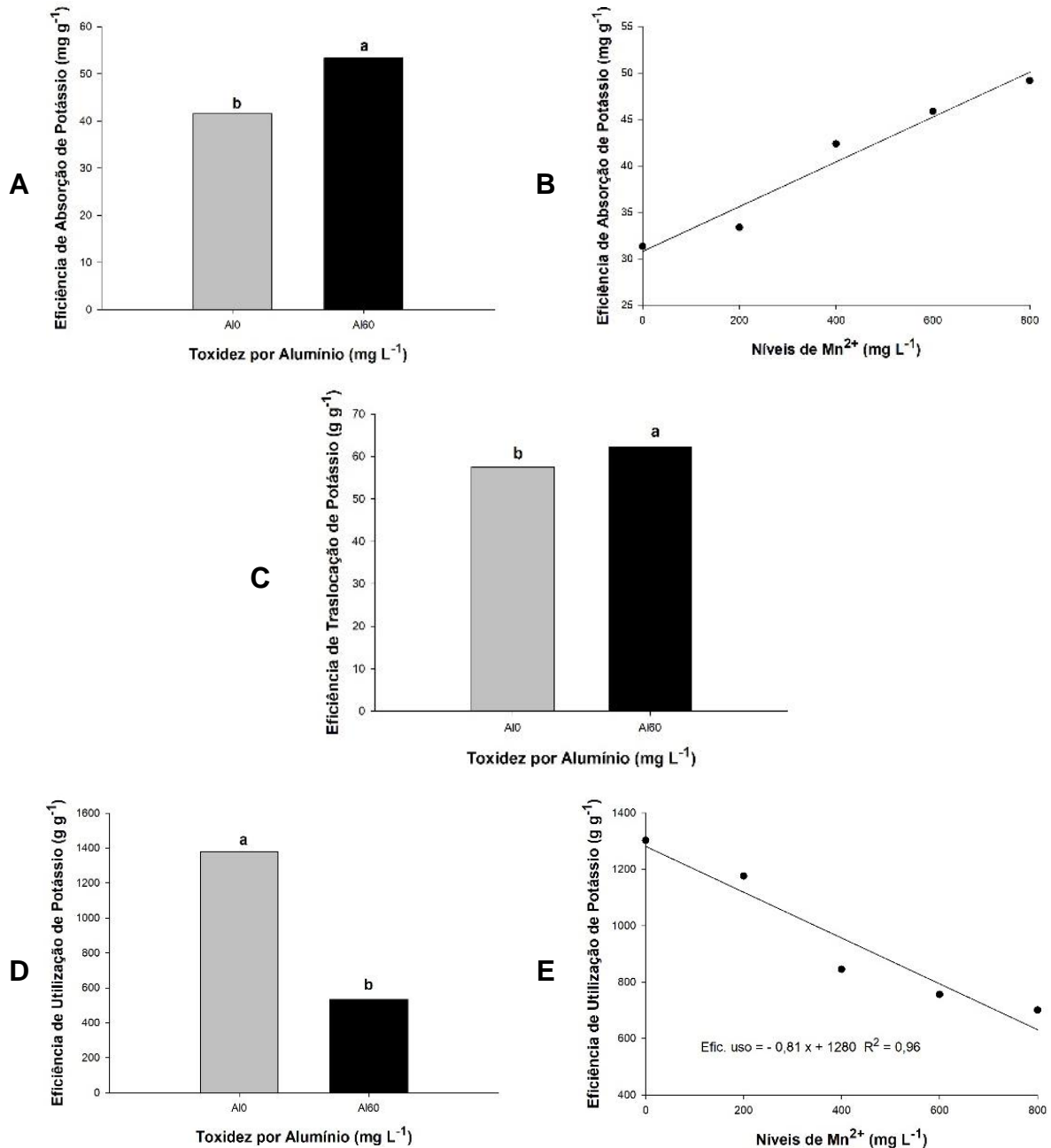
diferentes partes da planta pode estar relacionado com a interferência do íon de  $\text{Al}^{3+}$  na membrana da célula (Bojórquez-Quintal et al., 2017).



**Figura 10.** Teor e Acúmulo de potássio (K) na raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $\text{Al}^{3+}$  e níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

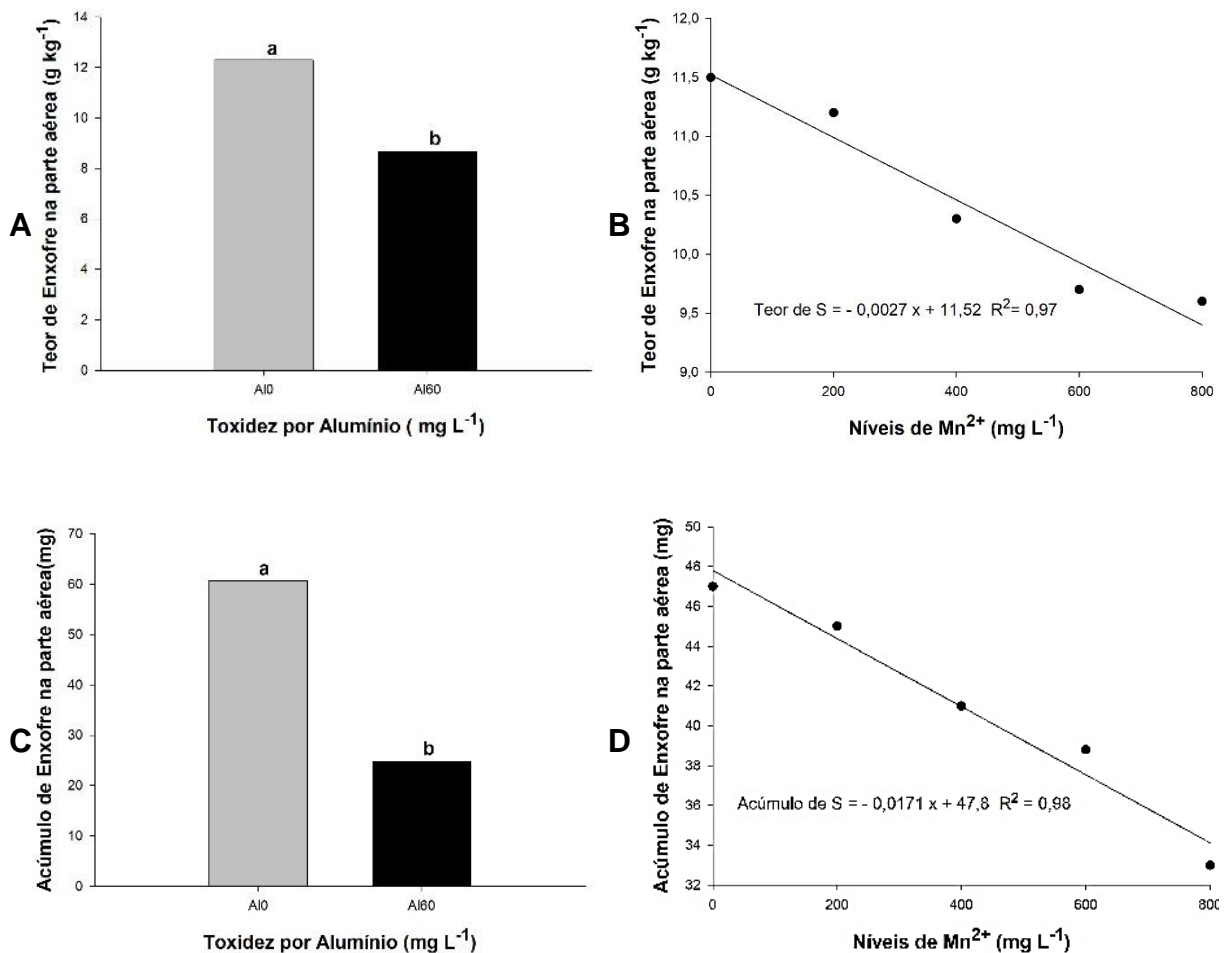
A eficiência de absorção de K demonstrou melhor resultado para o tratamento na presença de  $\text{Al}^{3+}$  com uma pequena diferença de  $12 \text{ mg g}^{-1}$  em relação a ausência de  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 11A). Para o efeito independente de níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  houve efeito linear crescente à medida que se aumentaram os níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 11B). A absorção e a eficiência de translocação foi melhor na presença de  $\text{Al}^{3+}$  com uma diferença de  $5 \text{ g g}^{-1}$  ( $7,51\%$ ) para ausência de  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 11C), demonstrando que apesar da toxicidade por  $\text{Al}^{3+}$  exercer um grande influência no processo de crescimento radicular as eficiências de absorção e translocação de K não sofreram efeitos danosos, porém o mesmo não se observou para o efeito na eficiência de uso no qual a diferença entre

o tratamento na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  foi de  $844,89 \text{ g g}^{-1}$  (61,29%) em relação a presença do mesmo (Figura 11D). Embora o  $\text{Mn}^{2+}$  não tenha prejudicado a eficiência de absorção, na eficiência de uso induziu uma redução linear ( $P < 0,01$ ) em resposta ao aumento dos níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 11E).



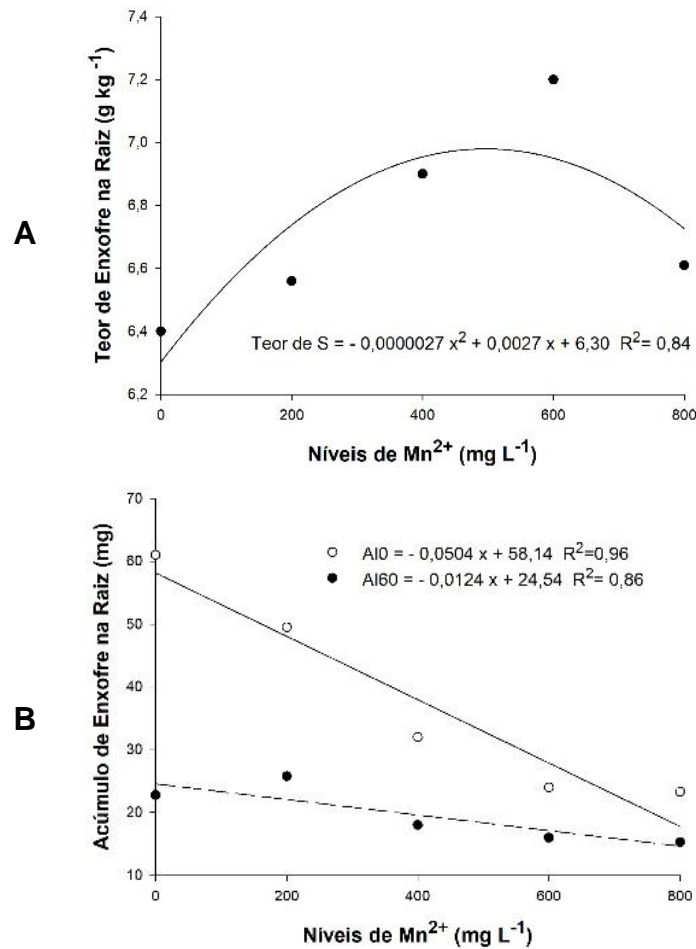
**Figura 11.** Eficiências de absorção (A), translocação (B) e utilização (C) de potássio (K) de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $\text{Al}^{3+}$  e níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

O teor de enxofre S na parte aérea (Figura 12A) das mudas mostrou efeito significativo ( $P < 0,01$ ) independente para  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$ . Na ausência de  $Al^{3+}$ , para níveis crescentes de  $Mn^{2+}$  (Figura 12B) houve uma redução linear do teor de S e tais resultados foram semelhantes para acúmulo de S (Figura 12C). Na presença de  $Al^{3+}$  o teor de S foi prejudicado em 59,3%, e redução linear do acúmulo de S à medida que se aumentou os níveis de  $Mn^{2+}$  (Figura 12D). Resultados semelhantes foram encontrados por Borges, et al. (2020), detectando uma diminuição no teor (23%) e acúmulo (50%) de enxofre em mudas de cana de açúcar pelo aumento da concentração de 0 a 70 mg/L de  $Al^{3+}$  na solução nutritiva.



**Figura 12.** Teor e acúmulo de enxofre (S) parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $Al^{3+}$  e níveis de  $Mn^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

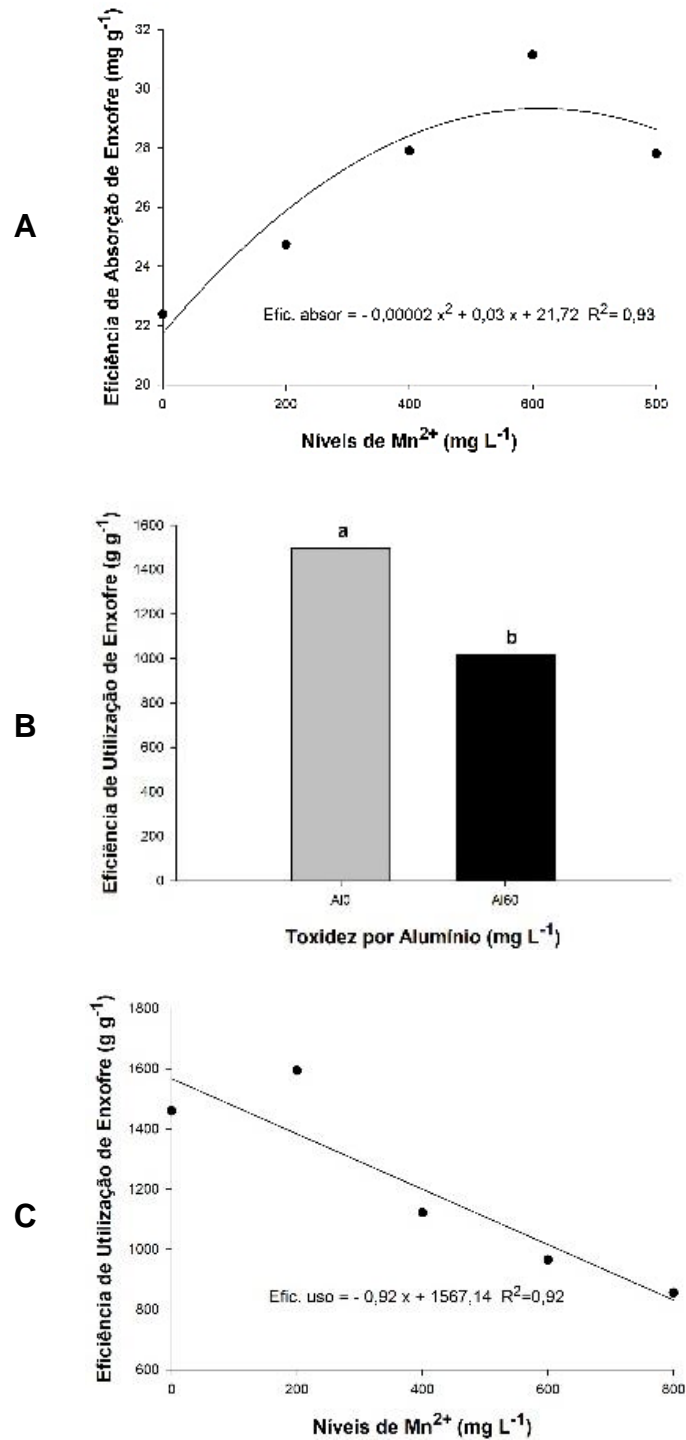
No sistema radicular o teor de S (Figura 13A) apresentou ( $P < 0,05$ ) quadrático até o nível  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Mn}^{2+}$ , com diminuição de 5,16% entre esse nível e  $800 \text{ mg/L}$ . Para o acúmulo de S nas raízes (Figura 13B) a interação  $\text{Al}^{3+} \times \text{Mn}^{2+}$  teve efeito significativo. Na ausência de Al as plantas acumularam mais S nas baixas concentrações de Mn, mas a redução desse acúmulo com a elevação dos níveis de Mn foi mais intensa nas plantas que cresceram na ausência de Al.



**Figura 13.** Teor e acúmulo de enxofre (S) na raiz de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $\text{Al}^{3+}$  e níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

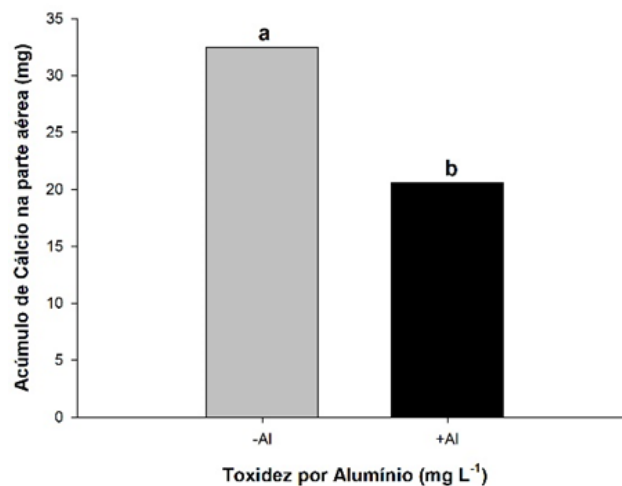
A eficiência de absorção de S aumentou quadraticamente até  $600 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Mn}^{2+}$ , mas acima dessa concentração o  $\text{Mn}^{2+}$  tendeu a prejudicar a eficiência de absorção de S (Figura 14A). Para a eficiência de utilização as plantas responderam melhor na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  com uma diferença de  $475 \text{ g g}^{-1}$  (31,74%) em relação a

presença de  $\text{Al}^{3+}$ (Figura 14B). Por sua vez a eficiência de uso do S foi reduzida linearmente com o aumento dos níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 14C).



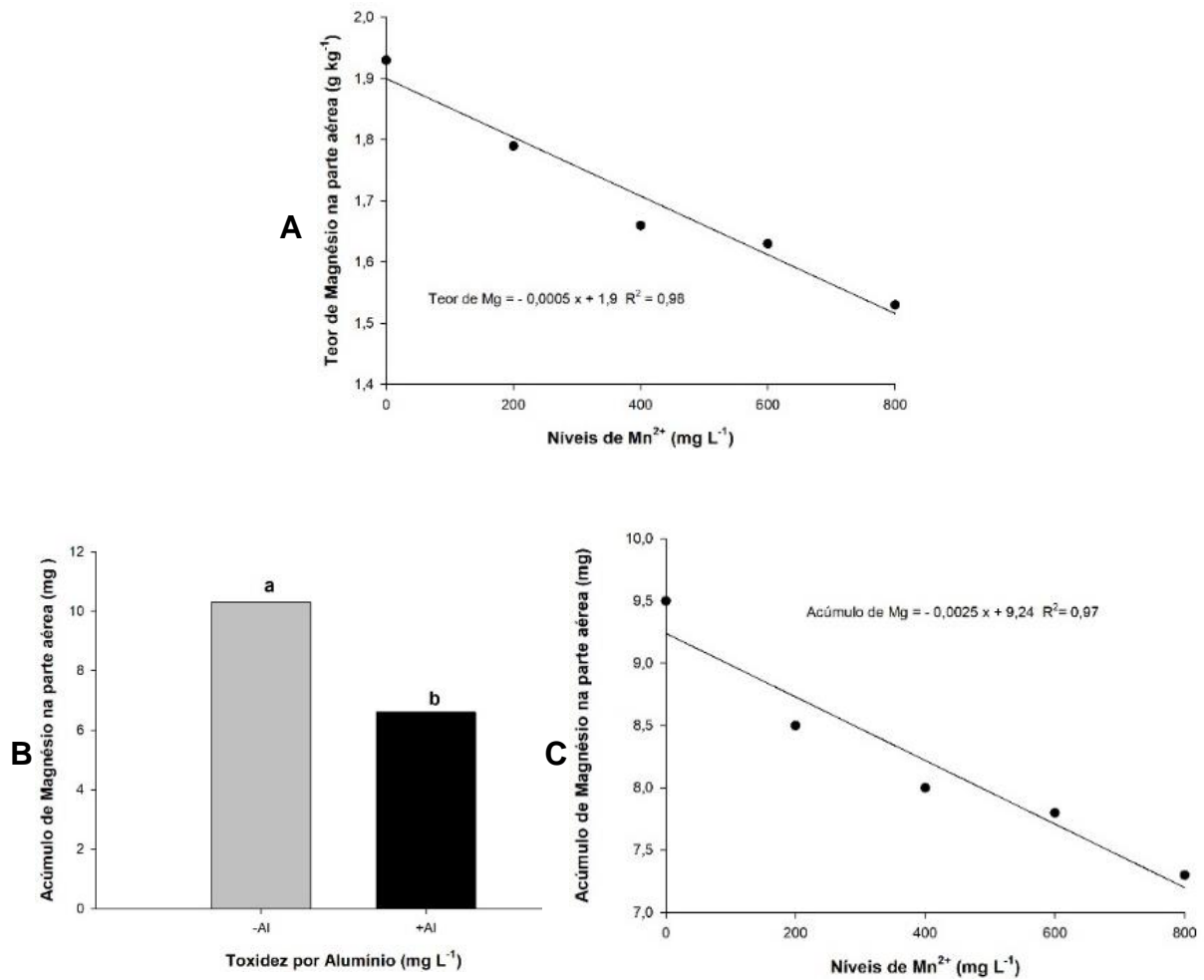
**Figura 14.** Eficiências de absorção (A) e utilização (B) de enxofre (S) de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $\text{Al}^{3+}$  e níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

O acúmulo de Ca na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  foi 36,6% maior quando comparado a presença de  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 15). Tais resultados corroboram com resultados observados por Salvador et al. (2000) que não observaram alterações significativas para o teor e acúmulo de Ca nas doses de 0 e  $5,0 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , enquanto grandes diminuições no teor e acúmulo de Ca foi verificado por Veloso et al. (1995) nas folhas e no caule de plantas que cresceram na presença de concentrações de Al acima de  $20 \text{ mg L}^{-1}$ .



**Figura 15.** Acúmulo de cálcio (Ca) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de  $\text{Al}^{3+}$  e níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

O teor de magnésio expressou redução linear com aumentos da concentração de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 16A). Por sua vez, o acúmulo de Mg na parte aérea (Figura 16B) melhor resultados na ausência de  $\text{Al}^{3+}$  com  $10,3 \text{ mg}$  de Mg em comparação  $6,6 \text{ mg}$  de Mg na presença de Al, uma diferença de 35,9%. Para o efeito independente dos níveis de  $\text{Mn}^{2+}$  (Figura 16C) que evidenciou resultados semelhantes ao teor de Mg, com redução linear. Segundo Faquin et al. (1997) e Malavolta et al. (1997), o alumínio solúvel, além de causar fitotoxicidade em plantas, compete com outros cátions, principalmente com Ca e Mg, para os mesmos locais de absorção no complexo de troca o que acaba interferindo no teor e acúmulo deles.



**Figura 16.** Teor e acúmulo de magnésio (Mg) na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar (IACSP95-5000) submetidas a presença e ausência de Al<sup>3+</sup> e níveis de Mn<sup>2+</sup> em sistema hidropônico alternativo adaptado para cana-de-açúcar.

No geral, na presença de alumínio a maior parte das variáveis avaliadas no estudo tiveram diminuição, assim como as eficiências de uso dos nutrientes foram drasticamente reduzidas pelos níveis crescentes de manganês, uma vez que essas variáveis estão diretamente relacionadas às características de cada cultura e/ou cultivar (Baligar et al., 2001), segundo esses pesquisadores um dos fatores que modificam a eficiência de utilização sob condições de toxicidade é a diminuição no conteúdo de nutrientes, a fim de reduzir o metabolismo vegetal. No presente trabalho houve altas reduções no acúmulo de nutrientes nas mudas de cana-de-açúcar e que esse genótipo demonstrou ser susceptível à toxicidade por Al e níveis crescentes de Mn, porque expressou baixa eficiência de uso de nutrientes quando submetido a altas

concentrações de Al e Mn, levando a uma redução na matéria seca (Fageria et al., 2008). Apesar de ocorrer para algumas variáveis um aumento na eficiência de absorção e de transporte, em geral, é limitada, reduzindo a participação de nutrientes no metabolismo vegetal e conversão em biomassa (Giannakoula et al., 2008), talvez devido a ação do Al e do Mn em níveis tóxicos nas reações enzimáticas relacionadas a eficiência de uso de nutrientes (Bojórquez-Quintal et al., 2017; Zhao e Shen, 2018).

Para maioria das variáveis avaliadas, verificou-se que a presença de Al induziu efeito tóxico e inibitório. A massa seca da parte aérea foi afetada de forma independente pela presença de  $Al^{3+}$  e pelo aumento da concentração de  $Mn^{2+}$ . Para a massa seca de raiz foi observado efeito da interação entre a presença de  $Al^{3+}$  e as doses de  $Mn^{2+}$ , que atuam de forma conjunta para causar grande limitação no crescimento do sistema radicular das plantas.

A maior parte dos teores e acúmulos de nutrientes avaliados na parte aérea e na raiz de mudas de cana-de-açúcar, responderam melhor na ausência de alumínio no sistema, e negativamente quando submetidos a níveis crescentes de manganês, e quando houve interação entre  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$ , os resultados demonstraram que o efeito tóxico foi potencializado pela ação conjunta deles.

Quando avaliadas as eficiências de absorção, translocação e utilização dos nutrientes, foi observado aumentos na absorção e na translocação. Entretanto, tais aumentos não se refletiram na eficiência de utilização. De forma geral observou-se que a interação entre esses elementos, em como os testados no presente trabalho, são altamente deletérios para mudas em processo de desenvolvimento.

#### **4. Conclusão**

Para massa seca de raiz, eficiência de utilização de N, teor de N na parte aérea, acúmulo de N na parte aérea, acúmulo de P na raiz, teor de K na raiz e acúmulo de S na raiz ocorreu efeito de interação negativa da  $Al^{3+}$  x  $Mn^{2+}$ . A eficiência de absorção de N e teor de K na parte aérea apresentaram efeito positivo da interação  $Al^{3+}$  x  $Mn^{2+}$ . As demais variáveis estudadas apresentaram efeito independente para toxicidade de  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$ .



## 5. Referências Bibliográficas

- Abreu MGP, Filho PFM, Garcia KGV, Silva Junior JMT, Albuquerque GHS, Araujo JM, Tavella LB (2019) Effect of Manganese on Growth and Nodulation of *Mimosa caesalpiniaefolia* (Benth.). *Journal of Agricultural Science* 11(2):339-352. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n2p339>
- Baligar VC, Fageria NK, He ZL (2001) Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 32(7-8):921-950. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104098>
- Barbosa JC, Maldonado Junior W (2015) **Experimentação Agronômica & Agroestat: Sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos**. Jaboticabal: Funep, 396 p.
- Bataglia OC, et al. (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, p.48. (Boletim técnico nº 78).
- Bojórquez-Quintal E, Escalante-Magaña C, Echevarría-Machado I, Martínez-Estévez M (2017) Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. **Frontiers in Plant Science**, 8(1767):1-18. <https://dx.doi.org/10.3389%2Ffpls.2017.01767>.
- Brito CM (2014) **Variabilidade genética de cana-de-açúcar na tolerância ao alumínio**. 32 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) – UFV, Viçosa.
- Borges CE, Cazetta JO, Sousa FBF, Oliveira KS (2020) Aluminum toxicity reduces the nutritional efficiency of macronutrients and micronutrients in sugarcane seedlings. **Ciência e Agrotecnologia**, 44: e015120. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044015120>.
- Caldarelli CE, Gilio L (2018) Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, 76: 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.008>.
- Cambráia J, Silva MA, Cano MAO, Sant'anna R (1991) Método simples para a avaliação de cultivares de sorgo quanto a tolerância ao alumínio. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, 3(2):87-95.
- Carlin SD, Rhein AFL, Santos DM (2012) Efeito simultâneo da deficiência hídrica e do alumínio tóxico no solo na cultivar IAC91-5155 de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, 33(2):553-564. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744112012>
- Delhaize E, Ryan PR (1995) Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology** 107(2):315–321. <https://doi.org/10.1104/pp.107.2.315>.
- Fageria LK, Baligar VC, Li YC (2008) The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. **Journal of Plant Nutrition**, 31(6):1121-1157. <https://doi.org/10.1080/01904160802116068>.

Faquin V, Vale FR, Furtini Neto AE (2012) **Cultivo de plantas em ambiente controlado: Solução nutritiva, hidroponia e em vasos com solo**. MEC/UFLA/DCS, Lavras, p.1-18.

Fonseca Júnior EM, Cambraia J, Ribeiro C, Oliva MA, Oliveira JA, DaMatta FM (2014) The effects of aluminium on the photosynthetic apparatus of two rice cultivars. **Experimental Agriculture**, 50(3):343-352. <https://doi.org/10.1017/S0014479713000471>.

Foy CD (1974) Effect of aluminum on plant growth. In: Carson FW (ed.) **The plant root and its environment**. Charlottesville, University Press of Virginia, 601-42.

Foy CD (1988) Plant adaptation to acid aluminum-toxic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19(7-12):959-987. <https://doi.org/10.1080/00103628809367988>.

Furlani PR, Furlani AM (1988) **Composição de pH de solução nutritiva para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 34 p. (Boletim Técnico, 121).

Giannakoula A, Moustakas M, Mylona P, Papadakis I, Yupsanis T (2008) Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline, and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. **Journal of Plant Physiology**, 165(4):385-396. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.01.014>

Godfray HCJ, et al. (2010) Food security: The challenge of feeding 9 billion people. **Science**, 327(5967): 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>

Guo P, Qi YP, Huang WL, Yang LT, Huang ZR, Lai NW, Chen LS (2018) Aluminum-responsive genes revealed by RNA-Seq and related physiological responses in leaves of two citrus species with contrasting aluminum tolerance. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 158:213-222 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.038>.

Hatamian M, Nejad AR, Kafi M, Souri MK, Shahbazi K (2020) Interaction of lead and cadmium on growth and leaf morphophysiological characteristics of European hackberry (*Celtis australis*) seedlings. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, 7(9):1-8. <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0173-0>

Jiang HX, Tang N, Zheng JG, Li Y, Chen LS (2009) Phosphorus alleviates aluminum-induced inhibition of growth and photosynthesis in *Citrus grandis* seedlings. **Physiologia Plantarum**, 137(3):298-331. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2009.01288.x>.

Kochian LV, Hoekenga OA, Piñeros MA (2004) How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Biology** 55: 459-493. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655>.

- Li B, Mckeand SE; Allen HL (1991) Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Science**, 37(2):613-626. <https://doi.org/10.1093/forestscience/37.2.613>.
- Maia C, Almeida C, Costa P, Melo Júnior JAG, Silveira G, Peernelli LA, Barbosa MHP, Bhering LL (2018) Phenotypic plasticity of sugarcane genotypes under aluminum stress. **Journal of Experimental Agriculture International** 22(3):1-11. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/40984>.
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira AS (1997) **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. 2ª ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p.319.
- Mariano ED, Keltjens WG (2005) Long-term effects of aluminum exposure on nutrient uptake by maize genotypes differing in aluminum resistance. **Journal of Plant Nutrition**, 28(2):323-333. <https://doi.org/10.1081/PLN-200047625>
- Marschner P (2012) **Mineral nutrition of higher plants**, 3rd ed. London: Academic Press, p.324–333. pp 605–626. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>.
- Nogueiro RC, Monteiro FA, Gratão PL, Borgo L, Azevedo RA (2015) Tropical soils with high aluminum concentrations cause oxidative stress in two tomato genotypes. **Environmental Monitoring and Assessment**, 187(73):1-16 <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-015-4282-3>
- Pittman JK (2005) Managing the manganese: molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis. **The New Phytologist** 167(3):733–742. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01453.x>.
- Phukunkamkaew S, Tisarum R, Pipatsitee P, Samphumphuang T, Maksup S, Cha-Um S (2021) Morpho-physiological responses of indica rice (*Oryza sativa* sub. indica) to aluminum toxicity at seedling stage. **Environmental Science and Pollution Research**, 28: 29321:29331. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12804-1>.
- Rashed MN (2010) Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. **Journal of Hazardous Materials**, 178(1-3):739–746. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.01.147>.
- Riaz M, Yan L, Wu X, Hussain S, Aziz O, Wang Y, Imran M, Jiang C (2018) Boron alleviates the aluminum toxicity in trifoliolate orange by regulating antioxidant defense system and reducing root cell injury. **Journal of Environmental Management**, 208:149-158. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.008>.
- Rossiello ROP, Jacob Netto J (2006) Toxicidade de alumínio em plantas: Novos enfoques para velho problema. In: Fernandes MS (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - SBCS, p.375-418.

Salvador JO, Moreira A, Malavolta E, Cabral CP (2000) Influência do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24(4):787-796. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400011>.

Siddiqi MY, Glass ADM (1981) Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutriente utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, 4(3):289-302. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>.

Singh S, Tripathi DK, Singh S, Sharma S, Dubey NK, Chauhan DK, Vaculík M (2017) Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. **Environmental and Experimental Botany**, 137:177-193. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.005>.

Siqueira JA, Barros JA, Dal-Bianco M, Martins SC, Magalhães PC, Ribeiro DM, Damatta FM, Araújo WL., Ribeiro C (2020) Metabolic and physiological adjustments of maize leaves in response to aluminum stress. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, 32:133-145. <https://doi.org/10.1007/s40626-020-00175-w>.

Souri MK, Hatamian M, Tesfamariam T (2019) Plant growth stage influences heavy metal accumulation in leafy vegetables of garden cress and sweet basil. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, 6(1):1-25. <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0170-3>.

Sousa FBF, Cazetta JO, Nascimento SS (2018) The different response of sugarcane genotypes in multiple stress. **Ciência e Agrotecnologia**, 42(5):527-539. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018425020718>.

Souza LT, Cambraia J, Ribeiro C, Oliveira JÁ, Silva LC (2016) Effects of aluminum on the elongation and external morphology of root tips in two maize genotypes. **Bragantia**, 75(1):19-25. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.142>.

Swiader JM, Chyan Y, Freiji FG (1994) Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, 17(10):1687-1699. <https://doi.org/10.1080/01904169409364840>.

ÚNICA (União Da Indústria da Cana-de-açúcar) (2020) **Balço de atividades de 2012/13 a 2018.2019**. Disponível em: <https://www.unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Relatorio-Atividades-201213-a-201819.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2020.

Veloso CAC, Muraoka T, Malavolta E, Carvalho JG (1995) Efeitos do alumínio em pimenteiras do reino (*Piper nigrum*, L.) cultivadas em solução nutritiva. **Scientia Agricola**, 52(2):368-375 <https://doi.org/10.1590/S0103-90161995000200027>.

Wang S, Ren X, Huang B, Wang G, Zhou P, An Y (2016) Aluminium-induced reduction of plant growth in alfalfa (*Medicago sativa*) is mediated by interrupting auxin transport and accumulation in roots. **Scientific Reports**, 6(30079):1-13. <https://doi.org/10.1038/srep30079>.

Yan W, Acharjee TC, Coronella CJ, Vásquez VR (2009) Thermal pretreatment of lignocellulosic biomass. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 28(3):435-440. <https://doi.org/10.1002/ep.10385>.

Yang ZB, You JF, Xu MY, Yang ZM (2009) Interaction between aluminum toxicity and manganese toxicity in soybean (*Glycine max*). **Plant and Soil**, 319(1-2):277-289. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9869-9>.

Zhao XQ, Shen RF (2018) Aluminum-nitrogen interactions in the soil-plant system. **Frontiers in Plant Science**, 9(807):1-15. <https://dx.doi.org/10.3389%2Ffpls.2018.00807>.

### **CAPÍTULO 3 - BIOMETRIA E ESTADO NUTRICIONAL DE MUDAS DE CANA-ENERGIA E CANA-DE-AÇÚCAR EM CONDIÇÕES DE ESTRESSE POR ALUMÍNIO.**

Diego Correia Sodré<sup>1</sup>, Jairo Osvaldo Cazetta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de tecnologia, laboratório de Análise Química de Plantas, FCAV/Unesp (Jaboticabal, SP).

**RESUMO** – Os efeitos do alumínio sobre o teor e acúmulo de nutrientes minerais nas culturas tenha sido estudado, pouco é conhecido sobre seus efeitos na interação com genótipos de cana-de-açúcar e cana-energia aliada a eficiência nutricional de nitrogênio. Portanto este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da toxicidade do alumínio no crescimento, teor, acúmulo e eficiência nutricional de nitrogênio em mudas de cana-energia e cana-de-açúcar. Mudas de cana-energia (vertix 9 e vertix 2) e cana-de-açúcar (IACSP95-5000), obtidas a partir de miniestacas de uma gema (3 cm), foram utilizadas no teste. Elas foram submetidas a delineamento inteiramente casualizado em que temos 3 genótipos distintos x 2 (presença ou ausência de  $Al^{3+}$ ) na concentração de 60 mg L<sup>-1</sup> e 4 repetições, totalizando 24 unidades experimentais. Após 50 dias da submissão das mudas foram avaliados os efeitos dos tratamentos sobre variáveis biométricas o teor, o acúmulo e a eficiências nutricionais (absorção, translocação e utilização) de nitrogênio. Para as variáveis biométricas só houve efeito de interação entre os genótipos x  $Al^{3+}$  no diâmetro de colmo, ficando as demais apenas respondendo de forma independente para um ou outro tratamento, já para as variáveis nutricionais verificamos que o teor de nitrogênio na parte aérea e na raiz, assim como a eficiência de utilização de N foram significativos para interação gen x  $Al^{3+}$ , ficando os acúmulos na parte aérea e raiz respondendo apenas para o tratamento com  $Al^{3+}$  e a eficiência de absorção significativa para genótipos ou  $Al^{3+}$  de forma independente. Os efeitos fitotóxicos causados pela presença de  $Al^{3+}$  foi prejudicial para todas as variáveis testadas, independente do genótipo, contudo o diâmetro de colmo e teor de N na parte aérea na presença de  $Al^{3+}$  os genótipos de cana-energia foram superiores. contudo, na eficiência de utilização de N a cana-de-açúcar foi mais eficaz que os de cana energia.

Palavras-chaves: Vertix tipo 2, vertix tipo 9, genótipo, acúmulo, estresse abiótico.

## 1. Introdução

O Brasil destaca-se no cenário internacional como o maior produtor de cana-de-açúcar, mostrando que tal cultura apresenta grande importância para o agronegócio brasileiro (Unica, 2020). O aumento da procura e consumo de etanol produzido de fontes renováveis, associado a fatores edafoclimáticos favoráveis ao cultivo de cana-de-açúcar, tornam o Brasil propício nas exportações (CONAB, 2021).

A indústria da cana-de-açúcar também tem buscado cada vez mais a eficiência energética, gerando energia elétrica pelo uso do bagaço como combustível para mover os geradores, o que pode diminuir custos de produção e ainda agregar sustentabilidade para a atividade. A produção movimenta a economia do Brasil em todos os aspectos, desde geração de empregos até a importância elevada do uso de defensivos agrícolas.

Essa demanda por fibra impulsionou melhoramentos genéticos para a obtenção de variedades chamadas de cana-energia ou cana fibra, que produzem mais fibra que as variedades tradicionais de cana-de-açúcar, mas ainda faltam estudos que informem sobre seu comportamento sob fatores estressantes e aspectos nutricionais.

Apesar da boa perspectiva de demanda de açúcar, etanol e outros usos da cana para os próximos anos, fatores abióticos relacionados a causas edafoclimáticas representam uma grande porção de estresse para a planta, destacando-se a toxicidade por alumínio (Al), que em plantas é considerado um dos principais fatores que limitam a produtividade vegetal na agricultura (Zhou et al., 2015; Maia et al., 2018; Yan et al., 2019).

Desde o ponto de vista sustentável, o empenho pelo aumento da produtividade das culturas na agricultura moderna requer o conhecimento cada vez maior das influências que o meio ambiente causa nas plantas cultivadas, especialmente nas novas variedades, e sua comparação com as variedades tradicionais. A proteção eficaz das culturas exige que se tenha conhecimento apropriado sobre o efeito individual e interativo dos estresses que podem acometer as plantas, bem como a detecção precoce e precisa dos diferentes tipos de estresses abióticos, de modo a

permitir a utilização das estratégias de controle de maneira eficaz e sustentável (Behmann et al., 2015).

Desta forma o presente estudo visa avaliar os efeitos da toxicidade do alumínio no crescimento, teor, acúmulo e eficiência nutricional de nitrogênio em mudas de cana-energia e cana-de-açúcar.

## **2. Materiais e Métodos**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), Jaboticabal, SP (21°15'22" S e 48°18'58" W), com altitude de 575 m.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 3x2, sendo 3 genótipos: cana-energia G1 (vertix tipo 2), cana-energia G2 (vertix tipo 9) e cana-de-açúcar G3 (IACSP95-5000), e dois níveis de  $Al^{3+}$ , com 4 repetições.

Os genótipos de cana-energia são da empresa GranBio. A Tabela 1 mostra a comparação das características entre a cana-de-açúcar e cana-energia; de cana-de-açúcar variedade IACSP95-5000 que apresenta as seguintes características: porte ereto; ótima performance na colheita mecanizada; ótima brotação de soqueira sob palha; indicada para ambientes médios - favoráveis; perfil responsivo ao manejo; ótimo desempenho no plantio de inverno. responde a maturador.

Para realização deste estudo, a solução nutritiva foi fornecida por meio do sistema descrito por Dantas et al. (2001). As mudas foram obtidas a partir de "minitoletes do colmo" ou "toletes ou minirrebolos" (com 3 cm de comprimento) contendo uma gema, seguindo o método descrito por Carlin et al. (2012) e adaptado por Sousa et al. (2018), que consiste em plantar os minitoletes do colmo imediatamente após o corte em recipientes de plástico com capacidade para 500mL, com orifícios na parte inferior, e contendo areia lavada e peneirada (2 mm).



**Tabela 1.** Características da cana-energia. Fonte: GranBio Investimentos S.A.

Características	Cana-de-açúcar (1)	Cana-energia (2)
Fibra	17,40%	27%
Açúcares	12,60%	8,50%
Produtividade (massa verde t ha <sup>-1</sup> )(3)	92	180
Produtividade (fibra t ha <sup>-1</sup> )	16	48,6
Produtividade (açúcares t ha <sup>-1</sup> )	11,6	15,3
Ganho Genético (ao ano)	2%	5%
Exigência em Fertilidade	Alta	Média
Resistência a pragas e doenças	Baixa	Média
Colheitas (por ciclo)	5	10
Taxa de Propagação	01:05	01-100
Ciclo de Melhoramento (anos)	8 a 12	4 a 6

(1) Considerando a colheita de 50% da palha (TCH de 80)

(2) Cultivar Vertex

(3) São Paulo, Ambiente E

As mudas foram cultivadas sem restrição hídrica por 28 dias. Após esse período foram selecionadas por sanidade e homogeneidade, sendo transplantadas para vasos plásticos com capacidade de 1L (dimensões de 15 x 9 x 9 cm) com pequenos orifícios na base para permitir a entrada de solução nutritiva e contendo 750 ml de areia lavada. Em seguida, os vasos plásticos descritos foram colocados em potes com dimensões 23 x 9 cm, na qual foi mantida uma lâmina de 5 cm de solução nutritiva, preparada de acordo com tratamento.

As mudas foram cultivadas em solução nutritiva base formulada como uma solução completa (Furlani e Furlani, 1988). Apresentava os seguintes constituintes: 3,1 ml L<sup>-1</sup> Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 1,64 mol L<sup>-1</sup>, 3,1 ml L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 0,42 mol L<sup>-1</sup>, 2,2 ml L<sup>-1</sup> KCl 0,25 mol L<sup>-1</sup>, 2,2 ml L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,25 mol L<sup>-1</sup>, 2,2 ml L<sup>-1</sup> KNO<sub>3</sub> 0,24 mol L<sup>-1</sup>, 1,6 ml L<sup>-1</sup> Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0,96 mol L<sup>-1</sup>, 0,3 ml L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0,13 mol L<sup>-1</sup>, 0,6 ml L<sup>-1</sup> FeDDH 0,16 mol L<sup>-1</sup>, 0,6 ml L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>2</sub> 0,03 mol L<sup>-1</sup>, 0,6 ml L<sup>-1</sup> ZnSO<sub>4</sub> 0,005 mol L<sup>-1</sup>, 0,6 ml L<sup>-1</sup> CuSO<sub>4</sub> 0,001 mol L<sup>-1</sup>, e 0,6 ml L<sup>-1</sup> Na<sub>3</sub>MoO<sub>2</sub> 0,001 mol L<sup>-1</sup> com pH de 4,5 ± 0,1.

Para o tratamento Al0, as plantas foram cultivadas em solução nutritiva base com pH 5,5 ± 0,1. Quanto ao tratamento Al60 (60 mg L<sup>-1</sup>) foi utilizado alumínio na

forma de  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  junto com a mesma solução nutritiva com elevada acidez ( $4,5 \pm 0,1$ ). O estabelecimento da dose de alumínio ( $60 \text{ mg L}^{-1}$ ) foi definido conforme descrito em Sousa et al. (2018). Diariamente, completava-se o nível de solução com água destilada e, a cada dois dias se substituía por uma nova solução.

Transcorridos 50 dias da submissão das mudas aos tratamentos, foram realizadas as avaliações não destrutivas da altura de planta (AP), área foliar (AF) e do diâmetro do colmo (DC). A altura da planta foi avaliada com o auxílio de régua graduada medindo-se desde o nível do solo até a última aurícula visível, classificada como folha (+1); para o diâmetro do colmo, utilizou-se um paquímetro, medindo o diâmetro na base da planta. A área foliar foi determinada seguindo metodologia proposta por Hermann e Câmara (1999), de acordo com a equação  $AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2)$ , em que: AF= área foliar ( $\text{cm}^2$ ); C = comprimento da folha +1 estudada (cm); L = largura da folha estudada (cm); 0,75 = fator de forma; N = número de folhas totalmente abertas e com pelo menos 20% de área verde e 2 = fator de correção.

Após colhidas, todas as plantas foram divididas em folha, colmo e raiz. O volume radicular das plantas (VR) foi determinado mergulhando as raízes numa proveta com água destilada e medindo-se o volume deslocado, em milímetros (ml). A seguir, todas as amostras foram colocadas em sacos de papel devidamente identificados, pesadas para a determinação da massa fresca, e em seguida colocadas em estufa de circulação forçada de ar regulada para  $65 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  até atingir peso constante. A relação parte aérea / raiz (PA/R) foi determinada a partir da razão entre massa seca de parte aérea e raiz, em gramas com duas casas decimais.

A tolerância a toxidez abiótica é a capacidade de manter estável o crescimento e os valores de outros parâmetros fisiológicos quando submetidos a condições estressantes (Maia et al., 2018). Portanto, não é adequado comparar valores absolutos de variáveis obtidas a partir de genótipos distintos. Para isolar o efeito particular de cada genótipo e verificar o efeito da toxidez, os resultados das variáveis altura de planta, diâmetro de colmo, área foliar de planta, volume de raiz e relação parte aérea/raiz, foram relativizados. Isso foi realizado, considerando-se o valor médio das repetições de cada genótipo sem toxidez como sendo 100%, e esse valor foi utilizado para calcular os valores relativos de todos os dados (inclusive o das

repetições sem toxidez) obtidos em todas as unidades experimentais pertencentes ao mesmo genótipo.

Os dados relativizados para as variáveis AP, DC, VR, AF, relação PA/R foram submetidos à análise de variância. Quando os valores de F foram significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram processadas utilizando os programas de análise estatística AGROESTAT (Barbosa e Maldonado Junior, 2015).

### 3. Resultados e Discussão

Ocorreu efeito significativo ( $p < 0,05$ ) para interação genótipo x alumínio apenas para a variável diâmetro de colmo relativo, enquanto as variáveis restantes foram influenciadas de forma independente para genótipos ou alumínio (Tabela 2).

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância das variáveis de altura de planta relativa (AP), diâmetro de colmo (DC), área foliar de planta (AFP), volume de raiz (VR), e relação parte aérea / raiz (P/R) em relação aos tratamentos utilizados no experimento.

Causas de var.	GL	Alt. Planta	Diâm. Colmo	A. foliar	Vol. Raiz	Rel. PA/R
Genótipo (Gen)	2	0,80 <sup>NS</sup>	6,18 <sup>**</sup>	2,47 <sup>NS</sup>	0,40 <sup>NS</sup>	6,26 <sup>**</sup>
Alumínio (Al)	1	27,07 <sup>**</sup>	11,35 <sup>**</sup>	61,42 <sup>**</sup>	24,11 <sup>**</sup>	30,1 <sup>**</sup>
Gen x Al	2	0,80 <sup>NS</sup>	5,58 <sup>*</sup>	2,68 <sup>NS</sup>	0,70 <sup>NS</sup>	1,58 <sup>NS</sup>
Cv		10,26	1,63	11,22	8,36	23,6
Resíduo	19					
total	24					

(\*): significativo à 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ )

(\*\*): significativo à 1% de probabilidade ( $P < 0,01$ )

(NS): não significativo ( $P > 0,05$ )

A única variável biométrica que apresentou efeito ( $p < 0,05$ ) de interação entre Gen x  $Al^{3+}$  foi o diâmetro de colmo (Figura 1B), Observando que a comparação é feita entre os genótipos em Al0 ficando todos iguais estatisticamente, porém quando comparamos os genótipos em Al60 percebemos que os genótipos 1 e 2 são superiores (25,9% e 32,4%) estatisticamente ao genótipo 3, mais precisamente as cana-energia obtiveram mais incremento em diâmetro de colmo quando expostas a toxidez por  $Al^{3+}$  a cana-de-açúcar. o colmo é considerado o produto agrícola, este apresenta células com vacúolos onde a sacarose fica acumulada durante a maturação.

A produtividade da cana-de-açúcar leva em consideração a produtividade total de colmos, bem como o acúmulo de açúcar nestes. Destaca-se que o cultivo da cana-de-açúcar se concentra na fase vegetativa, uma vez que a floração e a frutificação da planta não apresentam interesse agrícola (ARALDI et al., 2010). Assim, como a cana-energia tem grande rusticidade, pois seu vigoroso sistema radicular e presença de

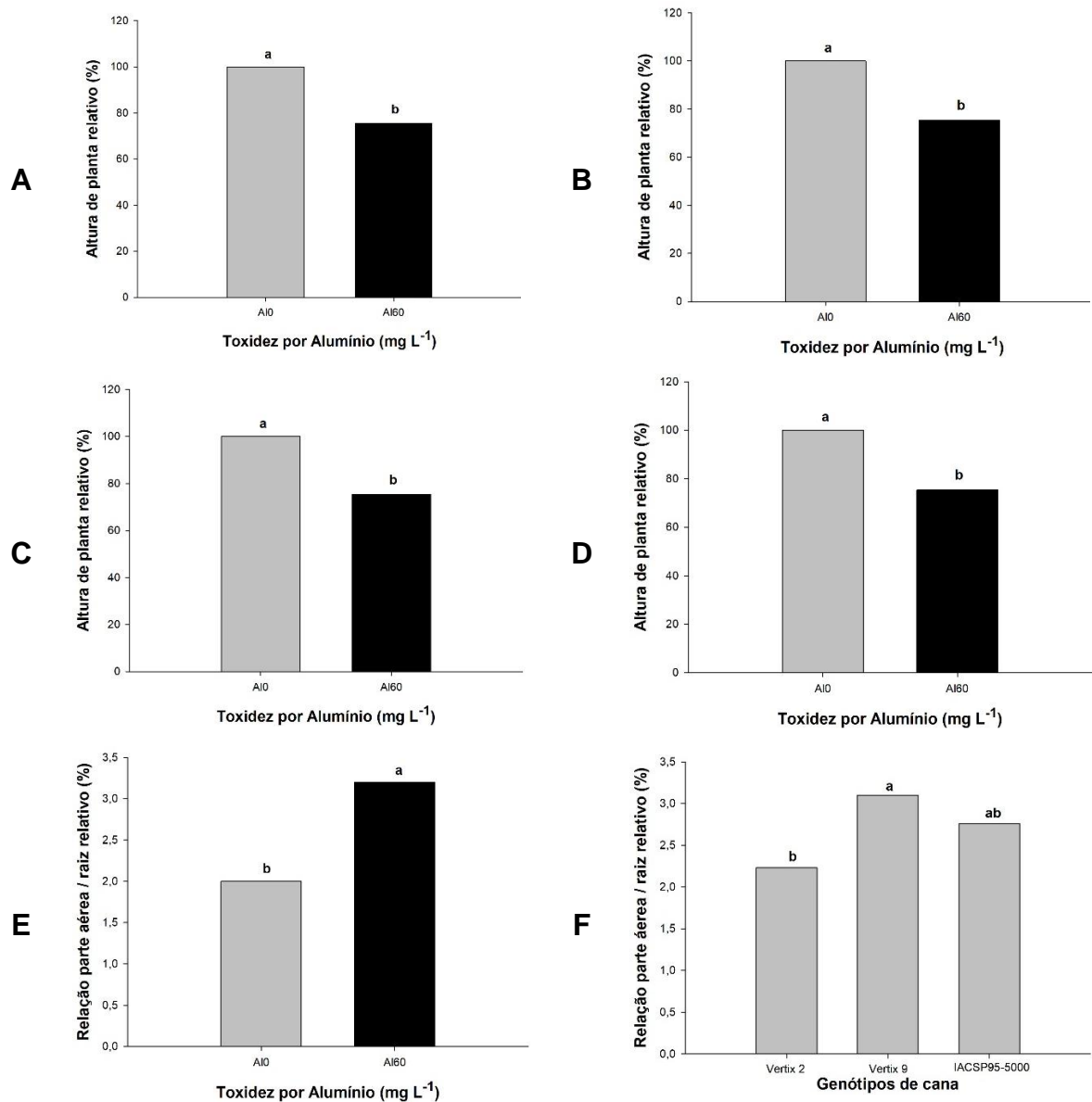
rizomas lhe confere uma melhor tolerância ao estresse hídrico e maior eficiência no uso de nutrientes (Matsuoka et al., 2014; Nunes Jr, 2016).

As variáveis de AP (Figura 1A), AFP (Figura 1C) e VR (Figura 1D) em AI0 na solução proporcionou que elas apresentassem 25%; 34,9% e 29,8% simultaneamente resultados superiores em relação a AI60. A inibição de crescimento em altura, área foliar e volume de raiz está relacionada com a fitotoxidez por alumínio (FOY E FLEMING, 1978). Essa fitotoxidez primeiramente afeta as raízes, coibindo o crescimento e mudanças na estrutura do tecido, assim como também nas reações enzimáticas, ocasionando o estresse oxidativo, e interferindo na absorção e condução de outros nutrientes, levando assim a deficiência nutricional na planta (TABALDI et al., 2009; Butare et al., 2011). A área foliar é um dos componentes mais importantes da produção e acumulação de biomassa. Maiores áreas foliares oferecem maiores superfícies para a produção de fotossintatos, no entanto, sob condições de toxidez pode ser prejudicial e interferir no crescimento e sobrevivência das plantas (TAIZ E ZEIGER, 2013). Portanto, a área foliar é considerada uma boa ferramenta na seleção de genótipos a toxidez abiótico (QUEIROZ et al., 2011; GIMENEZ et al., 2013)

A relação PA/R foi maior em AI60 (Figura 1E), devido à diminuição de massa de raiz. Em contraste, essa relação foi menor na AI0, demonstrando uma maior porcentagem de assimilados no sistema radicular em detrimento a parte aérea das plantas. A redução na raiz devido à toxicidade do alumínio foi observada para muitas culturas, como arroz (MACÊDO E JAN, 2008; AWASTHI et al. 2017), cevada (TAMÁS et al. 2006), *Jatropha curcas* L. (TISTAMA et al., 2012) e milho (DE SOUZA et al. 2016).

A relação massa seca da parte aérea/ raiz (Figura 1F) foi estatisticamente igual quando comparamos os dois genótipos de cana-energia (G1 e G2) com o genótipo de cana-de-açúcar (G3). Porém quando comparando os genótipos 1 e 2 observamos que o segundo obteve maior incremento na relação PA/R que o primeiro. Isso estar relacionado com as próprias características do genótipo de cana energia que poderia estar tendendo a acumular mais massa seca no sistema radicular, em detrimento do acúmulo de assimilados na parte aérea. Diferentemente do genótipo de cana-de-açúcar que por possuir características de maior acúmulo de assimilados na parte

aérea visando a produção de sacarose. Na realidade, folhas e raízes têm altas taxas de renovação, o que faz com que suas biomassas e conteúdo de carbono, existentes num dado momento, possam não refletir a maior dinâmica desses componentes. Ou seja, a alocação de carbono para folhas e raízes finas seria muito maior do que a indicada por suas partições determinadas em avaliações pontuais (BEHLING et al. 2018).



**Figura 1.** Valores relativos de altura de planta, diâmetro de colmo, área foliar de planta, volume de raiz e relação parte aérea / raiz de três genótipos de cana (G1 = energia tipo 2; G2 = energia tipo 9 e G3 = açúcar (IACSP95-5000)) submetidas à ausência ou presença de Al<sup>3+</sup> em sistema hidropônico alternativo adaptado.

O resumo da análise de variância mostra a ocorrência de interação para as variáveis teor de nitrogênio na parte aérea, teor de nitrogênio na raiz e eficiência de utilização de nitrogênio. Ressaltando que a única variável que não apresentou efeito significativo para os tratamentos estudados foi a eficiência de translocação de nitrogênio, sendo que para as demais variáveis o efeito foi independente para genótipos ou tratamento com Al60 ou Al0 (tabela 3)

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância das variáveis de teor de nitrogênio na parte aérea (Teor N Pa), teor de nitrogênio na raiz (Teor N Ra), acúmulo de nitrogênio na parte aérea (Ac. N Pa), acúmulo de nitrogênio na raiz (Ac. N Ra), eficiência de absorção de nitrogênio (Ef. Absor), eficiência de translocação de nitrogênio (Ef. Trasl) e eficiência de utilização de nitrogênio (Ef. Util) em relação aos tratamentos utilizados no experimento.

causas de var.	GL	Teor N Pa	Teor N Ra	Ac. N Pa	Ac. N Ra	Ef. Absor	Ef. Trasl	Ef. Util
Genótipo (Gen)	2	4,42 *	11,46 **	1,13 NS	0,55 NS	5,59 *	0,96 NS	0,99 NS
Alumínio (Al)	1	35,97 **	11,62 **	26,23 **	15,19 **	13,12 **	0,07 NS	31,82 **
Gen x Al	2	7,41 **	8,09 **	1,68 NS	0,82 NS	2,32 NS	0,31 NS	5,75 *
Cv		15,45	5,67	15,47	13,83	7,54	0,4	13,24
Resíduo	19							
total	24							

(\*): significativo à 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ )

(\*\*): significativo à 1% de probabilidade ( $P < 0,01$ )

(NS): não significativo ( $P > 0,05$ ).

A eficiência de absorção apresentou efeito independente para os tratamentos com Genótipos ou Al<sup>3+</sup>, como observamos (Figura 2A) quando comparadas a cana-energia (G1 e G2) foi maior cerca de 37,53% e 42,77% respectivamente em relação a cana-de-açúcar (G3). Segundo SILVA et al. (2021) a cana-energia desenvolve primeiro a parte aérea e depois a raiz, ao contrário da cana-de-açúcar, que desenvolve primeiro a raiz para depois desenvolver a parte aérea. Além disso, a cana-energia cresce mais rápido do que a cana-de-açúcar, e seu crescimento ocorre tanto de dia quanto de noite, sugerindo que o metabolismo de partição de carbono em cana-energia é diferente em relação a cana-de-açúcar (De Abreu et al., 2020), o que justificaria o fato de que sob fitotoxicidade possuir uma planta com a parte aérea mais desenvolvida teria maiores possibilidade de uma melhor eficiência de absorção de nitrogênio. Contudo observamos (Figura 2B) que as mudas de cana apresentaram

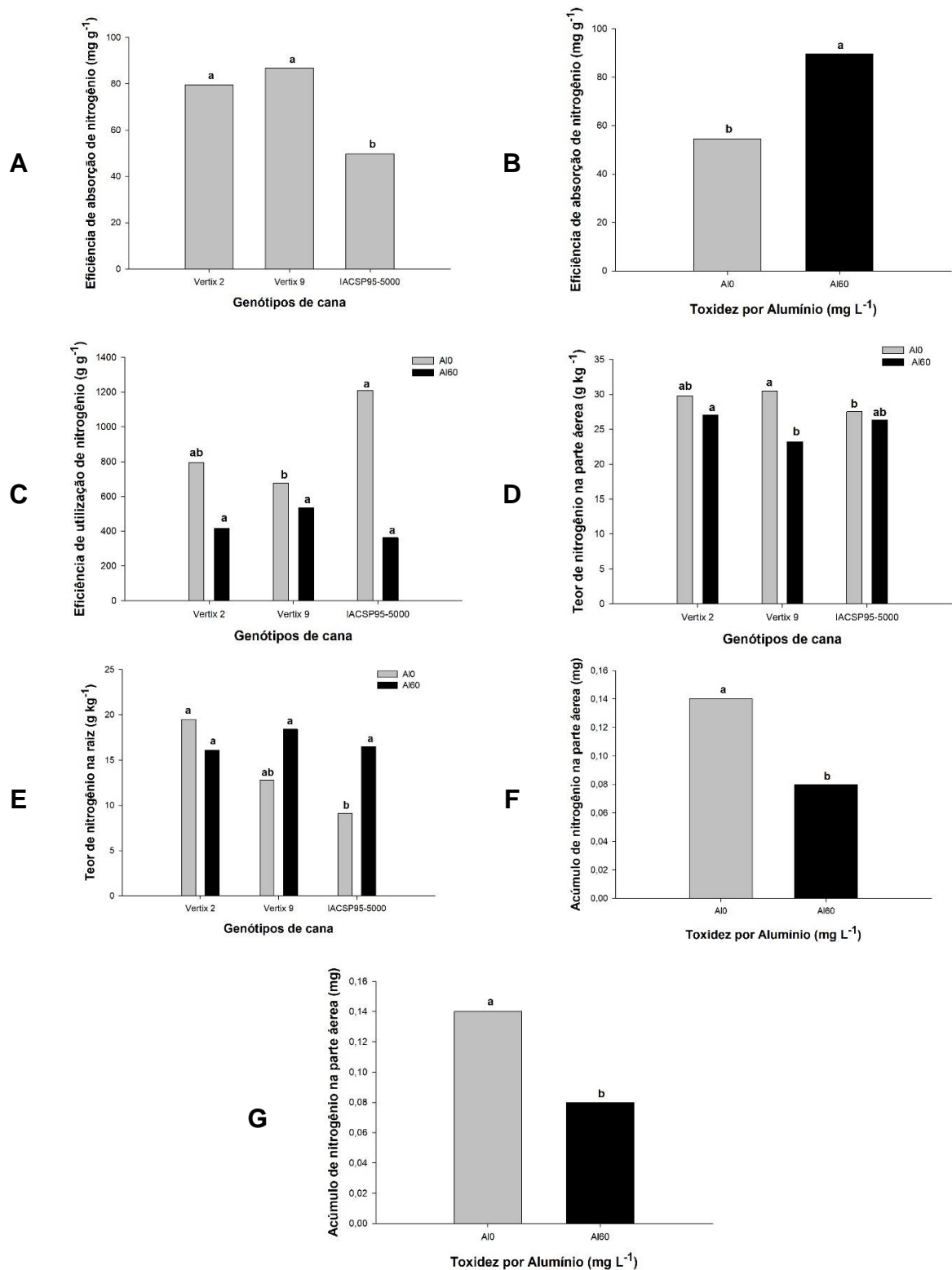
uma melhor (39,22% a mais) eficiência de absorção de nitrogênio em Al60 apresentou resultados semelhantes ao trabalho realizado por Borges et al. (2020) aonde trabalho com doses de alumínio e observou que com o aumento de alumínio (0 a 70 mg L<sup>-1</sup>) percebeu que a eficiência de absorção aumentou juntamente.

Contudo a variável eficiência de utilização de nitrogênio (Figura 2C) demonstrou interação Gen x Al<sup>3+</sup>, no qual em Al0 a cana-de-açúcar (G3) foi superior cerca de 44,14% à cana-energia (G2) todavia estatisticamente igual a cana-energia (G1). Quando comparadas no tratamento com Al60 os genótipos foram iguais. A eficiência de utilização de nitrogênio pelas plantas é de extrema importância pois o nitrogênio influencia o aparato fotossintético ao longo da folha da cana-de-açúcar e cana-energia, aumentando o conteúdo de clorofila, a quantidade e a atividade das enzimas de carboxilação, proteína total, conteúdo de açúcar, N total e metabólitos relacionados à fotossíntese (Bassi et al., 2018).

O teor de nitrogênio na parte aérea (Figura 2D) e na raiz (Figura 2E) tiveram efeito de interação Gen x Al<sup>3+</sup>, sendo que na parte aérea na Al0 o genótipo de cana-energia (G2) foi cerca de 9,47% melhor em comparação ao genótipo de cana-de-açúcar (G3) e igual estatisticamente ao G1. Porém na Al60 o genótipo 1 e 3 foram semelhantes. Já o teor na raiz tivemos o genótipo G1 superior em 53,39% ao G3 na Al0, não obstante na Al60 todos os genótipos apresentaram semelhança estatisticamente.

Os resultados apresentados para acúmulo de nitrogênio na parte aérea (Figura 2F) e na raiz (Figura 2G) foram independentes para o tratamento com Al<sup>3+</sup> onde na Al0 as plantas tiveram um incremento 38,72% na parte aérea e 46,86% na raiz. O elemento também pode ser acumulado em excesso na planta. Segundo Fagan et al. (2016) o N compõe cerca de 1% da biomassa seca total das plantas, contudo, essa proporção pode ser modificada a depender de fatores como a própria disponibilidade de N.





**Figura 2.** Eficiências (absorção, translocação e utilização), teor e acúmulo de nitrogênio (N) na parte aérea e raiz de três genótipos de cana (G1 = energia tipo 2; G2 = energia tipo 9 e G3 = açúcar (IACSP95-5000)) submetidas à ausência ou presença de  $\text{Al}^{3+}$  em sistema hidropônico alternativo adaptado.

#### **4. Conclusão**

Os efeitos deletérios causado pelo alumínio afetou todas as variáveis estudadas, sendo que para diâmetro de colmo os genótipos 1 e 2 de cana-energia foram superiores em 25,9% e 32,4% ao genótipo 3, assim como teor e acúmulo de nitrogênio na parte aérea e raiz na Al0.

Os genótipos de cana-energia foram cerca de 9,47% (parte aérea) e 53,39% (na raiz) superiores a cana-de-açúcar. A eficiência de utilização de nitrogênio, na Al0 o genótipo 3 (cana-de-açúcar) foi cerca de 44,4% mais eficiente do que nas cana-energia.

## 5. Referências Bibliográficas

- Abreu LGF, Grassi MCB, Carvalho LM, Silva JJB, Oliveira JVC, Bressiani JÁ, Pereira GAG (2020) Energy cane vs sugarcane: Watching the race in plant development. **Industrial Crops & Products** 156, 1128683. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112868>
- Araldi R, Silva FML, Ono EO, Rodrigues JD (2010) Florescimento de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, 40(3):694-702. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000033>.
- Awasthi JP, Saha B, Regon P, Sahoo S, Chowra U, Pradhan A, Roy A, Panda SK (2017) Morphophysiological analysis of tolerance to aluminum toxicity in rice varieties of Northeast India. **PLOS ONE** 12(4): e0176357. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176357>.
- Barbosa JC, Maldonado Junior W (2015) **Experimentação Agrônômica & Agroestat: Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: Funep, 396 p.
- Bassi D, Menossi M, Mattiello L (2018) Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. **Scientific Reports** 8, 2327. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20653-1>
- Behling M, Felipe RTA, Farias JB, Carvalho G, Neves JCL (2018). Relações entre parte aérea e raízes em povoamentos de teca. **Revista Ceres**, 65(6): 463-473. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201865060001>.
- Behmann J, Mahlein AK, Rumpf T, Römer C, Plümer L (2015) A review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. **Precision Agriculture** 16(3): 239-260. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9372-7>.
- Borges CE, Cazetta JO, Sousa FBF, Oliveira KS (2020) Aluminum toxicity reduces the nutritional efficiency of macronutrients and micronutrients in sugarcane seedlings. **Ciência e Agrotecnologia**, 44: e015120. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044015120>.
- Butare L, Rao I, Lepoivre P, Polania J, Cajiao C, Cuasquer J, Beebe S (2011) New genetic sources of resistance in the genus *Phaseolus* to individual and combined stress factors of combined aluminum toxicity and progressive soil drying stresses. **Euphytica** 181:385-404. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0468-0>.
- Carlin SD, Rhein AFL, Santos DM (2012) Efeito simultâneo da deficiência hídrica e do alumínio tóxico no solo na cultivar IAC91-5155 de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, 33(2):553-564. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744112012>
- CONAB (2021) **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Safra 2020/21, quarto levantamento. Brasília: Observatório Agrícola, p. 1-57. ISSN: 2318-7921. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>.

Dantas ACM, Fortes GRL, Silva JB, Nezi NA, Rodrigues AC (2001) Tolerância ao alumínio em porta-enxertos somaclonais de macieira cultivados em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36(4):615-623. <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/6176/3241>

Fagan EB, Ono EO, Rodrigues JD, Soares LH, Dourado Neto D (2016) **Fisiologia vegetal: Metabolismo e nutrição mineral**. São Paulo: Editora Andrei, 212p.

Foy CD, Fleming AL (1978) The Physiology of Plant Tolerance to Excess Available Aluminum and Manganese in Acid Soils. In: Jung GA (ed.) **Crop Tolerance to Suboptimal Land Conditions**, 32: 301-328. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub32.c14>.

Furlani PR, Furlani AM (1988) **Composição de pH de solução nutritiva para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 34 p. (Boletim Técnico, 121).

Gimenez DFJ, Dedemo GC, Vantini JS, Silva ACB, Tezza RID, Dabbas KM, Mutton MA, Ferro MIT (2013) Análise dos parâmetros biométricos, acúmulo de prolina e identificação de genes envolvidos na resposta ao déficit hídrico em cana-de-açúcar, por cDNA-AFLP. **Científica**, 41(2): 209-225. <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2013v41n2p209-225>.

Hermann ER, Câmara GMS (1999) Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, 17(5):32-34.

Macêdo CEC, Jan VVS (2008) Effect of aluminum stress on mineral nutrition in rice cultivars differing in aluminum sensitivity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 12(4):363–369. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400005>.

Maia C, Almeida C, Costa P, Melo Júnior JAG, Silveira G, Peernelli LA, Barbosa MHP, Bhering LL (2018) Phenotypic plasticity of sugarcane genotypes under aluminum stress. **Journal of Experimental Agriculture International** 22(3):1-11. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/40984>.

Matsuoka S, Kennedy AJ, Santos EGD, Tomazela AL, Rubio LCS (2014) Energy Cane: Its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany**, article ID 597275. <https://doi.org/10.1155/2014/597275>.

Nunes Junior D (2016) **Cana Energia um novo produto para o setor sucroenergético**. 2016. Disponível em: <http://www.ideaonline.com.br/conteudo/cana-energia-um-novo-produto-para-o-setor-sucroenergetico-por-dib-nunes-jr-142901.html>. Acesso em: 15 jun. 2021.

Paiva LR (2021) Cana Online. Paiva & Baldin Editora: Ribeirão Preto, SP.

Queiroz RJB, Santos DMM, Ferraudo AS, Carlin SD, Silva MA (2011) Biochemical and physiological responses of sugarcane variedades to soil water deficiencies. **Scientia Agrícola**, 68(4): 469-476. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162011000400012>.

Silva JJB (2021) **Análise da variação diurna de carboidratos e metabólitos de cana-energia e cana-de-açúcar**. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Biologia, Campinas, SP.

Sousa FBF, Cazetta JO, Nascimento SS (2018) The different response of sugarcane genotypes in multiple stress. **Ciência e Agrotecnologia**, 42(5):527-539. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018425020718>.

Souza LCF, Freitas ME, Lourente ERP, Serra AP, Rech J, Frota F, Loureiro GES (2016) The effects of crop rotation systems on maize agronomic traits under no-tillage in optimal and dry cropping seasons. **African Journal of Agricultural Research**, 11(27):2369-2377. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11179>.

Tabaldi LA et al. (2009) Oxidative stress is an early symptom triggered by aluminum in Al-sensitive potato plantlets. **Chemosphere**, 76(10):1402–1409. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.06.011>.

Taiz L, Zeiger E (2013) **Fisiologia vegetal** (5ªed.) Porto Alegre: Editora Artmed, 918p.

Tamás L, Huttová J, Mistrík I, Šimonovičová M, Široká M (2006) Aluminium-induced drought and oxidative stress in barley roots. **Journal of Plant Physiology** 163(7):781-784. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.08.012>.

Tistama R, Widyastuti U, Sopandie D, Yokota A, Akashi K, Suharsono (2012) Physiological and biochemical responses to aluminum stress in the root of a biodiesel plant *Jatropha curcas* L. **HAYATI Journal of Biosciences**, 19(1):37-43. <https://doi.org/10.4308/hjb.19.1.37>.

UNICA (União Da Indústria da Cana-de-açúcar) (2020) **Balanço de atividades de 2012/13 a 2018.2019**. Disponível em: <https://www.unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Relatorio-Atividades-201213-a-201819.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2021.

Yan L, Riaz M, Liu J, Liu Y, Zeng Y (2019) Boron alters carboxyl group binding capacity and Al transport pathway to relieve Al toxicity. **BioRxiv**, 12:1-42. <https://doi.org/10.1101/2019.12.12.874412>.

Zhou XX, Yang LT, Qi YP, Guo P, Chen LS (2015) Mechanisms on boron-induced alleviation of aluminum-toxicity in citrus grandis seedlings at a transcriptional level revealed by cDNA-AFLP analysis. **PLOS ONE** 10(3): e0115485. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115485>.

## **CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Após as avaliações do efeito independente e/ou de interação entre os elementos químicos  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$  em genótipo de cana-de-açúcar, constatamos que para algumas variáveis biométricas, o efeito tóxico desses elementos interferiu no desenvolvimento/crescimento das plantas. A interação entre os elementos mostrou um grande potencial tóxico além de seus efeitos independentes. Podemos afirmar que o genótipo (IACSP95-5000) quando submetido ao estresse abiótico ( $Al^{3+}$  x  $Mn^{2+}$ ) é deletério ao desenvolvimento e nutrição de mudas de cana-de-açúcar em estágio inicial de desenvolvimento.

Adicionalmente, no capítulo três da tese, conseguimos responder aos objetivos propostos, e comparamos na prática a eficiência e a tolerância que os genótipos de cana-energia (vertix tipo 9 e vertix tipo 2) e cana-de-açúcar (IACSP95-500) possuem quando submetidos ao mesmo efeito abiótico ( $Al^{3+}$ ). Nossos resultados deixam um viés para futuras pesquisas focadas em avaliações tecnológicas para produção de açúcar, etanol e energia.

## APÊNDICE

## APÊNDICE A

G1\* AI0<sup>a</sup> N0<sup>1</sup>

G2\*\* AI0 N0



G3\*\*\* AI0 N0

G1 AI0 N4<sup>2</sup>

G2 AI0 N4



G3 AI0 N4

G1 AI60<sup>b</sup> N0

G2 AI60 N0



G3 AI60 N0





<sup>\*</sup>G1 (Vertix tipo 2) cana-energia, <sup>\*\*</sup>G2 (Vertix tipo 9) cana-energia, <sup>\*\*\*</sup>G3 (IACSP95-5000) cana-de-açúcar,  
<sup>a</sup>Al0 (ausência de alumínio), <sup>b</sup>Al60 (presença de Alumínio),  
<sup>1</sup>N0 (0 mg L<sup>-1</sup> de Mn<sup>2+</sup>), <sup>2</sup>N4 (800 mg L<sup>-1</sup> de Mn<sup>2+</sup>)

**Figura 1A.** Sistema radicular de cana-energia e cana-de-açúcar submetidas a à ausência ou presença de Al<sup>3+</sup> e níveis de Mn<sup>2+</sup> em sistema hidropônico alternativo adaptado