

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ABSORÇÃO DE MACRONUTRIENTES POR 24 VARIEDADES DE CANA-DE-
AÇÚCAR SOB ELEVADOS NÍVEIS DE ALUMÍNIO E MANGANÊS, ELEVADA ACIDEZ
E BAIXA DISPONIBILIDADE NUTRICIONAL**

GUSTAVO PANDINI TOLLER

Orientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta

JABOTICABAL

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ABSORÇÃO DE MACRONUTRIENTES POR 24 VARIEDADES DE CANA-DE-
AÇÚCAR SOB ELEVADOS NÍVEIS DE ALUMÍNIO E MANGANÊS, ELEVADA ACIDEZ
E BAIXA DISPONIBILIDADE NUTRICIONAL**

GUSTAVO PANDINI TOLLER

Orientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenharia Agrônoma.

JABOTICABAL

2025

T651a

Toller, Gustavo Pandini

Absorção de macronutrientes por 24 variedades de cana-de-açúcar sob elevados níveis de alumínio e manganês, elevada acidez e baixa disponibilidade nutricional / Gustavo Pandini Toller. -- Jaboticabal, 2025
54 p. : tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Jairo Osvaldo Cazetta

1. Pesquisa canavieira. 2. Solos ácidos. 3. Plantas Efeito do alumínio. 4. Plantas Efeito do manganês. I. Título.

GUSTAVO PANDINI TOLLER

**ABSORÇÃO DE MACRONUTRIENTES POR 24 VARIEDADES DE CANA-DE-
AÇÚCAR SOB ELEVADOS NÍVEIS DE ALUMÍNIO E MANGANÊS, ELEVADA
ACIDEZ E BAIXA DISPONIBILIDADE NUTRICIONAL**

Trabalho de Iniciação Científica apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Jáiro Osvaldo Cazetta

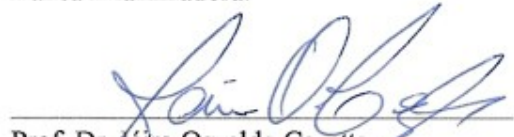
Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Data da defesa: 28/05/2025

(X) Aprovado

() Reprovado

Banca Examinadora:



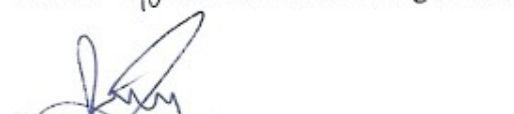
Prof. Dr. Jáiro Osvaldo Cazetta

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Prof. Dr. Fábio Luiz Checchio Mingote

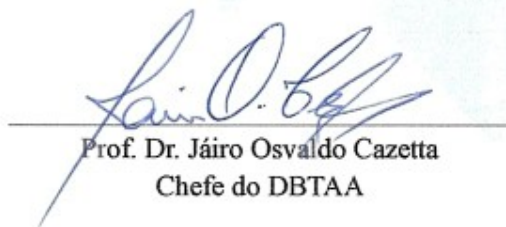
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Eng. Agrº Francisco Sales Ferreira dos Santos Júnior

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 28/05/2025



Prof. Dr. Jáiro Osvaldo Cazetta
Chefe do DBTAA

DEDICATÓRIA

À Deus, fonte suprema de sabedoria e força, e sob a maternal proteção de Nossa Senhora Aparecida e de São Bento, que me guiaram com fé e esperança em cada etapa desta jornada.

Dedico este trabalho, com todo amor, à minha mãe e ao meu pai, exemplos de coragem, generosidade e incansável apoio, que nunca mediram esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus amigos de graduação, pela cumplicidade nas noites de estudo, pelas risadas que aliviaram momentos de tensão e pelos laços que levaremos para a vida toda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida e pela oportunidade de realizar este sonho acadêmico.

Ao glorioso São Bento, por inspirar paz e perseverança nas horas de cansaço.

Ao meu orientador, Prof. Jairo Osvaldo Cazetta, pela orientação firme, paciência e confiança no meu potencial desde o primeiro dia.

Ao CNPq, pelo financiamento que tornou viável a execução deste estudo e pela aposta constante na pesquisa científica brasileira.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/Unesp), pela infraestrutura, pelo ambiente de aprendizado e por todos os profissionais que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho.

À minha mãe e ao meu pai, porque todo mérito também é deles.

Aos meus amigos de graduação, que tornaram o percurso menos árduo, recheado de companheirismo, incentivo mútuo e boas lembranças.

Aos meus amigos César, Giselly, Rômulo e Marcelo: obrigado por permanecerem comigo quando a ansiedade e a depressão pareciam maiores que qualquer meta. Cada mensagem fora de hora, cada conversa que atravessou a madrugada, cada piada que arrancou um sorriso quando eu já não lembrava como soar alegre fez diferença. Vocês carregaram meus medos, dividiram silêncios e, com gestos simples de cuidado, lembraram-me todos os dias de que eu não estava sozinho. Este trabalho existe, em grande parte, porque vocês mantiveram minha esperança de pé.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram com palavras, gestos e apoio, meu sincero muito obrigado.

SUMÁRIO

1 RESUMO.....	V
2 SUMMARY	VI
3 INTRODUÇÃO	8
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	9
4.1 Aspectos gerais e características da cultura	9
4.2 Especificações sobre a toxidez de alumínio e manganês	11
4.3 Tolerância à fitotoxidez.....	14
4.4 Especificações a respeito do mecanismo de tolerância ao Al	15
4.5 Macronutrientes como mitigadores dos efeitos tóxicos de Al e Mn	17
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
5.1 Condições experimentais	18
5.2 Variáveis a serem determinadas	20
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
6.1 Matéria Seca	22
6.2 Macronutrientes.....	24
6.3 Análise Multivariada	32
7 CONCLUSÃO	38
8 REFERÊNCIAS.....	39

2025

ABSORÇÃO DE MACRONUTRIENTES POR 24 VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB ELEVADOS NÍVEIS DE ALUMÍNIO E MANGANÊS, ELEVADA ACIDEZ E BAIXA DISPONIBILIDADE NUTRICIONAL

1 RESUMO

A toxicidade por alumínio e manganês em solos ácidos representa um dos principais desafios para o cultivo da cana-de-açúcar, afetando diretamente o crescimento e a produtividade da cultura. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência relativa de absorção e redistribuição de macronutrientes em 24 genótipos de cana-de-açúcar submetidos ao estresse por esses elementos, identificando os nutrientes mais associados à tolerância. Os resultados indicaram que os genótipos mais tolerantes apresentaram maior eficiência na absorção e redistribuição de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), enquanto nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) tiveram um comportamento distinto, sem uma relação direta com a adaptação ao estresse. A importância de Ca, Mg e S na estabilização da estrutura celular, manutenção da fotossíntese e ativação de mecanismos antioxidantes reforça seu papel como marcadores fisiológicos para a seleção de variedades mais resilientes a solos ácidos. Esses achados podem contribuir para estratégias de manejo nutricional mais eficientes, otimizando a produtividade em ambientes sujeitos à toxicidade por alumínio e manganês.

Palavras-chave: estresse por alumínio, manganês, nutrição mineral, tolerância, cana-de-açúcar.

2025

**MACRONUTRIENT ABSORPTION BY 24 SUGARCANE VARIETIES UNDER
HIGH LEVELS OF ALUMINUM AND MANGANESE, HIGH ACIDITY, AND LOW
NUTRIENT AVAILABILITY**

2 SUMMARY

Aluminum and manganese toxicity in acidic soils is one of the main challenges for sugarcane cultivation, directly affecting crop growth and productivity. This study aimed to evaluate the relative efficiency of macronutrient absorption and redistribution in 24 sugarcane genotypes subjected to stress caused by these elements, identifying the nutrients most associated with tolerance. The results indicated that the most tolerant genotypes showed greater efficiency in the absorption and redistribution of calcium (Ca), magnesium (Mg), and sulfur (S), while nitrogen (N), potassium (K), and phosphorus (P) exhibited a different behavior, without a direct relationship to stress adaptation. The importance of Ca, Mg, and S in stabilizing cell structures, maintaining photosynthesis, and activating antioxidant mechanisms reinforces their role as physiological markers for selecting more resilient varieties in acidic soils. These findings can contribute to more efficient nutrient management strategies, optimizing productivity in environments affected by aluminum and manganese toxicity.

Keywords: aluminum stress, manganese, mineral nutrition, tolerance, sugarcane.

3 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por combustíveis renováveis, como o etanol, e pelo açúcar, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ganha proeminência tanto no mercado interno quanto externo, tornando-se uma cultura estratégica no cenário paulista e nacional (UNICA, 2017). Reconhecida por sua excepcional capacidade de produção de matéria seca, especialmente em condições climáticas brasileiras favoráveis (SILVA et al., 2007), a cana-de-açúcar viu sua expansão nos últimos anos, alcançando regiões do oeste do Estado de São Paulo e áreas de cerrado brasileiro.

Contudo, esse avanço territorial expõe a cultura a desafios ambientais, incluindo solos ácidos, elevados teores tóxicos de alumínio (Al) e manganês (Mn), deficiência de nutrientes, sobretudo nas camadas subsuperficiais, e períodos prolongados de restrição hídrica (CAMARA & CALDARELLI, 2016; SOUSA et al., 2007; CARLIN & SANTOS, 2009). Nesse contexto, é crucial considerar que, nas pesquisas visando à identificação de genótipos tolerantes, os mesmos devem ser avaliados simultaneamente frente à elevada acidez, altos teores de Al e Mn e baixa disponibilidade de nutrientes, dada a associação frequente desses fatores abióticos limitantes nos solos das regiões de expansão da cultura (SOUSA et al., 2007).

Embora os efeitos tóxicos do Al e do Mn em solos ácidos sejam bem documentados, a forma como a eficiência de absorção e redistribuição de macronutrientes modula a tolerância desses metais em cana-de-açúcar ainda permanece pouco esclarecida. Este estudo, portanto, procura suprir essa lacuna ao investigar, em 24 variedades da cultura, a relação entre o acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S e a capacidade das plantas de prosperar sob elevados níveis de Al e Mn, em condições de

alta acidez e baixa disponibilidade mineral. Neste contexto, levantamos as seguintes hipóteses: genótipos de cana-de-açúcar apresentam variações significativas em sua capacidade de absorção de macronutrientes sob condições de estresse de Al e Mn; a tolerância à elevada acidez e aos teores tóxicos de Al e Mn está associada à capacidade de absorção de nutrientes.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a relação entre a eficiência de absorção de macronutrientes e a tolerância ao estresse abiótico causado por elevada acidez, alta concentração de Al e Mn, e baixa disponibilidade de nutrientes minerais em genótipos de cana-de-açúcar. Os objetivos específicos foram: (i) verificar a existência de variações genotípicas quanto à absorção de macronutrientes sob condições adversas; (ii) identificar os nutrientes mais associados à tolerância ao estresse; e (iii) destacar genótipos com desempenho superior ou inferior em termos de acúmulo e eficiência nutricional sob estresse, com base em análises univariadas e multivariadas.

A relevância desta pesquisa reside na contribuição para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes em plantações de cana-de-açúcar em condições desafiadoras, gerando conhecimento aplicável à prática agrícola e promovendo a sustentabilidade do cultivo diante dos desafios ambientais.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Aspectos gerais e características da cultura

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) desempenha um papel de grande relevância econômica e social no Brasil. Destaca-se como uma das opções mais vantajosas para a produção de etanol, açúcar e bioenergia, graças à sua notável capacidade de produção

de matéria seca em condições brasileiras, principalmente nas regiões historicamente dedicadas ao seu cultivo (Silva et al., 2007). Como resultado desse destaque, há uma busca contínua por aprimorar a produtividade, eficiência, lucratividade e sustentabilidade dos processos produtivos relacionados à cana-de-açúcar (Benett et al., 2012), posicionando o Brasil, com 743,2 milhões t de cana-de-açúcar em 2022 — volume que mantém ampla vantagem sobre Índia (438,0 milhões t) e China (107,6 milhões t) (FAO, 2024), cifra corroborada pelo levantamento nacional do IBGE, que indica 740,4 milhões t na safra 2023 (IBGE, 2023).

Contudo, a crescente demanda tem impulsionado a expansão da cultura para áreas com condições climáticas e de solo menos favoráveis (Carlin e Santos, 2009). Essa expansão requer um aprofundamento nas pesquisas envolvendo os genótipos existentes, técnicas de cultivo e o desenvolvimento de novas variedades (). A presença de solos com características desfavoráveis não é uma ocorrência incomum. Estimativas indicam que aproximadamente metade das terras aráveis e potencialmente utilizáveis para a produção de alimentos e biomassa em todo o mundo apresentam acidez, tornando-as suscetíveis à toxicidade de elementos como Al^{3+} e Mn^{2+} (Ma, 2007; Zhang et al., 2007), além de deficiência de nutrientes (Cambri, 2004; Sousa et al., 2007).

Essas características coincidem com as regiões onde tem ocorrido o avanço significativo da agricultura no Brasil, especialmente em direção às vastas áreas de cerrado. Essas regiões apresentam solos com propriedades físicas favoráveis, boa drenagem e um relevo que facilita a mecanização das atividades agrícolas (Oliveira, 2012). No entanto, é crucial observar que aproximadamente 89% desses solos são distróficos, o que significa que possuem propriedades químicas inadequadas, como baixa

capacidade de troca catiônica (CTC), elevada acidez e altos teores trocáveis de Al^{3+} e Mn^{2+} , além de uma deficiência generalizada de nutrientes minerais essenciais para o desenvolvimento das plantas (Korndörfer, 2004; Sousa et al., 2007; Rodrigues, 2013).

Essa expansão agrícola em áreas de cerrado representa um desafio adicional devido às condições adversas desses solos. A baixa CTC compromete a retenção de nutrientes, acentuando a necessidade de estratégias eficientes de manejo para garantir o suprimento adequado de nutrientes às plantas cultivadas. A elevada acidez, associada aos altos teores de Al^{3+} e Mn^{2+} , intensifica os riscos de toxicidade desses elementos, restringindo ainda mais a capacidade das plantas em absorver nutrientes essenciais. (Oliveira, 2012).

Nesse contexto, torna-se imperativo o desenvolvimento de pesquisas e práticas agrícolas inovadoras que visem a superar os desafios impostos por essas condições adversas do solo. Além disso, a busca por variedades de plantas mais adaptadas a esses ambientes torna-se uma estratégia fundamental para promover a sustentabilidade e a eficiência dos sistemas de cultivo nessas áreas específicas, contribuindo assim para a maximização da produção agrícola e o alcance de níveis mais elevados de segurança alimentar e econômica. (Oliveira, 2012).

4.2 Especificações sobre a toxidez do alumínio e manganês

Altas concentrações de Al^{3+} e Mn^{2+} figuram entre os principais fatores que limitam o desenvolvimento das plantas em solos ácidos no Brasil (FOY, 1984; CAMBRI, 2004; CAMARGO; MELLIS; ZONTA, 2008). Diversos estudos relatam efeitos deletérios desses íons sobre a fisiologia vegetal, como inibição do crescimento radicular, distúrbios na absorção de água e nutrientes e danos ao aparato fotossintético (MA, 2007; BRITO, 2014;

MAIA et al., 2018). Quando o pH do solo cai abaixo de 5,5, o Al^{3+} torna-se altamente solúvel, elevando a concentração do íon na solução e conferindo-lhe toxicidade potencial para as plantas (KOCHIAN, 1995).

Embora as plantas encontrem no solo as quantidades necessárias de nutrientes para seu crescimento, a realização plena do potencial de desenvolvimento e produtividade da cultura é comprometida em ambientes com concentrações tóxicas de Al. O íon Al^{3+} exerce impacto negativo no desenvolvimento das plantas, manifestando efeitos deletérios tanto diretamente nos tecidos vivos, especialmente nas raízes, como evidenciado por estudos de Brito (2014) e Maia et al. (2018), quanto de maneira indireta ao dificultar a absorção de água e nutrientes pelas raízes intoxicadas, conforme apontado por Chen et al. (2010) e Silva et al. (2010). Essa condição compromete o crescimento e, por conseguinte, a produtividade da cultura, mesmo quando as quantidades adequadas de nutrientes estão disponíveis no solo.

As pontas das raízes são as regiões mais impactadas pela presença de Al^{3+} , e sua resposta a esse íon ocorre de maneira ágil, indicando que, inicialmente, o Al^{3+} inibe a expansão e a elongação das células radiculares, posteriormente, a divisão celular também passa a ser prejudicada. (Kochian, 1995), (Oliveira, 2012), e (Ecco et al. 2014). Devido à rápida reatividade do Al^{3+} , danos podem ocorrer em diversas partes das células, como na parede celular, membrana plasmática, citoesqueleto e até no núcleo celular. (Hartwig et al. 2007). Nas raízes afetadas, a inibição do crescimento é a característica predominante, resultando em raízes mais curtas e espessas, especialmente nas extremidades, onde a falta de ramificações terminais é notável (Kochian et al., 2015).

Além disso, a presença elevada de Al^{3+} no solo pode induzir deficiência de nutrientes, pois o íon interfere nos processos de solubilização/precipitação na solução do solo, na absorção pelas raízes, no transporte e na utilização desses nutrientes dentro da planta. (Barceló e Poschenrieder, 2002).

Quando se trata do Mn^{2+} , é relevante observar que a maioria das áreas agrícolas no Brasil possui solos provenientes de basalto e outras rochas com elevadas concentrações de Mn^{2+} , tornando crucial que as plantas cultivadas apresentem tolerância a níveis elevados desse elemento, conforme destacado por Camargo em 1995. Esses solos, predominantemente de origem pedogenética, exibem teores disponíveis de Mn^{2+} que podem variar de 3 a 190 mg/dm³ em terras brasileiras, como indicado por Manzini et al. (2010).

O Mn é um micronutriente vital para as plantas, desempenhando um papel essencial na ativação de enzimas envolvidas no processo fotossintético e em outras ações metabólicas, conforme evidenciado por Buchel et al. (1999). No entanto, quando absorvido em quantidades excessivas, o Mn^{2+} torna-se altamente tóxico, conforme observado em estudos como os de Doyle et al. (2003), Prado (2008) e Guirra et al. (2011).

A toxicidade do Mn ocorre em solos ácidos, principalmente devido ao aumento da solubilidade desse elemento em meios com pH em torno de 5,0, especialmente quando o material de origem do solo é rico em manganês e em condições redutoras. (Foy et al. 1978). A concentração crítica de Mn^{2+} nos tecidos vegetais, necessária para desencadear sintomas de toxicidade, varia entre as espécies e até mesmo entre cultivares da mesma espécie (Marschner, 1995).

Os principais sintomas associados à toxicidade de Mn^{2+} englobam alterações nas paredes celulares, necrose do caule e das folhas, redução na capacidade fotossintética da planta, crescimento retardado, encurvamento das folhas, queima nas pontas de folhas e flores, conforme relatado por Foy (1984) e Lindon et al. (2004). Em alguns casos, pode haver a ocorrência de manchas marrons em folhas maduras devido à presença de polifenóis oxidados, além da indução da deficiência de outros micronutrientes, como o ferro, conforme observado por Ponnamperuma em 1985.

4.3 Tolerância à fitotoxidez

Através da aplicação de diversas técnicas de aprimoramento vegetal e manejo do solo, é possível abordar de maneira mais eficaz as questões relacionadas à toxidez causada por elementos como o Al e Mn, conforme indicado por estudos anteriores (Maia et al., 2018). A prática comum da calagem surge como uma solução predominante para mitigar esses problemas na camada superficial do solo. No entanto, essa abordagem proporciona apenas uma resolução parcial, uma vez que o calcário apresenta mobilidade limitada, não alcançando as camadas mais profundas do solo, conforme observado em pesquisas anteriores (Cambri, 2004; Oliveira, 2012).

O uso de gesso agrícola tem sido sugerido como uma alternativa, no entanto, além de não apresentar efeito corretivo, o gesso enfrenta diversas limitações de natureza econômica e técnica, conforme destacado por Costa (2011) e Oliveira (2012). Diante dessas restrições, a exploração de plantas com tolerância ao estresse abiótico, incluindo a toxicidade por elementos indesejados, tem sido considerada uma ferramenta suplementar para impulsionar a produção agrícola em solos ácidos. Essa abordagem

ganha respaldo em estudos como os de Ecco et al. (2014), Brito (2014) e Geronimo (2014), pois plantas adaptadas a essas condições desfavoráveis tendem a prosperar especialmente nas camadas mais profundas do solo.

Características mais produtivas e a capacidade de tolerar solos ácidos, juntamente com a habilidade de desenvolver raízes profundas em ambientes com altos níveis de Al^{3+} , podem estar relacionadas a uma variedade de fatores específicos de cada genótipo, conforme indicado por Ma et al. (2001).

Esses fatores, possivelmente ligados a atributos como o tipo de maturação (precoce, médio e tardio) e as capacidades de brotação, enraizamento e desenvolvimento inicial das plantas, demandam uma investigação mais aprofundada.

A considerável capacidade de brotação, por exemplo, desempenha um papel crucial na produção de plantas vigorosas e adaptáveis ao ambiente de cultivo, especialmente em fases que envolvem condições adversas (Silva et al., 2004), como destacado por Casagrande (1991). Além dos fatores ambientais, fitotécnicos e fitossanitários, conforme evidenciado por Serafim et al. (2012) e Magalhães et al. (2015), o desenvolvimento das gemas nos toletes de plantio também pode depender significativamente das características intrínsecas de cada genótipo.

4.4 Especificações a respeito do mecanismo de tolerância ao Al^{3+}

Diversos estudos têm abordado o mecanismo de tolerância de várias culturas ao Al tóxico encontrado nos solos. No entanto, a compreensão desses mecanismos ainda permanece incompleta e pode variar entre diferentes espécies e variedades, como discutido por Oliveira (2012) e Maia et al. (2018). A cana-de-açúcar, quando comparada

a outras plantas, como milho (*Zea mays*) e arroz (*Oriza sativa*), demonstra uma menor sensibilidade ao Al, conforme observado por Oliveira (2012). No entanto, é importante notar que dentro da própria cana-de-açúcar, existem variações entre espécies. Landel (1989), em sua pesquisa, destaca que a *Saccharum officinarum* é mais tolerante ao Al^{3+} do que a *Saccharum spontaneum*.

O conceito de tolerância ao íon Al^{3+} tem sido historicamente associado à capacidade de preservar a divisão e alongamento celular, assim como a viabilidade dos tecidos meristemáticos, mesmo em condições de estresse que visam a formação de novos tecidos, conforme destacado por Foy et al. (1984). Esse conceito continua sendo amplamente referenciado na literatura, como evidenciado por trabalhos recentes como Ecco et al. (2014) e Maia et al. (2018).

Em termos de mecanismos de resistência ao Al^{3+} tóxico, as plantas essencialmente apresentam duas classes principais. Uma delas atua impedindo a entrada do íon Al^{3+} através das raízes, enquanto a outra permite que a planta o acumule em locais específicos. Esses processos têm sido extensivamente explorados em diversos estudos científicos, abrangendo várias culturas, como milho (Piñeros et al., 2002), cevada (Ma et al., 2004), soja (Silva et al., 2001) e sorgo (Magalhaes, 2002), conforme documentado por pesquisadores como Kochian (1995) e Ma e Furukawa (2003).

Diversos outros mecanismos podem ser mencionados, como a exsudação de compostos fenólicos e o aumento do pH na rizosfera por meio do influxo de íons H^+ (Matsumoto, 2000; Kochian et al., 2015). O último processo fundamenta-se na capacidade da raiz de incorporar íons H^+ e elevar o pH na região ao redor do ápice radicular, visando reduzir a atividade do íon Al^{3+} tóxico na rizosfera, como sugerido por

Hartwig (2007). Entretanto, estudos indicaram que essa estratégia não foi conclusivamente comprovada (Taylor, 1991; Dodge e Hiatt, 1992), evidenciando a necessidade de pesquisas adicionais para uma melhor compreensão desses processos.

Independentemente do mecanismo específico adotado pela planta, a utilização de genótipos tolerantes ao Al^{3+} em novas áreas de plantio emerge como a abordagem mais econômica para contornar os problemas ocasionados pela presença de elementos indesejáveis no solo, conforme destacado por Peixoto et al. (2007) e Ecco (2014). Segundo Peixoto et al. (2007), a toxidez de Al^{3+} pode manifestar-se por diversos sintomas no sistema radicular e na parte aérea. Portanto, a análise de parâmetros morfofisiológicos tem sido uma prática comum nas pesquisas atuais para identificar genótipos tolerantes, como observado em estudos de Oliveira (2012), Ecco et al. (2014), Brito (2014) e Maia et al. (2018).

4.5 Macronutrientes como mitigadores dos efeitos tóxicos de Al e Mn

A absorção eficiente de macronutrientes pode atenuar os efeitos deletérios do alumínio (Al^{3+}) e manganês (Mn^{2+}) em ambientes de elevada acidez e baixa disponibilidade nutricional. Em solos ácidos ($pH < 5,5$), tanto o Al quanto o Mn tornam-se mais solúveis e fitotóxicos, comprometendo o crescimento radicular e a produtividade agrícola (KOCHIAN, 2004; FOY, 1984).

Entre os macronutrientes, destaca-se o Ca, que compete diretamente com o Al^{3+} pelos sítios de ligação na parede celular, preservando a integridade das membranas e inibindo a entrada do metal nas células radiculares (RYAN; KOCHIAN, 2013). O Mg, essencial na constituição da clorofila e ativador de enzimas do ciclo de Calvin, também

exerce papel fundamental, uma vez que sua deficiência amplifica os danos por fotoinibição e afeta a fotossíntese (MARSCHNER, 2012).

O S, por sua vez, contribui com a formação de aminoácidos sulfurados (como cisteína), que servem de base para a síntese de glutathione — um potente agente quelante de metais pesados que reduz a disponibilidade intracelular de Al e Mn (HARTWIG, 2007). Já o K auxilia na regulação osmótica e na homeostase iônica, atenuando distúrbios causados por metais tóxicos e garantindo maior eficiência na absorção de água e nutrientes (CAKMAK, 2005).

No caso do P, embora seja essencial para os processos energéticos da planta, seu excesso em solos ácidos pode precipitar na forma de fosfatos de alumínio (AlPO_4), tornando-se indisponível e ineficaz para o crescimento vegetal (LAMBERS et al., 2015). Por fim, o N é indispensável à síntese de aminoácidos, proteínas e clorofila, mantendo o metabolismo da planta sob estresse abiótico (FAGERIA et al., 2010), embora neste estudo seu acúmulo não tenha diferenciado os genótipos quanto à tolerância.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Condições experimentais:

O experimento realizado previamente para a determinação do teor de macronutrientes foi desenvolvido na Unesp – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, câmpus de Jaboticabal–SP (latitude 21° 15' 22" S, longitude 48° 18' 58" W, altitude de 575 m), onde se encontram condições adequadas para a condução do trabalho. A execução do ensaio seguiu metodologia

semelhante à descrita por Bruno (2018), com adaptações específicas aos objetivos desta pesquisa.

O ensaio foi instalado e conduzido em casa de vegetação, com mudas de 24 genótipos de cana-de-açúcar submetidas a dois tratamentos (com e sem estresse) e quatro repetições, em delineamento experimental inteiramente casualizado. No tratamento controle (sem estresse), as plantas foram cultivadas em solução nutritiva completa (FURLANI & FURLANI, 1998), com pH de $5,5 \pm 0,1$. No tratamento com estresse, utilizou-se solução nutritiva com elevada acidez (pH $4,0 \pm 0,1$), baixa disponibilidade de nutrientes (5% da concentração original da solução completa), e elevadas concentrações de alumínio (60 mg L^{-1}) e manganês (700 mg L^{-1}), ambos fornecidos na forma de cloreto, conforme metodologia proposta por Zonta (2003). A concentração de Al foi estabelecida com base em ensaio preliminar conduzido por Borges (2016), enquanto a de Mn foi definida com base em Nardis (2012).

As mudas foram obtidas a partir de minitoletes com uma gema e aproximadamente 3 cm de comprimento, seguindo a metodologia descrita por Sousa, Cazetta e Nascimento (2018). Os minitoletes foram plantados em recipientes plásticos com capacidade de $1,0 \text{ dm}^3$, preenchidos com areia lavada e peneirada. A origem dos minitoletes foi a parte mediana dos colmos de plantas com três anos de idade, cultivadas sob as mesmas condições edafoclimáticas e de manejo em área experimental da FCAV – Unesp. As mudas brotadas foram mantidas por 28 dias em casa de vegetação, sem restrição hídrica, até atingirem estágio adequado de desenvolvimento.

Após esse período, foram selecionadas quanto à sanidade e uniformidade, sendo então submetidas aos tratamentos, os quais foram conduzidos por 50 dias. Para isso, os

recipientes com as mudas foram alocados em bandejas contendo lâmina de 10 cm da solução nutritiva correspondente a cada tratamento, conforme metodologia proposta por Dantas et al. (2001) e testada para cana-de-açúcar por Borges (2016). O nível da solução era corrigido diariamente pela adição de água destilada, com ajuste simultâneo do pH. A cada três dias, as bandejas eram higienizadas e as soluções substituídas. Nessas ocasiões, todas as bandejas eram reposicionadas aleatoriamente, assim como as mudas em cada bandeja, de modo a manter o delineamento inteiramente casualizado durante todo o período experimental.

5.2 Variáveis a serem determinadas

As amostras da parte aérea foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar regulada para 65 ± 5 °C até atingir peso constante, para a determinação da matéria seca. Na sequência as amostras foram moídas em moinho de aço inoxidável do tipo wiley e submetidas à determinação de N, P, K, Ca, Mg e S, seguindo as indicações de BATAGLIA et al. (1983). Com os dados de matéria seca e teor dos elementos nessas amostras, foram avaliadas as interferências dos tratamentos no teor e/ou acúmulo dos macronutrientes analisados nas plantas.

As amostras foram identificadas, pelo genótipo e pelo tipo de tratamento. A letra C indica o genótipo da cultura, a letra N significa que a planta foi cultivada sem qualquer tipo de restrição, em solução nutritiva completa e o símbolo Al, significa que a cana-de-açúcar se desenvolveu em solução nutritiva com presença de elevada acidez, baixa disponibilidade de nutrientes e altas concentrações de Al e Mn.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey (5%), e foi feita análise de correlação de Pearson, todas essas estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa Agroestat (BARBOSA E MALDONADO JUNIOR, 2014). Letras maiúsculas comparam as médias dentro de cada coluna, ou seja, entre os genótipos para uma mesma condição de cultivo (com ou sem estresse). Letras minúsculas comparam os tratamentos com e sem estresse na linha de cada genótipo, indicando diferenças estatísticas entre as duas condições. As comparações foram realizadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Os valores relativos (%) de matéria seca, teor e acúmulo de nutrientes foram calculados com base na razão entre os resultados obtidos sob condição de estresse e os obtidos na condição controle (sem estresse), multiplicando-se o resultado por 100. A fórmula utilizada foi:

valor relativo (%) = (valor sob estresse dividido pelo valor sob condição controle) multiplicado por 100.

Esse cálculo permite expressar o desempenho de cada genótipo sob estresse em relação à condição ideal de cultivo, facilitando a comparação do comportamento relativo entre os tratamentos.

Para a análise multivariada, os dados relativos ao acúmulo de macronutrientes sob estresse foram padronizados (média zero e variância unitária) e submetidos à Análise de Componentes Principais (ACP), com o objetivo de reduzir a dimensionalidade e identificar padrões de variação entre os genótipos. Também foi construído um gráfico de médias padronizadas para visualizar o desempenho relativo dos genótipos em relação aos diferentes nutrientes avaliados. Além disso, foi realizada uma análise de agrupamento

hierárquico, utilizando o método de ligação de Ward e a distância euclidiana como medida de similaridade, para a construção de um dendrograma que permitisse a identificação de grupos com comportamentos semelhantes. Todas essas análises multivariadas foram realizadas com o auxílio do software Statistica. (STATSOFT, 2011).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Matéria Seca

A manutenção da matéria seca sob condições de estresse por alumínio (Al) e manganês (Mn) é um indicador crucial da tolerância de variedades de cana-de-açúcar a solos ácidos (KOCHIAN et al., 2004; CAMARGO; MELLIS; ZONTA, 2008). Estudos demonstram que a toxicidade por Al e Mn pode reduzir significativamente a produção de biomassa em diferentes genótipos, evidenciando a importância da matéria seca como parâmetro de avaliação da tolerância ao estresse por esses metais.

No presente estudo, observou-se diferença entre os genótipos analisados, com destaque para os genótipos 3 e 21, que apresentaram os extremos de desempenho, melhor e pior respectivamente, conforme observado na tabela 1.

Tabela 1. Valores absolutos (g) e relativos (%) do teor e acúmulo de matéria seca em 24 genótipos de cana de açúcar, em condições de cultivo ideal e em estresse. (alto teor de Al e Mn associado com baixa disponibilidade de nutrientes) Letras maiúsculas comparam as médias dentro de cada coluna, ou seja, entre os genótipos para uma mesma condição de cultivo (com ou sem estresse). Letras minúsculas comparam os tratamentos com e sem estresse na linha de cada genótipo, indicando diferenças estatísticas entre as duas condições. As comparações foram realizadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Matéria Seca			
GENÓTIPO	Matéria Seca Absoluta		Matéria Seca Relativa
	g		%
	Sem Al	Com Al	Com Al
SP91-1049(V1)	ABC 13,3 a	A 11,7 b	ABCD 87,93 b
RB855443(V2)	CDE 11,64 a	A 11,69 a	AB 100,4 a
RB966928(V3)	E 10,9 a	AB 11,04 a	A 101,3 a
RB965902(V4)	DE 11,52 a	B 9,69 b	CDEF 84,09 b
RB965917(V5)	AB 13,79 a	AB 10,64 b	DEF 77,14 b
CTC 9(V6)	CDE 11,81 a	AB 10,17 b	CDE 86,07 b
CTC17(V7)	CDE 11,87 a	B 9,47 b	CDEF 79,76 b
CTC 21(V8)	BCDE 12,09 a	AB 10,18 b	CDEF 84,22 b
SP81-3250(V9)	CDE 11,96 a	AB 10,04 b	CDEF 83,91 b
IAC911099(V10)	ABCDE 12,18 a	AB 10,34 b	CDEF 84,89 b
IACSP95-5094(V11)	AB 13,8 a	AB 10,06 b	EF 72,88 b
IACSP96-3060(V12)	CDE 11,79 a	AB 10,85 a	ABC 92,02 b
CTC 2(V13)	ABCD 12,83 a	AB 10,01 b	CDEF 78,04 b
CTC 20(V14)	BCDE 12,13 a	B 9,835 b	CDEF 81,06 b
CTC 24(V15)	CDE 11,73 a	AB 10,21 b	BCDE 87,02 b
CTC99-1906(V16)	ABCD 13,26 a	AB 10,99 b	CDEF 82,84 b
SP83-2847(V17)	ABCD 12,92 a	AB 10,68 b	CDEF 82,66 b
SP80-3280(V18)	ABCDE 12,18 a	AB 10,6 b	BCDE 87,05 b
IACSP95-5000(V19)	ABC 13,41 a	AB 10,41 b	DEF 77,65 b
CTC 6(V20)	ABCDE 12,35 a	AB 10,8 b	ABCD 87,45 b
CTC 15(V21)	A 13,91 a	AB 9,93 b	F 71,37 b
RB855536(V22)	ABC 13,29 a	AB 10,41 b	CDEF 78,28 b
RB867515(V23)	CDE 12,02 a	AB 10,44 b	BCDE 86,87 b
RB935744V(24)	CDE 11,87 a	AB 10,53 b	ABCD 88,73 b

Neste estudo, os genótipos apresentaram diferentes respostas ao estresse, sendo possível observar uma ampla variação nos valores relativos de matéria seca. O genótipo RB965917 (5), por exemplo, apresentou um acúmulo relativo de 77,14%, indicando uma

redução moderada sob estresse. Por outro lado, o genótipo RB669628 (3) foi o que mais manteve sua biomassa, com um valor relativo de 101,3%, sugerindo possível tolerância ou até mesmo estímulo ao acúmulo de matéria seca em condições adversas. Em contraste, o genótipo CTC 15 (21) teve o menor acúmulo relativo (71,37%), evidenciando maior sensibilidade ao estresse imposto.

As diferenças observadas entre os genótipos reforçam a importância da avaliação da biomassa como indicador de desempenho sob estresse abiótico. A manutenção de maiores níveis de matéria seca em condições adversas pode estar associada a mecanismos fisiológicos e bioquímicos de tolerância ao Al e Mn, como exclusão iônica, compartimentalização ou detoxificação intracelular, características frequentemente observadas em genótipos mais tolerantes. Dessa forma, os dados obtidos contribuem para a identificação de materiais promissores para programas de melhoramento voltados à tolerância ao estresse por acidez e metais tóxicos no solo.

6.2 Macronutrientes

Após identificar que o genótipo 3 apresentou a maior manutenção de matéria seca sob estresse por Al e Mn, enquanto 21 demonstrou a maior redução, foi realizada uma análise comparativa do acúmulo de macronutrientes nesses dois genótipos. O objetivo foi verificar se as diferenças observadas na biomassa se refletiam na absorção e no acúmulo de nutrientes essenciais.

A Tabela 2 apresenta os acúmulos relativos de cada macronutriente para ambos os genótipos, permitindo uma avaliação detalhada de possíveis padrões nutricionais associados à tolerância ou sensibilidade ao estresse. Além disso, as tabelas completas

com os teores e acúmulos de macronutrientes para todos os genótipos encontram-se nos apêndices: Apêndice A - Fósforo, B - Enxofre, C - Cálcio, D - Magnésio, E - Nitrogênio e F - Potássio.

Tabela 2. Comparação entre os genótipos de melhor e pior desempenho (matéria seca), em situação de estresse (alto teor de Al e Mn associado com baixa disponibilidade de nutrientes), através das letras recebidas pelo teste de tukey, para as variáveis: teor e acúmulo relativos de cada macronutriente estudado e matéria seca relativa.

Acúmulo Relativo sob estresse (%)							
	Matéria Seca	P	Ca	N	S	Mg	K
V3	A 101,3 a	ABCD 93,78 a	ABC 62,85 b	A 36,92 b	A 20,21 b	A 51,9 b	AB 77,30 b
V21	F 71,37 b	ABC 114,8 a	DE 28,28 b	A 41,03 b	A 12,38 b	A 31,12 b	F 40,45 b

De maneira geral, observou-se uma redução no teor e acúmulo de fósforo nos genótipos submetidos à condição de estresse, evidenciando o impacto da alta acidez e toxicidade por alumínio e manganês sobre a absorção e translocação desse nutriente. Essa resposta é esperada, visto que o fósforo é um dos elementos mais afetados pela acidez do solo, apresentando baixa disponibilidade em pH muito ácido.

O genótipo RB966928 (V3), que apresentou o melhor desempenho em matéria seca, também se destacou positivamente para fósforo. Embora seu teor absoluto sob estresse tenha diminuído para 0,77 g/kg, o valor foi estatisticamente semelhante ao da testemunha (0,83 g/kg), e o teor relativo foi de 92,86%, indicando boa manutenção da absorção do nutriente. O acúmulo relativo também foi satisfatório, com 93,78%, reforçando sua eficiência na manutenção do fósforo sob condições adversas.

Já o genótipo CTC 15 (V21), apesar de ter apresentado o pior desempenho em matéria seca, acumulou mais fósforo sob estresse (14,1 mg/planta) do que na testemunha (12,3 mg/planta), resultando em um acúmulo relativo de 114,8%. Esse dado, à primeira vista positivo, evidencia, na verdade, um possível desequilíbrio fisiológico: o

fósforo foi absorvido, mas não foi eficientemente utilizado para promover crescimento, caracterizando uma baixa eficiência de uso do nutriente, o que reforça sua sensibilidade ao estresse imposto.

Apesar do acúmulo relativo de fósforo (P) ter sido maior na variedade V21 (114,8%) em comparação à V3 (93,78%), essa diferença pode não refletir uma maior eficiência de absorção ou uso do nutriente. Esse resultado pode estar associado ao chamado efeito de diluição, que ocorre quando há uma menor produção de biomassa, fazendo com que a concentração de nutrientes aparenta ser maior proporcionalmente. Como a V21 apresentou menor acúmulo de matéria seca sob estresse, é possível que a relação P/biomassa tenha se elevado artificialmente, sem, de fato, representar um uso mais eficiente do nutriente.

Além do possível efeito de diluição, o maior acúmulo relativo de fósforo observado em V21 pode estar relacionado a alterações morfofisiológicas causadas pelo estresse, como danos nas raízes, que podem prejudicar a translocação e o uso eficiente desse nutriente. Em situações de estresse por metais como alumínio e manganês, é comum ocorrer acúmulo aparente de determinados nutrientes devido à sua baixa incorporação metabólica ou interrupção nos processos fisiológicos de crescimento (MENGEL; KIRKBY, 2001). Adicionalmente, plantas sob estresse severo podem tentar compensar metabolicamente, acumulando mais fósforo para a produção de ATP, como forma de manter funções essenciais sob condições adversas. Dessa forma, o maior acúmulo relativo de fósforo em V21 não implica necessariamente em maior eficiência de uso, podendo representar um efeito passivo da baixa biomassa acumulada ou um esforço fisiológico de adaptação sem ganhos reais em crescimento.

Esses resultados reforçam que a capacidade de manter níveis adequados de fósforo sob estresse está associada, em muitos casos, à tolerância, mas não é o único fator determinante, sendo necessário também considerar a eficiência de uso para que esse nutriente se converta efetivamente em acúmulo de biomassa.

A tabela com os valores completos de teor e acúmulo de P para todos os genótipos avaliados encontra-se no Apêndice A.

O cálcio é um dos macronutrientes mais associados à tolerância ao estresse abiótico, especialmente em solos com alta acidez e toxidez por alumínio e manganês. Atua na integridade das membranas celulares, na sinalização intracelular e na estabilidade das paredes celulares, sendo essencial para a manutenção da homeostase iônica em ambientes adversos (MARSCHNER, 2012).

Em relação ao cálcio, observa-se uma clara superioridade do genótipo V3 (RB966928) frente ao V21 (CTC 15) sob condições de estresse induzido por alumínio e manganês. O V3 apresentou um acúmulo relativo de 62,85%, enquanto o V21 atingiu apenas 28,28%, evidenciando uma redução significativa na absorção e transporte desse nutriente essencial nas condições adversas impostas. Esse comportamento reforça o papel do cálcio como um dos elementos-chave associados à tolerância ao estresse por metais tóxicos, tanto pela sua atuação na integridade estrutural das membranas celulares quanto na sinalização e estabilidade enzimática em ambientes hostis.

O desempenho de V3, com manutenção mais eficiente do acúmulo de cálcio, indica maior capacidade de ajuste fisiológico para manter a homeostase iônica mesmo sob severas limitações nutricionais e toxidez metálica. Em contraste, o baixo desempenho de V21, com menos da metade do acúmulo relativo apresentado por V3,

pode estar relacionado à desestruturação celular e maior suscetibilidade ao desequilíbrio iônico, o que contribui para sua sensibilidade geral ao estresse. Esses dados estão em consonância com os resultados da análise multivariada, que agrupou cálcio, magnésio e enxofre como variáveis associadas aos genótipos mais tolerantes, o que reforça sua importância conjunta no enfrentamento do estresse abiótico

Além disso, o cálcio atua como um antagonista direto da toxidez por alumínio, especialmente nas células da raiz, onde compete por sítios de ligação na parede celular e na membrana plasmática, reduzindo a entrada do Al^{3+} e seus efeitos danosos sobre o crescimento radicular (Kochian et al., 2004). Esse efeito protetor está associado à capacidade do cálcio em estabilizar a estrutura da parede celular, prevenir a degradação de polissacarídeos e manter o funcionamento adequado do citoesqueleto e do transporte de nutrientes. Assim, a maior retenção de cálcio observada no genótipo V3 pode indicar uma estratégia fisiológica eficiente para mitigar os efeitos tóxicos do alumínio, contribuindo para sua superioridade em biomassa e estabilidade metabólica frente ao V21.

A tabela com os valores completos de teor e acúmulo de cálcio para todos os genótipos avaliados encontra-se no Apêndice C.

O nitrogênio é um dos elementos mais demandados pelas plantas, essencial para a formação de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e clorofila, estando diretamente associado à taxa de crescimento e ao acúmulo de biomassa. Em condições de estresse, a absorção e assimilação de nitrogênio podem ser severamente comprometidas, principalmente quando associadas à presença de alumínio e manganês em excesso, que

afetam a funcionalidade das raízes e a dinâmica dos nutrientes no solo (MARSCHNER, 2012).

No presente estudo, observou-se um desempenho superior do genótipo V3 (RB966928) em comparação ao V21 (CTC 15) quanto à manutenção do acúmulo relativo de nitrogênio sob estresse. O V3 manteve 36,92% do seu acúmulo em relação à condição ideal, enquanto o V21 apresentou um valor apenas levemente superior, de 41,03%. Apesar da diferença entre os valores não ser expressiva em magnitude, ambos os genótipos apresentaram reduções acentuadas na absorção de nitrogênio, evidenciando o impacto negativo do estresse imposto.

Contudo, mesmo com valores próximos, os efeitos fisiológicos podem ser distintos. O V3, apesar do menor acúmulo relativo, apresentou maior matéria seca final, o que pode indicar uma utilização mais eficiente do nitrogênio disponível (maior eficiência de uso do nutriente). Já o V21, embora tenha mantido um pouco mais do acúmulo, converteu menos esse nitrogênio em biomassa, o que reforça a hipótese de que a sensibilidade ao estresse comprometeu não só a absorção, mas também o aproveitamento metabólico do elemento.

Adicionalmente, é importante considerar que a assimilação do nitrogênio absorvido envolve processos dependentes de energia, como a atividade das enzimas redutase e glutamina sintetase, que podem ser inibidas sob estresse por metais tóxicos, reduzindo a eficiência de incorporação do N em compostos orgânicos essenciais (TAIZ et al., 2017). Assim, mesmo que o V21 tenha apresentado leve superioridade em acúmulo relativo de N, é possível que esse nutriente tenha sido menos eficientemente assimilado ou direcionado para rotas metabólicas essenciais ao crescimento. Já o V3, com menor

acúmulo, pode ter priorizado o uso eficiente do nitrogênio na formação de proteínas estruturais e reguladoras, favorecendo a manutenção do desenvolvimento vegetativo, o que reforça sua superioridade em matéria seca.

Esses resultados também refletem o padrão observado na análise multivariada, em que o nitrogênio apresentou comportamento mais próximo dos genótipos sensíveis. Isso sugere que, em condições de estresse por Al e Mn, a simples manutenção do acúmulo de N pode não ser suficiente: a eficiência em convertê-lo em crescimento é um fator determinante na diferenciação entre genótipos tolerantes e sensíveis.

A tabela com os valores completos de teor e acúmulo de nitrogênio para todos os genótipos avaliados encontra-se no Apêndice E.

O enxofre (S) é um macronutriente essencial que desempenha papéis estruturais e funcionais em plantas, sendo fundamental para a síntese de aminoácidos sulfurados (como cisteína e metionina), além de atuar na formação de coenzimas e compostos antioxidantes como a glutathione. Essa atuação antioxidante é especialmente relevante em situações de estresse abiótico, como presença de metais tóxicos e elevada acidez no meio de cultivo (MARSCHNER, 2012).

Neste estudo, observou-se que a variedade V3 apresentou acúmulo relativo de enxofre de 20,21% sob estresse, enquanto a V21 apresentou valor ainda menor, de apenas 12,38%. Apesar de os valores absolutos serem baixos para ambas, a diferença entre as duas variedades evidencia uma superioridade de V3 em manter a absorção e translocação desse nutriente mesmo em condições adversas, o que pode estar relacionado à sua maior tolerância ao estresse, corroborada pelo melhor desempenho em acúmulo de biomassa.

Por outro lado, a baixa capacidade de V21 em acumular enxofre sob estresse pode ter limitado seus mecanismos de defesa antioxidante, afetando o funcionamento metabólico e aumentando sua sensibilidade ao ambiente tóxico. Esse comportamento reforça a inferioridade fisiológica de V21 em relação à tolerância ao estresse induzido no experimento.

A tabela completa com os valores relativos de acúmulo de enxofre e demais macronutrientes pode ser consultada no Apêndice B.

O magnésio (Mg) é um macronutriente vital para o metabolismo vegetal, atuando como componente central da molécula de clorofila e cofator de diversas enzimas. Sua participação em processos como a fotossíntese, a ativação enzimática e o transporte de carboidratos tornam-no essencial especialmente sob condições de estresse nutricional e toxidez por alumínio e manganês (TAIZ et al., 2017).

Neste estudo, a variedade V3 apresentou um acúmulo relativo de magnésio de 51,9%, enquanto a V21 registrou 31,12% sob estresse. Esses dados reforçam o desempenho superior de V3 em ambientes adversos, com maior capacidade de absorver e utilizar o magnésio mesmo diante da baixa disponibilidade nutricional e da acidez elevada da solução nutritiva. Essa eficiência é compatível com sua maior produção de biomassa sob estresse, como observado anteriormente.

Por outro lado, o menor acúmulo de Mg em V21 indica baixa eficiência na absorção ou utilização desse nutriente, o que pode ter contribuído para o desempenho limitado da variedade. Considerando que o Mg influencia diretamente a fotossíntese e o transporte de assimilados, sua deficiência provavelmente comprometeu o crescimento da V21 sob estresse.

A tabela completa com os dados de acúmulo relativo de magnésio encontra-se no Apêndice D.

O potássio (K) é um nutriente essencial ao metabolismo vegetal, especialmente em condições adversas. Ele participa ativamente da regulação osmótica, ativação enzimática, translocação de fotoassimilados e abertura estomática, funções diretamente relacionadas à tolerância ao estresse abiótico (TAIZ et al., 2017).

Neste estudo, a variedade V3 apresentou um acúmulo relativo de K de 77,3%, enquanto a V21 alcançou apenas 40,45%. Esse contraste expressivo entre as duas variedades reforça a maior eficiência fisiológica de V3 na manutenção do potássio em ambientes com elevada acidez e toxidez por alumínio e manganês. A retenção mais robusta de K em V3 pode ter favorecido um melhor controle osmótico e um funcionamento estomático mais eficiente, o que ajuda a explicar seu desempenho superior na manutenção da matéria seca.

Por outro lado, o baixo acúmulo relativo de potássio em V21 indica possível deficiência na absorção ou mobilidade do nutriente sob estresse, o que pode ter comprometido funções fisiológicas vitais para o crescimento. Isso contribui para a performance inferior observada dessa variedade em relação à biomassa.

A tabela com os valores completos de acúmulo relativo de K entre as variedades está disponível no Apêndice F.

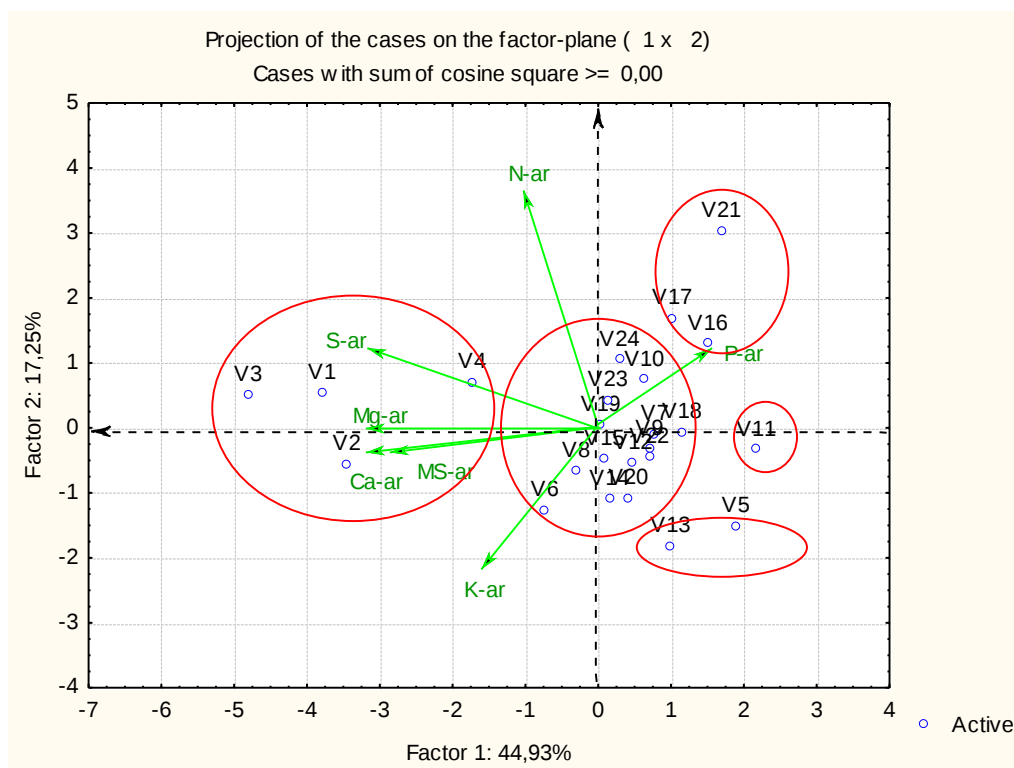
6.3 Análise Multivariada

Para complementar a análise dos dados nutricionais e fornecer um aspecto mais visual à interpretação dos resultados, foram utilizadas técnicas de análise multivariada.

Os gráficos indicam padrões claros de comportamento entre os genótipos e os macronutrientes avaliados.

A Figura 1 apresenta a projeção dos genótipos no plano fatorial com base na análise de componentes principais (ACP), evidenciando padrões claros de associação entre os genótipos e os macronutrientes avaliados. Observa-se que a matéria seca (MS) apresentou comportamento semelhante ao dos macronutrientes cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), formando um agrupamento no espaço amostral. Este padrão sugere que esses nutrientes podem estar diretamente relacionados à maior resiliência do genótipo V3 (RB966928) ao estresse por alumínio e manganês, uma vez que ele apresentou altos acúmulos desses elementos.

Figura 1. Projeção dos genótipos no plano fatorial com base na análise de componentes principais (PCA) do acúmulo relativo de macronutrientes sob estresse por Al e Mn. Os círculos destacam agrupamentos de genótipos com comportamento semelhante, e as setas representam a influência de cada macronutriente na variabilidade observada.



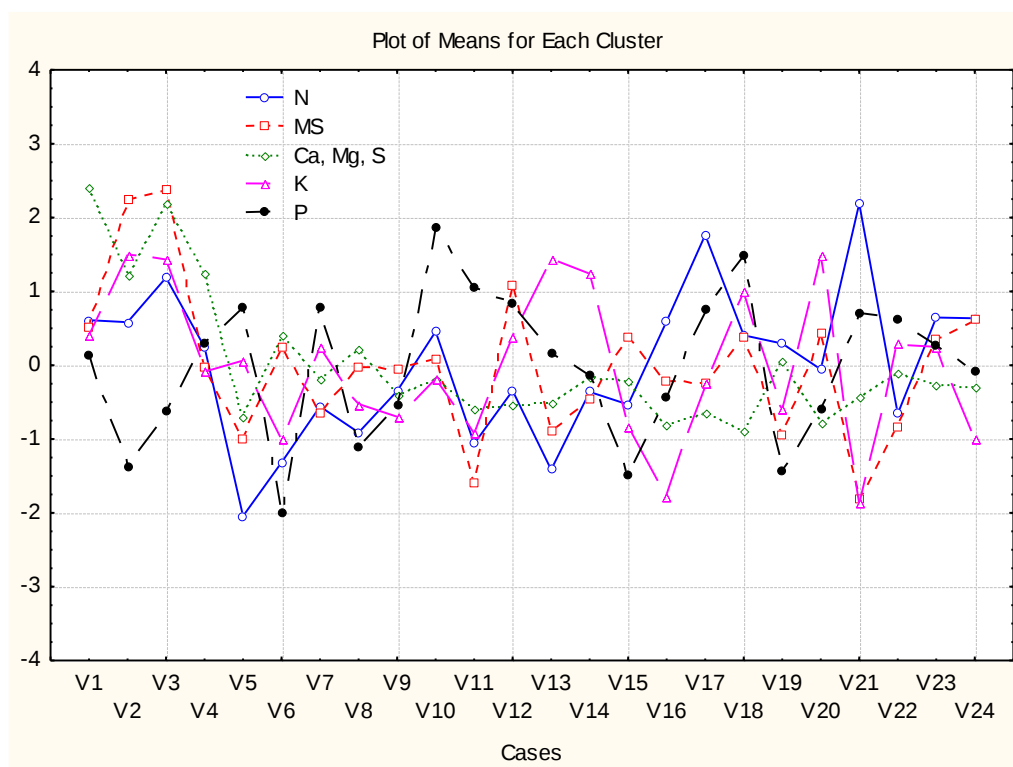
A associação desses três nutrientes com a MS pode ser explicada por suas funções fisiológicas complementares em ambientes de estresse abiótico. O cálcio é fundamental para a integridade da parede celular e da membrana plasmática, contribuindo para a estabilidade estrutural e prevenção de danos causados por íons tóxicos como o alumínio (MARSCHNER, 2012). O magnésio, por sua vez, é essencial para a estrutura da molécula de clorofila e para o funcionamento de várias enzimas do metabolismo energético, além de participar do equilíbrio redox, sendo crítico para a eficiência fotossintética sob estresse (TAIZ et al., 2017). Já o enxofre compõe a estrutura de aminoácidos como cisteína e metionina, além de atuar na síntese de compostos antioxidantes como o glutatona, importantes para mitigar os efeitos do estresse oxidativo (EPSTEIN & BLOOM, 2006).

Dessa forma, o agrupamento observado na ACP não é apenas estatístico, mas reflete uma interação funcional entre nutrientes envolvidos em rotas de defesa e manutenção fisiológica sob estresse. Esses dados reforçam que a eficiência na absorção e no uso de Ca, Mg e S pode ser um indicativo de tolerância ao estresse abiótico, como observado em V3. A adoção de estratégias adaptativas envolvendo esses elementos pode ter permitido ao genótipo manter maior acúmulo de biomassa, mesmo em condições adversas.

Além disso, foi possível identificar que os genótipos 1, 2 e 3 apresentaram um comportamento semelhante, formando um grupo mais coeso. O fósforo, por outro lado, mostrou uma distribuição diferenciada, aparecendo isolado e próximo ao genótipo V21, o qual apresentou o maior acúmulo desse nutriente. Já nitrogênio e potássio se mostraram mais dispersos, sugerindo uma menor variação entre os genótipos estudados.

A análise do gráfico "Plot of Means for Each Cluster" na figura 2 reforça os padrões já identificados na análise multivariada inicial. Observa-se que os comportamentos dos diferentes macronutrientes variam entre os genótipos, com destaque para os seguintes aspectos:

Figura 2. Médias padronizadas do acúmulo relativo de macronutrientes e matéria seca nos genótipos avaliados sob estresse por Al e Mn. O gráfico evidencia a variação entre os genótipos e possíveis padrões de resposta ao estresse, destacando a relação entre os nutrientes e a matéria seca.



Matéria Seca (MS), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S): Esses macronutrientes seguem um padrão semelhante de variação entre os genótipos, o que confirma a hipótese de que eles podem estar relacionados ao desempenho superior de V3 na manutenção de biomassa sob estresse.

Nitrogênio (N) e Potássio (K): Diferente dos demais nutrientes, esses elementos mostram um comportamento mais disperso, sem um padrão claro de associação com os

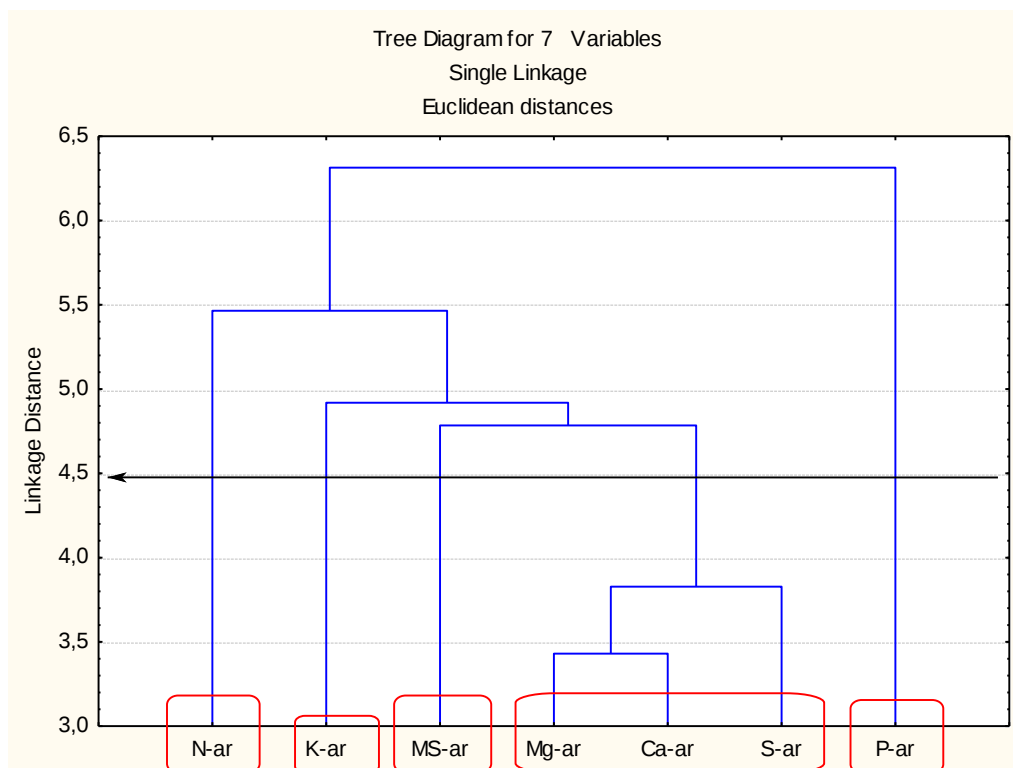
genótipos específicos. Esse resultado está alinhado com a projeção do PCA, onde esses nutrientes aparecem isolados.

Fósforo (P): Seu comportamento se destaca, pois ele apresenta picos em momentos distintos dos outros macronutrientes e está próximo de V21, corroborando o maior acúmulo desse nutriente nesse genótipo.

Com base nessas observações, os dados multivariados complementam os achados individuais dos nutrientes, oferecendo uma visão mais integrada dos padrões nutricionais sob estresse. Os genótipos com maior semelhança no comportamento dos macronutrientes (V1, V2 e V3) reforçam a hipótese de que determinados perfis nutricionais estão associados à maior resiliência à toxicidade de Al e Mn.

O dendrograma da figura 3 reforça os padrões observados na análise de componentes principais (Figura 1) e na distribuição das médias padronizadas dos nutrientes (Figura 2). Os resultados indicam que cálcio (Ca-ar), magnésio (Mg-ar) e enxofre (S-ar) formam um grupo mais próximo, sugerindo uma relação conjunta na manutenção da biomassa sob estresse. Esse achado corrobora a hipótese de que esses nutrientes podem estar associados à maior resiliência do genótipo V3, que manteve maior acúmulo de matéria seca e apresentou altos níveis desses elementos.

Figura 3. Dendrograma baseado na análise de agrupamento hierárquico (Single Linkage, distância Euclidiana) dos macronutrientes e matéria seca, considerando seu acúmulo relativo sob estresse por Al e Mn. As variáveis foram agrupadas conforme sua similaridade, indicando possíveis relações entre os nutrientes no contexto do estresse.



Por outro lado, nitrogênio (N-ar) e potássio (K-ar) formam um agrupamento distinto, distanciando-se das demais variáveis, o que está de acordo com os resultados da análise multivariada (Figura 1), onde esses macronutrientes se mostraram mais dispersos e sem uma relação clara com os genótipos mais tolerantes ao estresse.

O fósforo (P-ar) aparece isolado no dendrograma, o que reflete seu comportamento distinto em relação aos outros macronutrientes. Esse resultado está alinhado à observação de que o genótipo V21, que acumulou mais fósforo, apresentou a maior redução de biomassa, sugerindo que um maior acúmulo desse nutriente não está necessariamente associado à tolerância ao estresse.

De maneira geral, o dendrograma complementa as análises anteriores, destacando a influência conjunta de cálcio, magnésio e enxofre na manutenção da biomassa, enquanto nitrogênio, potássio e fósforo apresentaram padrões distintos de acúmulo sob estresse.

7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo confirmam que há variação genotípica na resposta à acidez elevada, alta concentração de alumínio e manganês, e baixa disponibilidade de nutrientes em cana-de-açúcar. A análise dos acúmulos relativos de macronutrientes evidenciou que a tolerância ao estresse abiótico está diretamente relacionada à manutenção dos níveis de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), que se mostraram mais associados aos genótipos tolerantes.

Genótipos como o V3 (RB966928) demonstraram maior capacidade de absorção e utilização eficiente desses nutrientes sob estresse, destacando-se pela manutenção da matéria seca, enquanto genótipos como o V21 (CTC 15) apresentaram menor eficiência, mesmo com altos acúmulos de certos nutrientes como o fósforo, indicando menor capacidade de aproveitamento metabólico.

Portanto, conclui-se que a eficiência na absorção e uso de Ca, Mg e S pode ser utilizada como critério fisiológico para a seleção de genótipos mais adaptados a solos com alta acidez e toxidez por metais. Esses achados contribuem para o avanço do conhecimento sobre a tolerância ao estresse em cana-de-açúcar e oferecem subsídios para programas de melhoramento genético e manejo nutricional em ambientes adversos.

8 REFERÊNCIAS

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. *AgroEstat – Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos*. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2015. 396 p.

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

BENETT, C. G. S.; BUZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. P.; ANDREOTTI, M. Fontes e doses de manganês no acúmulo de nutrientes na palhada em cana-de-açúcar. *Bioscience Journal*, v. 28, p. 8–16, 2012.

BORGES, A. C. A. *Tolerância de genótipos de cana-de-açúcar ao alumínio em solução nutritiva*. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2016.

BORGES, C. E.; CAZETTA, J. O.; SOUSA, F. B. F.; OLIVEIRA, K. S. Aluminum toxicity reduces the nutritional efficiency of macronutrients and micronutrients in sugarcane seedlings. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 44, e015120, 2020. DOI: 10.1590/1413-7054202044015120.

BOTREL, M. A. et al. Influência do manganês no metabolismo do nitrogênio e da fotossíntese em plantas de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 48, n. 10, p. 1348–1355, 2013.

BRITO, C. M. *Variabilidade genética de cana-de-açúcar na tolerância ao alumínio*. 2015. 32 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

BRITO, F. A.; SILVA, R. B.; SOUZA, C. F. Aluminum toxicity effects on sugarcane root growth. *Australian Journal of Crop Science*, Lismore, v. 8, n. 4, p. 585–593, 2014.

BRUNO, R. L. *Resposta de genótipos de cana-de-açúcar cultivados sob estresse nutricional e metálico*. 2018. 103 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2018.

BUCHEL, C.; BARBER, J.; ANANYEV, G.; ESHAGHI, S.; WATT, R.; DISMUKE, C. Photoassembly of the manganese cluster and oxygen evolution from monomeric and

dimeric CP47-reaction center photosystem II complexes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 96, p. 14288–14293, 1999.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 168, p. 521–530, 2005. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485>

CAKMAK, I.; KIRKBY, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum*, v. 98, p. 594–604, 1996.

CAMARA, G. M. S.; CALDARELLI, C. E. Problemas nutricionais da cana-de-açúcar em áreas de expansão no Brasil. *Informações Agronômicas*, n. 155, p. 1–10, 2016.

CAMARGO, C. E. de O.; OLIVEIRA, J. A. G. de. Efeito da toxidez de alumínio sobre o teor de nutrientes em plântulas de trigo. *Bragantia*, v. 60, n. 2, p. 197–202, 2001.

CAMBRI, M. A. Nutrição mineral de plantas sob estresse de alumínio. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2004.

CAMBRI, M. A. Variação da resistência à toxidez de alumínio e de manganês entre genótipos de *Eucalyptus grandis*. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

CARLIN, S. D.; DANTAS, A. C. V. L.; FURLANI, P. R. Avaliação de cultivares de cana-de-açúcar submetidas a diferentes níveis de acidez em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 983–991, 2012.

CARLIN, S. D.; SANTOS, D. M. M. Níveis de cálcio e alumínio trocáveis no solo e a resposta da cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 297–306, 2009.

CASAGRANDE, J. C. Produção vegetal em ambientes adversos. *Tópicos em Ciência do Solo*, v. 1, p. 153–172, 1991.

CHEN, Z. C. et al. Proteomic analysis of aluminum-responsive proteins in rice roots. *Plant and Soil*, v. 334, p. 373–385, 2010. DOI: 10.1007/s11104-010-0393-5.

COSTA, A. S. V. da. Efeito do gesso agrícola na fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1597–1605, 2011.

DANTAS, A. C. V. L. et al. Desenvolvimento de um sistema hidropônico para estudos de tolerância ao alumínio em cana-de-açúcar. *Stab – Açúcar, Alcool e Subprodutos*, v. 19, n. 5, p. 36–41, 2001.

DODGE, J. D.; HIATT, A. J. Alterations in protein synthesis during aluminum toxicity. *Plant Physiology*, Rockville, v. 98, n. 3, p. 1113–1121, 1992.

DONG, S. et al. Aluminum-induced alterations in sugar metabolism in the roots of Al-tolerant and Al-sensitive sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, v. 71, p. 347–355, 2011.

DOYLE, J. J. et al. Manganese toxicity: effects on root and shoot development in soybean seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, v. 26, n. 1, p. 203–218, 2003.

ECCO, D. et al. The different response of sugarcane genotypes in multiple stress: high Al^{3+} and Mn^{2+} with low nutrient availability. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 42, n. 5, p. 527-539, 2018. DOI:10.1590/1413-70542018425020718

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

FAGERIA, N. K. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, v. 24, n. 8, p. 1269–1290, 2001.

FAO. Brazil has long held the title of the world's largest producer of sugarcane, generating 724 million tons of stalks in 2022. In: Sugarcane agricultural profiles – RenovaBio, 2024. Disponível em: PDF. Acesso em: 05 março. 2025.

FOY, C. D. Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soil. In: ADAMS, F. (Ed.). *Soil acidity and liming*. 2. ed., Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America, 1984. p. 57–97.

FOY, C. D.; SCOTT, B. J.; FISHER, J. A. Genetic differences in plant tolerance to manganese toxicity. *Proceedings of the Soil and Crop Science Society of Florida*, v. 37, p. 119–129, 1978.

FURLANI, P. R.; FURLANI, A. M. C. *Nutrição mineral de plantas*. In: KERBAUY, G. B. (Org.). *Fisiologia vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1998. cap. 2, p. 45–68.

FURUKAWA, J. et al. Genetic improvement of rice tolerance to soil acidity. *Japan Agricultural Research Quarterly*, v. 37, n. 3, p. 191–198, 2003.

GERONIMO, I. G. Crescimento e acúmulo de nutrientes em milho cultivado em Latossolo tratado com gesso e calcário. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2014.

HARTWIG, E. E. et al. Efeitos da toxicidade do alumínio sobre o crescimento radicular e estrutura celular das plantas. *Revista Agronômica*, 2007

IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – setembro 2023: estimativa da produção de cana-de-açúcar de 700,4 milhões de toneladas. Agência IBGE de Notícias, dezembro 2023. Disponível em PDF. Acesso em: 10 março. 2025.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 46, p. 237–260, 1995. DOI: 10.1146/annurev.pp.46.060195.001321

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, v. 55, p. 459–493, 2004.

KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; HOEKENGA, O. A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant and Soil*, v. 362, p. 1–18, 2013.

KOCHIAN, Leon V.; PIÑEROS, Miguel A.; LIU, Jiping; MAGALHÃES, Jurandir V. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. *Annual Review of Plant Biology*, v. 66, p. 23.1–23.28, 2015. doi:10.1146/annurev-arplant-043014-114822.

KORNDÖRFER, G. H. *Nutrição mineral de plantas*. 1. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

LAMBERS, H. et al. Plant mineral nutrition in ancient landscapes: high plant species diversity on infertile soils is linked to functional diversity for nutritional strategies. *Plant and Soil*, v. 395, p. 1–19, 2015.

LANDEL, J. L. de A. *Melhoramento genético da cana-de-açúcar*. Instituto Agrônomo de Campinas, 1989. 43 p. (Boletim Técnico, 114).

LINDON, J. C. et al. Manganese toxicity responses of rice genotype differing in stress tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, v. 27, n. 4, p. 633–650, 2004. DOI: 10.1081/PLN-120030673

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

MAGALHAES, J. V. Genética da tolerância ao alumínio em milho. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 14, n. 1, p. 41–52, 2002.

MAIA, L. C. da et al. Desenvolvimento inicial de genótipos de sorgo submetidos ao estresse por alumínio. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 8, n. 1, p. 97–106, 2018. DOI: 10.21206/rbas.v8i1.465

MANZINI, D. R. et al. Solos com altos teores de manganês disponíveis: gênese, mineralogia e distribuição espacial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 339–348, 2010.

MARSCHNER, P. (Ed.). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.

MARTINS, M. Q. et al. Influência do alumínio sobre o crescimento e o metabolismo de mudas de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, p. 1161–1170, 2011.

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. *International Review of Cytology*, v. 200, p. 1–46, 2000.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. *Principles of plant nutrition*. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849 p.

NARDIS, B. O. Efeito da concentração de manganês no crescimento inicial e na absorção de nutrientes por genótipos de cana-de-açúcar. 2012. 106 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, FCAV/UNESP, Jaboticabal, 2012.

NASCIMENTO, M. F. et al. Avaliação da tolerância de genótipos de cana-de-açúcar ao estresse por alumínio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1224–1233, 2013.

OLIVEIRA, D. P. de. Geografia agrícola do Brasil. 2. ed. São Paulo: Editora Contexto, 2012

OLIVEIRA, J. A. Adubação e nutrição mineral de plantas. Viçosa: UFV, 2012.

OLIVEIRA, M. L. de; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O. Absorção de enxofre por mudas de cana-de-açúcar cultivadas com diferentes fontes do nutriente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1367–1375, 2011.

OLIVEIRA, R. A. de et al. Influência do pH e da presença de alumínio em solução nutritiva no acúmulo de nutrientes em cultivares de arroz. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1036–1045, 2013.

OLIVEIRA, R. A. de. *Interação alumínio e manganês em arroz: efeitos na nutrição mineral e crescimento de plantas*. 2010. 137 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, FCAV/UNESP, Jaboticabal, 2010.

OLIVEIRA, R. A. et al. Seleção de genótipos de cana-de-açúcar com base em análises multivariadas. *Revista Ciência Agronômica*, v. 48, n. 1, p. 12–20, 2017.

PEIXOTO, C. P. et al. Sintomas visuais de toxidez por alumínio em mudas de cafeeiro cultivadas em solução nutritiva. *Bragantia*, v. 66, n. 1, p. 131–137, 2007.

PIÑEROS, M. A. et al. Aluminum tolerance in maize associated with enhanced expression of a citrate transporter gene in the root apex. *Plant Physiology*, v. 129, p. 1194–1206, 2002.

PRADO, R. M. *Nutrição de plantas*. São Paulo: UNESP, 2008. 407 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Interações entre fósforo, cálcio e alumínio trocáveis em solos ácidos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 8, n. 1, p. 1–6, 1984.

RODRIGUES, M. N. et al. Crescimento de espécies florestais sob diferentes níveis de acidez e toxicidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1251–1260, 2010.

SERAFIM, M. E. et al. Desenvolvimento da gema e emergência da cana-de-açúcar em função da posição do tolete e da profundidade de plantio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 5, p. 499–505, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000500009

SILVA, A. A. da et al. Efeitos do alumínio em raízes de plantas. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 13, n. especial, p. 67–82, 2001.

SILVA, F. C. da (org.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, G. R. da et al. Acúmulo de nutrientes e produtividade de cultivares de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 10, p. 1042–1049, 2011.

SILVA, I. R. et al. Aluminum toxicity and nitrogen metabolism in maize plants. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 5, p. 1611–1620, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000500017.

SILVA, J. R. Estresse abiótico em plantas. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 9, n. 1, p. 23–36, 2015. DOI: 10.7127/rbai.v9n100291.

SILVA, M. A. et al. Efeito do alumínio e fósforo no crescimento inicial de cultivares de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 297–304, 2004.

SILVA, P. A. et al. Crescimento inicial de cultivares de cana-de-açúcar em função de doses de alumínio em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 266–273, 2009.

SILVA, S. D. A. da et al. Tolerância de cultivares de cana-de-açúcar a estresse hídrico e toxidez por alumínio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 6, p. 604–610, 2007.

SILVA, S. et al. Manganese toxicity in plants: the role of oxidative stress. *Journal of Plant Nutrition*, v. 31, n. 1, p. 92–106, 2008.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. de. Correção e adubação do solo no sistema plantio direto. In: COSTA, J. L. da et al. (org.). *Sistema Plantio Direto: fundamentos e aplicações*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. p. 189–243.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. de. Correção e adubação do solo no sistema plantio direto. In: COSTA, J. L. da et al. (org.). Sistema Plantio Direto: fundamentos e aplicações. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. p. 189–243.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUSA, R. O.; CAZETTA, D. A.; NASCIMENTO, C. A. C. Estresse abiótico e fisiologia vegetal: uma abordagem sobre o alumínio. *Revista Agrogeoambiental*, v. 11, n. 4, p. 91–104, 2019.

SOUZA, R. B. de et al. Crescimento e acúmulo de nutrientes em mudas de cana-de-açúcar sob doses crescentes de fósforo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 2, p. 145–152, 2011.

STATSOFT, INC. *Statistica (data analysis software system)*. Versão 10. Tulsa, OK: StatSoft, 2011. Disponível em: <http://www.statsoft.com>. Acesso em: 20 mar. 2024.

TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TAYLOR, G. J. Current views of the aluminum stress response: the physiological basis of tolerance. *Current Topics in Plant Biochemistry and Physiology*, Columbia, v. 10, p. 57–93, 1991.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Cana-de-açúcar: importância para o Brasil. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.unica.com.br/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

VALE, F. et al. Efeitos da deficiência de cálcio em genótipos de cana-de-açúcar cultivados em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, p. 1227–1236, 2011.

VASCONCELOS, M. J. S. et al. Seleção de clones de cana-de-açúcar tolerantes à toxidez de alumínio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 1, p. 7–13, 2011.

ZHANG, X. et al. Alleviation of aluminum toxicity by sulfur supply in barley. *Plant and Soil*, v. 284, p. 305–313, 2006.

ZONTA, E. Avaliação da toxidez de alumínio e manganês em mudas de eucalipto cultivadas em diferentes doses de calcário e gesso. 2008. 81 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ZONTA, E. et al. Efeito da toxidez de alumínio em cultivares de cana-de-açúcar cultivadas em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 2, p. 377–384, 2001.

ZONTA, E. et al. Tolerância de cultivares de cana-de-açúcar ao estresse ácido associado à toxidez de Al e Mn em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 4, p. 587–594, 2003.

**APÊNDICE A - VALORES ABSOLUTOS (G/KG MATÉRIA SECA) E RELATIVOS (%) DO TEOR E ACÚMULO DE
FÓSFORO EM 24 GENÓTIPOS DE CANA DE AÇÚCAR, EM CONDIÇÕES DE CULTIVO IDEAL E EM ESTRESSE
(ALTO TEOR DE AL E MN ASSOCIADO COM BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES).**

Genótipo	Teor Absoluto		Teor Relativo	Acúmulo Absoluto		Acúmulo Relativo
	g/kg mat sec		%	mg/planta		%
	Sem Al	Com Al	Com Al	Sem Al	Com Al	Com Al
SP91-1049(1)	A 0,84 a	ABCDE 1,02 a	BCDEFGH 120,71 a	ABC 11,25 a	ABC 11,92 a	ABCD 105,89 a
RB855443(2)	A 0,88 a	EFG 0,72 a	H 81,77 a	ABC 10,34 a	CDEF 8,44 a	BCD 81,74 a
RB966928(3)	A 0,83 a	DEFG 0,77 a	FGH 92,86 a	ABC 9,05 a	CDEF 8,49 a	ABCD 93,78 a
RB965902(4)	A 0,83 b	ABCDE 1,06 a	ABCDEF 128,22 a	ABC 9,55 a	BCDEF 10,35 a	ABCD 108,39 a
RB965917(5)	A 0,91 b	A 1,37 a	ABCD 151,22 a	AB 12,55 a	A 14,56 a	ABC 115,98 a
CTC 9(6)	A 0,75 a	G 0,62 a	GH 82,48 a	ABC 8,84 a	F 6,32 b	D 71,52 b
CTC17(7)	A 0,74 b	ABCD 1,08 a	ABCDE 145,9 a	ABC 8,81 a	BCDEF 10,25 a	ABC 116,25 a
CTC 21(8)	A 0,71 a	EFG 0,73 a	EFGH 102,04 a	BC 8,63 a	DEF 7,41 a	BCD 85,77 a
SP81-3250(9)	A 0,77 a	CDEFG 0,86 a	DEFGH 112,03 a	ABC 9,14 a	CDEF 8,68 a	ABCD 95,04 a
IAC911099(10)	A 0,68 b	ABCDE 1,06 a	ABC 156,74 a	C 8,31 b	ABCD 11,07 a	A 133,09 a
IACSP95-5094(11)	A 0,8 b	AB 1,32 a	A 165,22 a	ABC 11,03 b	AB 13,26 a	AB 120,21 a
IACSP96-3060(12)	A 0,77 b	BCDEF 0,99 a	ABCDEF 128,38 a	ABC 9,17 a	ABCDE 10,72 a	ABC 116,89 a
CTC 2(13)	A 0,85 b	ABC 1,15 a	ABCDEF 135,96 a	ABC 10,82 a	ABC 11,48 a	ABCD 106,11 a
CTC 20(14)	A 0,86 b	ABCD 1,09 a	ABCDEFG 126,35 a	ABC 10,51 a	ABCDE 10,65 a	ABCD 101,3 a
CTC 24(15)	A 0,73 a	FG 0,66 a	FGH 92,17 a	BC 8,52 a	EF 6,8 a	CD 79,84 a
CTC99-1906(16)	A 0,76 a	CDEFG 0,89 a	BCDEFGH 117,2 a	ABC 10,12 a	BCDEF 9,78 a	ABCD 96,56 a
SP83-2847(17)	A 0,72 b	BCDEF 1,01 a	ABCDE 139,67 a	ABC 9,41 a	ABCD 10,88 a	ABC 115,58 a
SP80-3280(18)	A 0,78 b	ABC 1,13 a	ABCDE 145,52 a	ABC 9,55 b	ABC 12,15 a	A 127,15 a
IACSP95-5000(19)	A 0,94 a	BCDEF 0,98 a	EFGH 104,44 a	A 12,73 a	BCDEF 10,27 b	BCD 80,64 a
CTC 6(20)	A 0,91 a	BCDEF 0,98 a	DEFGH 108,09 a	ABC 11,29 a	ABCDE 10,6 a	ABCD 93,88 a
CTC 15(21)	A 0,73 b	ABC 1,17 a	AB 160,33 a	ABC 10,24 a	ABC 11,75 a	ABC 114,8 a
RB855536(22)	A 0,88 b	AB 1,27 a	ABCDE 144,47 a	ABC 11,76 a	AB 13,35 a	ABC 113,47 a
RB867515(23)	A 0,71 a	CDEFG 0,89 a	ABCDEFGH 124,39 a	BC 8,62 a	BCDEF 9,3 a	ABCD 107,84 a
RB935744(24)	A 0,80 a	CDEFG 0,91 a	CDEFGH 114,07 a	ABC 9,42 a	BCDEF 9,65 a	ABCD 102,45 a

APÊNDICE B - VALORES ABSOLUTOS (G/KG MATÉRIA SECA) E RELATIVOS (%) DO TEOR E ACÚMULO DE ENXOFRE EM 24 GENÓTIPOS DE CANA DE AÇÚCAR, EM CONDIÇÕES DE CULTIVO IDEAL E EM ESTRESSE (ALTO TEOR DE AL E MN ASSOCIADO COM BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES).

GENÓTIPO	Teor Absoluto		Teor Relativo	Acúmulo Absoluto		Acúmulo Relativo
	g/kg mat sec		%	mg/planta		%
	Sem Al	Com Al	Com Al	Sem Al	Com Al	Com Al
SP91-1049(1)	EFGH 3,43 a	A 0,7 b	A 20,27 b	BCDE 45,7 a	A 8,16 b	A 17,84 b
RB855443(2)	ABCDE 4,13 a	A 0,65 b	A 15,8 b	ABCD 48,2 a	A 7,62 b	A 15,81 b
RB966928(3)	ABCDE 4,11 a	A 0,81 b	A 19,94 b	CDE 44,83 a	A 9,06 b	A 20,21 b
RB965902(4)	CDEFG 3,67 a	A 0,73 b	A 19,93 b	DEF 42,21 a	A 7,09 b	A 16,8 b
RB965917(5)	CDEFG 3,73 a	A 0,45 b	A 12,24 b	ABC 51,47 a	A 4,87 b	A 9,46 b
CTC 9(6)	ABCDE 4,12 a	A 0,5 b	A 12,12 b	ABCD 48,32 a	A 5,08 b	A 10,51 b
CTC17(7)	GH 3,03 a	A 0,54 b	A 17,92 b	FG 36,01 a	A 5,14 b	A 14,28 b
CTC 21(8)	H 2,7 a	A 0,41 b	A 15,4 b	G 32,74 a	A 4,26 b	A 13,01 b
SP81-3250(9)	A 4,68 a	A 0,48 b	A 10,32 b	A 54,94 a	A 4,85 b	A 8,84 b
IAC911099(10)	FGH 3,22 a	A 0,37 b	A 11,5 b	EFG 39,21 a	A 3,82 b	A 9,76 b
IACSP95-5094(11)	FGH 3,23 a	A 0,35 b	A 10,9 b	CDEF 44,49 a	A 3,53 b	A 7,95 b
IACSP96-3060(12)	DEFGH 3,5 a	A 0,33 b	A 9,57 b	DEF 41,31 a	A 3,62 b	A 8,77 b
CTC 2(13)	DEFGH 3,48 a	A 0,44 b	A 12,7 b	CDEF 44,41 a	A 4,42 b	A 9,96 b
CTC 20(14)	DEFGH 3,45 a	A 0,41 b	A 12,02 b	DEF 41,87 a	A 4,07 b	A 9,72 b
CTC 24(15)	DEFGH 3,46 a	A 0,46 b	A 13,23 b	DEFG 40,65 a	A 4,67 b	A 11,48 b
CTC99-1906(16)	DEFG 3,63 a	A 0,5 b	A 13,94 b	ABCD 48,03 a	A 5,57 b	A 11,6 b
SP83-2847(17)	DEFGH 3,47 a	A 0,43 b	A 12,42 b	CDE 44,61 a	A 4,62 b	A 10,35 b
SP80-3280(18)	ABCD 4,31 a	A 0,36 b	A 8,39 b	ABC 52,56 a	A 3,84 b	A 7,31 b
IACSP95-5000(19)	BCDEFG 3,81 a	A 0,45 b	A 11,83 b	ABC 51,07 a	A 4,69 b	A 9,2 b
CTC 6(20)	ABCDE 4,27 a	A 0,42 b	A 9,86 b	ABC 52,76 a	A 4,58 b	A 8,68 b
CTC 15(21)	DEFGH 3,51 a	A 0,61 b	A 17,37 b	ABCD 48,6 a	A 6,02 b	A 12,38 b
RB855536(22)	ABCDEF 3,91 a	A 0,57 b	A 14,64 b	ABC 52,01 a	A 5,97 b	A 11,48 b
RB867515(23)	ABC 4,52 a	A 0,58 b	A 14,52 b	A 54,29 a	A 6,07 b	A 11,19 b
RB935744(24)	AB 4,6 a	A 0,64 b	A 14,09 b	AB 54,11 a	A 6,8 b	A 12,57 b

**APÊNDICE C - VALORES ABSOLUTOS (G/KG MATÉRIA SECA) E RELATIVOS (%) DO TEOR E ACÚMULO DE
CÁLCIO EM 24 GENÓTIPOS DE CANA DE AÇÚCAR, EM CONDIÇÕES DE CULTIVO IDEAL E EM ESTRESSE
(ALTO TEOR DE AL E MN ASSOCIADO COM BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES).**

GENÓTIPO	Teor Absoluto		Teor Relativo	Acúmulo Absoluto		Acúmulo Relativo
	g/kg mat sec		%	mg/planta		%
	Sem Al	Com Al	Com Al	Sem Al	Com Al	Com Al
SP91-1049(1)	DEFG 3,73 a	A 3,76 a	A 100,78 a	FGHI 49,75 a	A 43,72 a	A 87,88 a
RB855443(2)	DEF 4,38 a	ABC 2,78 b	B 63,54 b	FGH 51,16 a	AB 32,61 b	AB 63,73 b
RB966928(3)	DEF 4,39 a	ABC 2,73 b	B 62,38 b	FGHI 47,8 a	ABC 30,04 b	ABC 62,85 b
RB965902(4)	BCDE 4,93 a	ABC 2,69 b	BCD 54,49 b	FGH 56,89 a	BCDE 26,04 b	BCDE 45,77 b
RB965917(5)	DEF 4,26 a	BCD 1,56 b	BCDE 36,77 b	EFG 58,91 a	CDE 16,69 b	DE 28,33 b
CTC 9(6)	DEFG 3,9 a	BCD 2,14 b	BCD 54,85 b	GHI 45,96 a	BCDE 21,82 b	BCD 47,46 b
CTC17(7)	FG 2,96 a	CD 1,37 b	BCDE 46,25 b	IJ 35,19 a	E 12,98 b	BCDE 36,9 b
CTC 21(8)	EFG 3,64 a	BCD 1,67 b	BCDE 45,84 b	GHIJ 43,9 a	CDE 16,99 b	BCDE 38,71 b
SP81-3250(9)	BCD 5,01 a	BCD 2,26 b	BCDE 45,29 b	EFG 59,34 a	BCDE 22,74 b	BCDE 38,33 b
IAC911099(10)	DEF 4,36 a	BCD 2,14 b	BCDE 49,02 b	FGH 53,12 a	BCDE 22,17 b	BCDE 41,73 b
IACSP95-5094(11)	DE 4,54 a	ABCD 2,39 b	BCDE 52,7 b	DEF 62,75 a	BCDE 24,02 b	BCDE 38,28 b
IACSP96-3060(12)	CDE 4,78 a	BCD 1,75 b	BCDE 36,51 b	FGH 56,6 a	BCDE 18,82 b	DE 33,26 b
CTC 2(13)	DE 4,41 a	BCD 1,95 b	BCDE 44,19 b	FGH 56,66 a	BCDE 19,42 b	DE 34,28 b
CTC 20(14)	G 2,52 a	BCD 1,47 b	BC 58,52 b	J 30,43 a	DE 14,37 b	BCD 47,22 b
CTC 24(15)	EFG 3,66 a	BCD 1,72 b	BCDE 35,1 b	HIJ 43,15 a	BCDE 17,45 b	BCDE 40,44 b
CTC99-1906(16)	A 6,89 a	BCD 1,54 b	E 22,43 b	A 90,88 a	CDE 16,94 b	E 18,64 b
SP83-2847(17)	ABC 6,03 a	BCD 1,82 b	CDE 30,22 b	ABCD 77,16 a	BCDE 19,43 b	DE 25,18 b
SP80-3280(18)	ABC 6,02 a	BCD 1,72 b	CDE 28,55 b	BCDE 73,36 a	BCDE 18,36 b	DE 25,02 b
IACSP95-5000(19)	CDE 4,65 a	BCD 2,09 b	BCDE 45,02 b	DEF 62,55 a	BCDE 21,73 b	CDE 34,74 b
CTC 6(20)	BCD 5,11 a	D 1,24 b	DE 24,39 b	DEF 63,21 a	E 13,35 b	DE 21,12 b
CTC 15(21)	AB 6,35 a	ABCD 2,51 b	BCDE 39,61 b	AB 87,92 a	BCDE 24,86 b	DE 28,28 b
RB855536(22)	ABC 6,03 a	AB 2,87 b	BCDE 47,53 b	ABC 80,21 a	ABCD 29,81 b	BCDE 37,17 b
RB867515(23)	ABC 6,03 a	BCD 2,27 b	BCDE 37,64 b	CDE 72,44 a	BCDE 23,74 b	DE 32,78 b
RB935744(24)	A 6,79 a	BCD 2 b	CDE 29,38 b	ABC 79,44 a	BCDE 20,97 b	DE 26,41 b

**APÊNDICE D - VALORES ABSOLUTOS (G/KG MATÉRIA SECA) E RELATIVOS (%) DO TEOR E ACÚMULO DE
MAGNÉSIO EM 24 GENÓTIPOS DE CANA DE AÇÚCAR, EM CONDIÇÕES DE CULTIVO IDEAL E EM ESTRESSE
(ALTO TEOR DE AL E MN ASSOCIADO COM BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES).**

GENÓTIPO	Teor Absoluto		Teor Relativo	Acúmulo Absoluto		Acúmulo Relativo
	g/kg mat sec		%	mg/planta		%
	Sem Al	Com Al	Com Al	Sem Al	Com Al	Com Al
SP91-1049(1)	G 1,74 a	A 0,99 b	A 57,2 b	EF 23,21 a	A 11,61 b	A 50,03 b
RB855443(2)	ABCDEF 2,42 a	A 0,99 b	AB 41,17 b	CDEF 28,23 a	A 11,64 b	A 41,25 b
RB966928(3)	CDEFG 2,27 a	A 1,17 b	AB 51,54 b	DEF 24,76 a	A 12,85 b	A 51,9 b
RB965902(4)	FG 1,89 a	A 1,07 b	A 56,52 b	F 21,78 a	A 10,38 b	A 47,67 b
RB965917(5)	ABCDEF 2,42 a	A 0,99 b	AB 41,15 b	ABC 33,32 a	A 10,59 b	A 31,79 b
CTC 9(6)	ABCDEF 2,51 a	A 1,24 b	AB 49,57 b	BCDE 29,57 a	A 12,68 b	A 42,9 b
CTC17(7)	EFG 2,09 a	A 0,75 b	AB 35,76 b	DEF 24,89 a	A 7,08 b	A 28,45 b
CTC 21(8)	BCDEFG 2,32 a	A 1,04 b	AB 45,12 b	CDEF 27,98 a	A 10,64 b	A 38,03 b
SP81-3250(9)	ABC 2,88 a	A 1,17 b	AB 40,53 b	ABC 34,31 a	A 11,74 b	A 34,21 b
IAC911099(10)	CDEFG 2,27 a	A 0,94 b	AB 41,66 b	CDEF 27,51 a	A 9,76 b	A 35,48 b
IACSP95-5094(11)	ABCDEF 2,42 a	A 1,07 b	AB 44,29 b	ABC 33,43 a	A 10,77 b	A 32,23 b
IACSP96-3060(12)	ABCDE 2,71 a	A 1 b	AB 36,75 b	ABCD 31,93 a	A 10,81 b	A 33,85 b
CTC 2(13)	AB 2,94 a	A 1,2 b	AB 40,81 b	A 37,48 a	A 11,99 b	A 31,99 b
CTC 20(14)	DEFG 2,12 a	A 0,87 b	AB 41,25 b	DEF 25,57 a	A 8,55 b	A 33,43 b
CTC 24(15)	ABCDE 2,69 a	A 1 b	B 30,14 b	ABCD 31,79 a	A 10,15 b	A 31,94 b
CTC99-1906(16)	AB 2,93 a	A 1,02 b	AB 34,82 b	A 38,62 a	A 11,26 b	A 29,17 b
SP83-2847(17)	ABCDEF 2,46 a	A 0,95 b	AB 38,45 b	ABCD 31,63 a	A 10,13 b	A 32,02 b
SP80-3280(18)	ABCDE 2,71 a	A 1,04 b	AB 38,58 b	ABC 33,06 a	A 11,08 b	A 33,53 b
IACSP95-5000(19)	EFG 2,09 a	A 1,19 b	A 57,29 b	CDEF 28,04 a	A 12,43 b	A 44,34 b
CTC 6(20)	BCDEF 2,39 a	A 0,95 b	AB 39,59 b	BCDE 29,55 a	A 10,28 b	A 34,78 b
CTC 15(21)	ABC 2,79 a	A 1,22 b	AB 43,75 b	A 38,76 a	A 12,06 b	A 31,12 b
RB855536(22)	ABCDEF 2,49 a	A 1,12 b	AB 45,02 b	ABC 33,21 a	A 11,68 b	A 35,19 b
RB867515(23)	ABCD 2,74 a	A 1,1 b	AB 40,04 b	ABC 32,91 a	A 11,46 b	A 34,82 b
RB935744(24)	A 3,06 a	A 1,17 b	AB 38,31 b	AB 36,02 a	A 12,33 b	A 34,23 b

APÊNDICE E - VALORES ABSOLUTOS (G/KG MATÉRIA SECA) E RELATIVOS (%) DO TEOR E ACÚMULO DE NITROGÊNIO EM 24 GENÓTIPOS DE CANA DE AÇÚCAR, EM CONDIÇÕES DE CULTIVO IDEAL E EM ESTRESSE (ALTO TEOR DE AL E MN ASSOCIADO COM BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES).

GENÓTIPO	Teor Absoluto		Teor Relativo	Acúmulo Absoluto		Acúmulo Relativo
	g/kg mat sec		%	mg/planta		%
	Sem Al	Com Al	Com Al	Sem Al	Com Al	Com Al
SP91-1049(1)	ABCD 14,64 a	AB 5,75 b	B 39,31 b	ABC 194,85 a	A 67,37 b	A 34,57 b
RB855443(2)	ABCDE 13,81 a	B 4,75 b	B 34,38 b	CD 161,17 a	A 55,52 b	A 34,45 b
RB966928(3)	ABCDE 14,01 a	B 5,10 b	B 36,44 b	D 152,67 a	A 56,34 b	A 36,92 b
RB965902(4)	ABC 15,629 a	AB 6,14 b	B 39,33 b	BCD 180,14 a	A 59,58 b	A 33,07 b
RB965917(5)	A 16,09 a	B 4,96 b	B 30,82 b	A 222,52 a	A 52,78 b	A 23,71 b
CTC 9(6)	ABCD 15,08 a	B 4,67 b	B 30,97 b	BCD 178,03 a	A 47,49 b	A 26,68 b
CTC17(7)	ABCDE 13,62 a	B 5,08 b	B 37,28 b	CD 161,42 a	A 48,07 b	A 29,78 b
CTC 21(8)	ABCD 15,032 a	B 5,06 b	B 33,67 b	BCD 181,78 a	A 51,52 b	A 28,34 b
SP81-3250(9)	ABCDE 14,33 a	B 5,24 b	B 36,59 b	CD 171,91 a	A 52,68 b	A 30,64 b
IAC911099(10)	DE 12,67 a	B 5,07 b	B 40,03 b	D 154,32 a	A 52,37 b	A 33,94 b
IACSP95-5094(11)	ABCDE 13,83 a	B 5,25 b	B 37,99 b	ABCD 190,69 a	A 52,86 b	A 27,72 b
IACSP96-3060(12)	ABC 15,40 a	B 5,16 b	B 33,52 b	BCD 182,13 a	A 55,86 b	A 30,66 b
CTC 2(13)	ABC 15,23 a	B 5,13 b	B 33,72 b	ABC 195,43 a	A 51,37 b	A 26,28 b
CTC 20(14)	ABCDE 14,01 a	B 5,33 b	B 38,03 b	CD 170,34 a	A 52,12 b	A 30,59 b
CTC 24(15)	ABCDE 13,78 a	B 4,75 b	B 34,46 b	CD 162,16 a	A 48,47 b	A 29,89 b
CTC99-1906(16)	ABCDE 13,96 a	AB 5,81 b	AB 41,63 b	ABCD 185,47 a	A 64,02 b	A 34,51 b
SP83-2847(17)	E 11,92 a	B 5,68 b	AB 47,67 b	D 154,52 a	A 60,72 b	A 39,29 b
SP80-3280(18)	ABCDE 14,26 a	B 5,50 b	B 38,58 b	BCD 173,96 a	58,68 b	A 33,73 b
IACSP95-5000(19)	CDE 13,43 a	AB 5,75 b	AB 42,85 b	BCD 180,31 a	A 59,99 b	A 33,27 b
CTC 6(20)	ABCD 14,78 a	B 5,40 b	B 36,54 b	BCD 182,63 a	A 58,15 b	A 31,84 b
CTC 15(21)	ABCDE 14,10 a	A 8,16 b	A 57,88 b	ABC 196,65 a	A 80,7 b	A 41,03 b
RB855536(22)	AB 15,91 a	AB 5,96 b	B 37,52 b	AB211,49 a	A 62,14 b	A 29,38 b
RB867515(23)	ABC 15,33 a	AB 6,13 b	B 39,97 b	ABCD 184,25 a	A 63,96 b	A 34,71 b
RB935744(24)	ABC 15,83 a	AB 6,18 b	B 39,01 b	ABCD 187,61 a	A 65,05 b	A 34,67 b

APÊNDICE F - VALORES ABSOLUTOS (G/KG MATÉRIA SECA) E RELATIVOS (%) DO TEOR E ACÚMULO DE POTÁSSIO EM 24 GENÓTIPOS DE CANA DE AÇÚCAR, EM CONDIÇÕES DE CULTIVO IDEAL E EM ESTRESSE (ALTO TEOR DE AL E MN ASSOCIADO COM BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES).

GENÓTIPO	Teor Absoluto		Teor Relativo	Acúmulo Absoluto		Acúmulo Relativo
	g/kg mat sec		%	mg/planta		%
	Sem Al	Com Al	Com Al	Sem Al	Com Al	Com Al
SP91-1049(1)	AB 21,64 a	BCDE16,11 b	ABCDEF 74,43 b	BC 287,96 a	ABCD 189,73 b	ABCD 65,89 b
RB855443(2)	AB 21,96 a	ABCDE 17,04 b	ABCDE 77,63 b	BCD 255,66 a	ABC 199,45 b	A 78,02 b
RB966928(3)	B 19,51 a	DE 14,9 b	ABCDE 76,36 b	D 212,78 a	BCDE 164,49 b	AB 77,30 b
RB965902(4)	AB 20,96 a	DE 15,09 b	BCDEF 71,99 b	CD 241,48 a	CDE 146,27 b	ABCDEF 60,57 b
RB965917(5)	B 18,68 a	DE 15,01 b	ABCDEF 80,34 b	BCD 257,22 a	BCDE 159,58 b	ABCDEF 62,04 b
CTC 9(6)	AB 21,07 a	DE 12,33 b	DEF 58,53 b	CD 248,52 a	E 124,98 b	DEF 50,29 b
CTC17(7)	AB 21,46 a	ABCDE 17,25 b	ABCDE8 0,38 b	BCD 255,11 a	BCDE 163,35 b	ABCDE64,03 b
CTC 21(8)	AB 21,41 a	DE 14,09 b	CDEF 65,82 b	BCD 258,91 a	CDE 143,68 b	ABCDEF 55,49 b
SP81-3250(9)	AB 24,23 a	CDE 15,31 b	DEF 63,21 b	BC 287,97 a	CDE 154,24 b	CDEF 53,56 b
IAC911099(10)	AB 20,85 a	DE 14,58 b	BCDEF 69,91 b	BCD 254,22 a	CDE 150,74 b	ABCDEF 59,30 b
IACSP95-5094(11)	B 19,11 a	DE 13,38 b	BCDEF 70,05 b	BCD 262,47 a	DE 133,99 b	DEF 51,05 b
IACSP96-3060(12)	AB 21,42 a	CDE 15,26 b	BCDEF 71,28 b	BCD 251,9 a	ABCDE 165,5 b	ACBD 65,70 b
CTC 2(13)	AB 22,09 a	A 21,78 a	A 98,61 a	BC 282,24 a	AB 218,09 b	AB 77,27 b
CTC 20(14)	AB 22,27 a	ABC 20,78 a	AB 93,33 a	BCD 269,91 a	ABC 202,89 b	ABC 75,17 b
CTC 24(15)	AB 23,78 a	DE 14,16 b	DEF 59,54 b	BC 278,2 a	CDE 144,5 b	DEF 51,94 b
CTC99-1906(16)	AB 23,6 a	E 11,79 b	F 49,99 b	AB 311,34 a	DE 129,59 b	EF 41,63 b
SP83-2847(17)	AB 23,36 a	ABCDE 16,52 b	BCDEF 70,70 b	ABC 300,96 a	ABCDE 176,41 b	ABCDEF 58,62 b
SP80-3280(18)	AB 21,13 a	ABCD 17,52 b	ABCD 82,92 b	BCD 257,09 a	ABCDE 186,04 b	ABCD 72,36 b
IACSP95-5000(19)	AB 20,52 a	DE 14,49 b	BCDEF 70,61 b	BC 275,29 a	CDE 150,61 b	BCDEF 54,71 b
CTC 6(20)	AB 23,54 a	AB 21,13 a	ABC 89,76 a	ABC 291,41 a	A 226,94 b	A 77,88 b
CTC 15(21)	A 25,12 a	DE 14,33 b	EF 57,06 b	A 349,89 a	CDE 141,52 b	F 40,45 b
RB855536(22)	AB 21,25 a	ABCD 17,54 b	ABCD 82,54 b	BC 282,45 a	ABCDE 182,61 b	ABCD 64,65 b
RB867515(23)	AB 21,14 a	BCDE 15,59 b	ABCDEF 73,77 b	BCD 253,97 a	BCDE 162,83 b	ABCDE 64,11 b
RB935744(24)	AB 22,51 a	DE 12,83 b	EF 57,02 b	BCD 268,14 a	DE 134,38 b	DEF 50,12 b