

2025

# Eficiência de uso de nitrogênio por genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta

Dias Junior, Eduardo Siqueira

Universidade Estadual do Norte do Paraná

---

DIAS JUNIOR, Eduardo Siqueira. Eficiência de uso de nitrogênio por genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta. Orientador: Oriel Tiago Kölln. 2025. [1-85] f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Campus Luiz Meneghel, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes, 2025.

<https://repositorio.uenp.edu.br/handle/123456789/847>

*Baixado de Repositório Institucional UENP*



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE DO PARANÁ**  
***CAMPUS LUIZ MENEGHEL***  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

EDUARDO SIQUEIRA DIAS JUNIOR

**EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO POR GENÓTIPOS DE CANA-DE-  
AÇÚCAR EM CICLO DE CANA-PLANTA**

BANDEIRANTES, PR, BRASIL

2025

EDUARDO SIQUEIRA DIAS JUNIOR

**EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO POR GENÓTIPOS DE CANA-DE-  
AÇÚCAR EM CICLO DE CANA-PLANTA**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Mestrado em Agronomia, da Universidade  
Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz  
Meneghel.

Orientador(a): Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln  
Coorientador(a): Prof. Dr. Diego Resende  
Rodrigues

BANDEIRANTES, PR, BRASIL  
2025

Ficha catalográfica elaborada na Biblioteca do *Campus* "Luiz Meneghel", vinculada ao Sistema de Bibliotecas Universitárias da Universidade Estadual do Norte do Paraná (SBU-UENP)

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

Dias Junior, Eduardo Siqueira.  
D541e Eficiência de uso de nitrogênio por genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta / Eduardo Siqueira Dias Junior. – 2025.  
73 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln.  
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* "Luiz Meneghel", Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Agronomia, 2025.  
Inclui bibliografia.

1. Eficiência no Uso de Nitrogênio (EUN) - Dissertação. 2. Saccharum officinarum - Dissertação. 3. Fertilizantes nitrogenados - Dissertação. 4. Matéria Seca Total (MST) - Dissertação. 5. Produtividade de Colmos (TCH) .  
I. Kölln, Oriel Tiago. II. Universidade Estadual do Norte do Paraná. Campus Luiz Meneghel. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDD: 631.8 (22.ed.)

Bibliotecário Elísio Custódio Brentan Junior (CRB-9/1955)

EDUARDO SIQUEIRA DIAS JUNIOR

**EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO POR GENÓTIPOS DE CANA-DE-  
AÇÚCAR EM CICLO DE CANA-PLANTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Agronomia, Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, Centro de Ciências Agrárias, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de Concentração: Agropecuária sustentável  
Linha de Pesquisa: Eficiência de uso de nitrogênio em cana-de-açúcar  
Orientador(a): Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.Dr. Oriel Tiago Kölln (Orientador)  
Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP)  
PPAGRO | UENP | *Campus* Luiz Meneghel

---

Dr. Henrique Coutinho Franco (Membro Titular)  
CROPMAN – Inteligência em diagnósticos de solo

---

Dr. Sérgio Ricardo Silva (Membro Titular)  
Embrapa - Florestas

---

Prof.Dr. Gustavo Dário (Membro Suplente)  
Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP)  
PPAGRO | UENP | *Campus* Luiz Meneghel

---

Profa.Dra. Karina Aline Alves Dário (Membro Suplente)  
Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IDR/PR

BANDEIRANTES, 16 DE JULHO DE 2025.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me sustentado e me permitido chegar a este momento tão importante, por não me deixar desistir nos períodos mais difíceis e desafiadores.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando em todas as etapas dessa jornada, especialmente minha mãe, Simone Santos; meu pai, Eduardo Dias; meu padrasto, Alexandre Olívio; minha avó, Neide Bachiega; meu avô, Jacob Santos; minhas tias, Alexandra Dias e Luciana Santos; meus tios, Marcel Araújo e João Alexandre Dias; e minhas primas, Nathália Santos, Isabela Santos e Mariane Dias, meu primo, compadre e irmão da vida Caio Flausino.

À minha namorada, Júlia Souza, pelo apoio incondicional, por acreditar em mim e me incentivar até a conclusão deste mestrado, compreendendo os longos meses de dedicação e estudo. Seu carinho e paciência tornaram esse caminho mais leve.

Aos meus familiares do coração, Sônia. A.S. Henriques, José Mario E. Henriques, José. C. Henriques Neto, José Mário.E.Tostes e à minha irmã eterna (*in memoriam*), Ana Laura Henriques.

Aos amigos que compartilharam dessa jornada comigo e contribuíram para a realização deste trabalho, em especial a Pedro Henrique Passos, companheiro de projeto e grande parceiro nessa caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln, por todos os ensinamentos, paciência e compreensão ao longo do mestrado. Também expresso minha gratidão a todos os professores do programa pelos conhecimentos transmitidos e pelo apoio constante, estendo a todos os funcionários da UENP/CLM que sempre contribuirão para termos as melhores condições de estudos possíveis.

À Fundação Araucária, pelo suporte financeiro por meio da concessão da bolsa de estudos, tornando possível a realização deste trabalho. Também agradeço a Usina Jacarezinho, na pessoa do Adalberto Alves e todos os funcionários que nos abriram as portas.

Por fim, um agradecimento especial à pessoa que sempre me incentivou e não mediu esforços para que este sonho se tornasse realidade: meu grande amigo e coorientador, Prof. Dr. Diego Resende Rodrigues. Sua orientação e apoio foram fundamentais para esta conquista.

DIAS JUNIOR, Eduardo Siqueira. **Eficiência de uso de nitrogênio por genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta**: 2025. (Dissertação - Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2025.

**RESUMO** - O nitrogênio é um nutriente essencial, participando de processos fundamentais ao longo de todo o ciclo de vida das plantas. Devido a sua importância, é difícil imaginar uma atividade agrícola de alto rendimento produtivo sem o uso de fertilizantes nitrogenados, os quais contribuem para a segurança alimentar mundial. No entanto, seu uso está associado a impactos ambientais significativos, tornando essencial o desenvolvimento de estratégias para aumentar sua eficiência. A cana-de-açúcar, uma das culturas mais relevantes para a economia e a produção de bioenergia, apresenta grande demanda por nitrogênio, tornando fundamental a avaliação da eficiência de uso desse nutriente. Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de uso de nitrogênio (EUN) em genótipos de primeiro ano de cana-de-açúcar (cana-planta) sob condições de campo. O experimento foi conduzido em solo arenoso, em área comercial da Usina Jacarezinho, no município de Jacarezinho-PR, utilizando 16 genótipos de cana-de-açúcar (CTC 4; CTC 9001; CTC 9006; CV 7870; IAC5094; IAC5503; IAC8008; RB127825; RB855156; RB867515; RB92579; RB966928; RB975375 e RB987935) dispostos em blocos casualizados com quatro repetições. Cada parcela, com 17 m de comprimento e quatro linhas espaçadas em 1,5 m, foi subdividida em duas condições de nitrogênio: alta ( $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e baixa ( $9 \text{ kg ha}^{-1}$ ). O plantio ocorreu em 10/08/2023 com toletes da própria usina. Durante o ciclo, foi avaliado o acúmulo de nitrogênio na folha +1 aos 180 dias após o plantio (DAP) e o teor de clorofila, enquanto, na colheita (30/07/2024), foram realizadas avaliações biométricas e de produtividade, incluindo massa seca compartimentalizada e total, produtividade de colmos em toneladas de colmos por hectare (TCH) e produtividade de açúcar em toneladas de açúcar por hectare (TAH). Além disso, análises tecnológicas de POL, fibra, ATR e pureza do calo (PZa) foram realizadas no laboratório da usina. A análise de componentes principais (Principal Component Analysis - PCA) demonstrou que não houve interação significativa de baixo e alto N para nenhum dos componentes avaliados, demonstrando que o fator genético se destacou e deve ser considerado para o melhor posicionamento dos materiais a campo. Os resultados da massa seca total indicaram que o genótipo RB 127825 foi o mais eficiente e responsivo ao nitrogênio, seguindo a metodologia de Robinson *et al.* (2007) separando os quadrantes de eficiência e resposta quanto a média geral dos tratamentos de alto e baixo N, já 50% dos genótipos destacaram-se como não eficiente e não responsivo, juntamente com outros seis genótipos. Os demais genótipos distribuíram-se entre os grupos não eficientes e responsivos, e eficientes e não responsivos. Os 16 genótipos apresentaram comportamentos distintos quanto à EUN para os índices de massa seca total e TCH. Em relação aos principais índices de produtividade a diferença entre as doses de N foi menor que  $1 \text{ t ha}^{-1}$  para o TAH, tendo uma média de  $19 \text{ t ha}^{-1}$  e de aproximadamente  $3 \text{ t ha}^{-1}$  para o TCH com a média total de  $135 \text{ t ha}^{-1}$ . O acúmulo de nitrogênio na folha aos 180 DAP não diferiu entre os genótipos, e os parâmetros tecnológicos avaliados não foram significativamente afetados pela adubação nitrogenada. No entanto, os genótipos CTC 9001 e CTC 9002 se destacaram em todas as avaliações tecnológicas, independentemente da condição de nitrogênio.

**Palavras-chave:** Adubação nitrogenada. Produtividade agrícola. *Saccharum officinarum*. Sustentabilidade agrícola.

DIAS-JUNIOR, Eduardo Siqueira. **Nitrogen use efficiency by sugarcane genotypes in the plant cane cycle**: 2025. Master's Dissertation in Agronomy – State University of Northern Paraná, Luiz Meneghel Campus, Bandeirantes, 2025.

**ABSTRACT** - Nitrogen (N) is an essential macronutrient involved in fundamental physiological processes throughout the plant life cycle. Given its critical role, high-yield agricultural systems heavily depend on nitrogen fertilizers to ensure global food security. However, excessive N application is associated with significant environmental impacts, highlighting the need to improve nitrogen use efficiency (NUE). Sugarcane (*Saccharum* spp.), a key crop for bioenergy production and economic sustainability, exhibits high nitrogen demand, necessitating the evaluation of NUE in this system. This study aimed to assess NUE and nitrogen response in first-year sugarcane (plant cane) genotypes under field conditions. The experiment was carried out in a commercial sandy soil area of the Jacarezinho Mill, located in Jacarezinho, Paraná, Brazil. Sixteen sugarcane genotypes were arranged in a randomized block design with four replications. Each plot consisted of four 17-meter-long rows spaced 1.5 m apart, subdivided into two nitrogen treatments: high N (180 kg ha<sup>-1</sup>) and low N (9 kg ha<sup>-1</sup>). Planting was performed on August 10, 2023, using stalk segments provided by the mill. Nitrogen status in leaf +1 was evaluated at 180 days after planting (DAP). At harvest (July, 2024), biometric and yield parameters were assessed, including compartmentalized and total dry matter, stalk yield (TCH), and sugar yield (TAH). Additionally, technological analyses—POL (%), fiber (%), total recoverable sugar (TR) (kg t<sup>-1</sup>), and juice purity (PZA %) were performed in the mill's laboratory. Nitrogen use efficiency (NUE) and responsiveness varied significantly among the 16 evaluated sugarcane genotypes. RB 127825 outstanding as the most nitrogen-efficient and responsive genotype, clustering with four others in the high-NUE quadrant. The other hand, CTC 9002 and IAC5094 were classified as inefficient and non-responsive, along with six additional genotypes. The remaining genotypes exhibited intermediate performed, distributed between inefficient-but-responsive and efficient-but-non-responsive groups. Genotypic differences in NUE were evident based on total dry matter (TDM) and stalk yield (TCH) indices. Clearilly, most variables showed no significant differences ( $p > 0.05$ ) between high-N (180 kg ha<sup>-1</sup>) and low-N (9 kg ha<sup>-1</sup>) treatments within the same genotype, underscoring the predominant influence of genetic factors over nitrogen supply in determining NUE. This finding highlights the importance of genotype selection for optimizing field-level nitrogen management. Leaf nitrogen accumulation at 180 DAP did not differ significantly between nitrogen treatments. Similarly, technological parameters (POL, fiber, TRS, PZA) were unaffected by nitrogen fertilization. However, CTC 9001 and CTC 9002 consistently outperformed other genotypes in technological quality across both N conditions, irrespective of their NUE classification.

**Keywords:** Agricultural sustainability. Nitrogen fertilization. *Saccharum officinarum*. sugarcane yield.

## Lista de Figuras

- Figura 1** - Eficiência de utilização de N (EUN) seguindo o conceito da razão entre as saídas e as entradas de N no sistema solo-planta. Principais entradas e saídas, sendo a fixação biológica de N (FBN) naturalmente relevante apenas em leguminosas. Entradas e saídas de N no sistema (setas vermelhas) o ciclo do N com as partículas de solo (setas roxas), formas de perda tanto para a atmosfera quanto para o solo (setas azuis) e o aproveitamento de N pela cultura (setas verdes). ..... 18
- Figura 2** - Localização do município de Jacarezinho no Brasil, estado do Paraná, mesorregião (MESO) e microrregião de referência (MRG). .....21
- Figura 3**- Distribuição dos trabalhos anteriores em relação as variedades de cana-de-açúcar divididas em quadrantes de eficiência e resposta ao N. Quanto mais acima e para a direita a variedade é eficiente e responsiva, quanto mais para baixo e a esquerda a variedade é não eficiente e não responsiva.....24
- Figura 4** - Croqui do experimento no campo.....27
- Figura 5** - Divisão da parcela demonstrando a área útil utilizada para coleta de dados nas duas linhas centrais (24 m<sup>2</sup> por subparcela), a bordadura representada nas duas linhas das extremidades, além da divisão das subparcelas entre alto e baixo N, com 8 metros de comprimento e 1,5m de espaçamento entre linhas, mantendo 4 linhas para cada tratamento. 28
- Figura 6** - Imagem aérea feita por drone, demonstrando de modo real como ficou disposto o croqui do experimento. ....28
- Figura 7** - Aparelho ClorofiLOG CFL 2060 realizando a medição dos níveis de clorofila da folha +1 aos 180 DAP .....29
- Figura 8** - Exemplo de amostra da folha +1 coletada (a); separação da nervura central e limbo foliar (b).....30
- Figura 9** - Amostras separadas em sacos de papel para serem colocadas na estufa (a); Amostras secando em estufa de circulação de ar forçado, vista interna da estufa (b). ....30
- Figura 10** - Moinho modelo TE-650 tipo Willey, vista frontal (a); vista interna (b) ..... 31
- Figura 11** - Padrão de amostra após moagem (a); pote identificado para ser encaminhado para análise em laboratório (b). .... 31

<b>Figura 12</b> - Coleta e pesagem no campo, de dois metros de cada subparcela, das folhas secas (a); colmos (b); e exemplo do feixe de ponteiros (c).....	33
<b>Figura 13</b> - Procedimento de despalha dos colmos, com objetivo de não haver interferência na massa real de cada tratamento e da produtividade final. ....	33
<b>Figura 14</b> - Modelo de balança digital portátil (balança de pesca) utilizada para as pesagens a campo, é possível observar no visor o peso de 390 g do recipiente que foi utilizado.....	33
<b>Figura 15</b> - Feixes de três ponteiros com placa de identificação (a); feixe com três colmos com placa de identificação (b).....	34
<b>Figura 16</b> - Modelo da balança do tipo relógio utilizada para pesagem dos feixes inteiros de cada subparcela (esquerda); sistema completo utilizado para erguer os feixes e realizar a pesagem (direita). ....	34
<b>Figura 17</b> - Sistema para a pesagem em funcionamento, sendo possível observar os colmos completamente limpos, sem a presença de palha (a); vista frontal do sistema completo (b)..	35
<b>Figura 18</b> - Precipitação (mm), temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) mensal no período de julho de 2023 a julho de 2024 .....	35
<b>Figura 19</b> - Gráfico da análise dos componentes principais de forma multivariada .....	37
<b>Figura 20</b> - Gráfico de correlação das variáveis com os componentes principais.....	38
<b>Figura 21</b> - Gráfico da correlação de Pearson entre estimativa da Clorofila e o teor de N nas folhas aos 180 DAP ( $\text{g kg}^{-1}$ ). ....	40
<b>Figura 22</b> - Gráfico do Teor de N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) aos 180 DAP em 16 genótipos de cana-de-açúcar sob doses alta e baixa de N.....	41
<b>Figura 23</b> - Gráficos desempenho tecnológico da cana-de-açúcar avaliados na usina jacarezinho.....	42
<b>Figura 24</b> - Gráfico da produtividade em toneladas de colmo $\text{ha}^{-1}$ (TCH) dos 16 genótipos de cana-de-açúcar submetidos as condições de baixa e alta dose de N .....	44
<b>Figura 25</b> - Gráfico da produtividade dos 16 genótipos de cana-de-açúcar em toneladas de açúcar $\text{ha}^{-1}$ (TAH) submetidos as condições de baixa e alta dose de N .....	45
<b>Figura 26</b> - Gráfico do acúmulo de massa seca total ( $\text{t ha}^{-1}$ ), com os 16 genótipos classificados em quatro quadrantes quanto sua eficiência e resposta ao N .....	49

**Figura 27** - Gráfico da produtividade TCH ( $t\ ha^{-1}$ ), com os 16 genótipos classificados em quatro quadrantes quanto sua eficiência e resposta ao N..... 51

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Análise química do solo da área experimental .....	22
<b>Tabela 2</b> - Percentual de Potássio, Cálcio e Magnésio na CTC do solo e proporção entre os nutrientes na CTC .....	23
<b>Tabela 3</b> - Análise física de solo da área experimental. ....	23
<b>Tabela 4</b> - Genótipos de cana-de-açúcar testados quanto a eficiência e resposta ao N em casa de vegetação (colunas 1 e 2), genótipos selecionados para teste de eficiência e resposta de N a campo (coluna 3). ....	25
<b>Tabela 5</b> - Indicadores de qualidade e valores recomendados para cana de açúcar .....	42
<b>Tabela 6</b> - Massa seca compartimentalizada de folha ( $t\ ha^{-1}$ ).....	46
<b>Tabela 7</b> - Massa seca compartimentalizada de ponteiro ( $t\ ha^{-1}$ ) .....	47
<b>Tabela 8</b> - Massa seca compartimentalizada de colmo ( $t\ ha^{-1}$ ).....	47

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1. A cana-de-açúcar .....	14
2.2. Nitrogênio .....	15
2.3. Perda de nitrogênio e o impacto ambiental.....	16
2.4. Eficiência de utilização de nitrogênio.....	17
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>20</b>
3.1. Caracterização da região do experimento. ....	20
3.2. Seleção dos genótipos .....	23
3.3. Descrição dos tratamentos e das parcelas .....	25
3.4. Avaliações.....	29
3.5. Precipitação, temperatura máxima e mínima.....	35
3.6. Análise estatística .....	36
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>37</b>
4.1. Análise de componentes principais em relação ao nitrogênio .....	37
4.2. Nitrogênio na folha aos 180 dias após o plantio e estimativa do teor de clorofila.....	39
4.3. Desempenho tecnológico dos genótipos.....	42
4.4. Produtividade de colmos TCH e açúcar TAH .....	43
4.5. Acúmulo de massa seca compartimentalizada.....	46
4.6. Eficiência de utilização de nitrogênio em relação a massa seca e tonelada de colmo por hectare.....	48
<b>5. DISCUSSÃO</b> .....	<b>53</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>62</b>
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>64</b>
<b>APÊNDICE A</b> – Tabela do teste T para o nível de N foliar aos 180 dap em 16 genótipos sob alto e baixo N.....	<b>74</b>
<b>APÊNDICE B</b> - Tabela do teste T para o TAH em 16 genótipos sob alto e baixo N.....	<b>75</b>
<b>APÊNDICE C</b> - Tabela do teste T para o TCH em 16 genótipos sob alto e baixo N.....	<b>76</b>
<b>APÊNDICE D</b> - Tabela do teste T para o atr (kg ha <sup>-1</sup> ) em 16 genótipos sob alto e baixo N.....	<b>77</b>

<b>APÊNDICE E</b> – Tabela do teste T para o percentual de fibra em 16 genótipos sob alto e baixo N. ....	<b>78</b>
<b>APÊNDICE F</b> - Tabela do teste T para o percentual de pol no caldo em 16 genótipos sob alto e baixo N.....	<b>79</b>
<b>APÊNDICE G</b> - Tabela do teste T para o percentual de pza do caldo em 16 genótipos sob alto e baixo N.....	<b>80</b>
<b>APÊNDICE H</b> – Tabelas da análise de variância (ANOVA) para o índice de N na folha aos 180 DAP, ATR, fibra e POL. ....	<b>81</b>
<b>APÊNDICE I</b> - Tabelas da análise de variância (ANOVA) para PZa, TCH e TAH. ....	<b>82</b>
<b>APÊNDICE J</b> – Tabelas de análise de variância () para massa seca compartimentalizada de folhas, ponteiros e colmos. ....	<b>83</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No cenário mundial o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), produzindo quase 40% do açúcar consumido no mundo, seguido da Índia e União Europeia, no entanto, o mercado mundial do açúcar não apresenta tendência de crescimento, ao contrário do etanol que teve uma grande expansão ao longo das últimas duas décadas, com o aumento do incentivo à produção de biocombustíveis (Vidal, 2021; Rodrigues; Belon; Rodrigues, 2024). No Brasil, os estados que mais produzem a gramínea são: São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná. Esses estados juntos são responsáveis por aproximadamente 90% da produção nacional, sendo o principal deles o estado de São Paulo (CONAB, 2024).

Para atingir altas produções e continuar na liderança mundial desse setor, o nitrogênio é um elemento chave, sendo um nutriente essencial as plantas e fazendo parte de vários processos metabólicos, como a composição de todos os aminoácidos e proteínas, além de ter um papel fundamental na molécula de clorofila (Reetz-JR, 2016). Devido a essa importância, a sintetização da amônia anidra pelo processo Haber-Bosch é considerada a maior invenção do século passado, pois graças a esse processo, é possível produzir vários tipos de fertilizantes nitrogenados que possibilitam a produção de alimentos em larga escala, garantindo a segurança alimentar mundial (Erisman *et al.*, 2008).

No entanto, o uso de N como fertilizante é um dilema relevante, pois, se por um lado contribui com a segurança alimentar, por outro trás sérios riscos ao meio ambiente. Esses compostos estão associados a problemas como eutrofização das águas, a chuva ácida, emissões em grandes quantidades de gases de efeito estufa, e por consequência, o aquecimento global. O principal gás associado a essas emissões pelo nitrogênio é o óxido nitroso ( $N_2O$ ), que possui um potencial de aquecimento cerca de 298 vezes maior que o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), que são os principais gases do efeito estufa (Mohajan, 2018; Chai *et al.*, 2019). Todo esse efeito adverso é agravado devido à baixa eficiência desses fertilizantes, sendo que menos de 50% do total aplicado é de fato absorvido e convertido em biomassa pelas plantas (Zhang *et al.*, 2015; Cantarella *et al.*, 2012).

Esses fatores colocam o uso sustentável do nitrogênio como um dos maiores desafios enfrentados na atualidade. Para melhorar esse cenário, estudos têm sido desenvolvidos para entender e manejar a eficiência de utilização de nitrogênio (EUN), principalmente relacionando a genética das plantas a partir de avaliações envolvendo a fisiologia vegetal voltada para a produção de grãos (Hirel *et al.*, 2007; Sylvester-Bradley; Kindred, 2009). Para a cana-de-açúcar

o aproveitamento de N varia entre 20 e 40% a depender de vários fatores que deixam o conceito de EUN mais complexo. No entanto, a maioria dos modelos atuais de adubação nitrogenada para a cana não costuma levar em conta o genótipo que está sendo trabalhado, basicamente é calculado como se fossem o mesmo genótipo e tivessem a mesma eficiência para o N (Franco *et al.*, 2008; Vitti *et al.*, 2011, Kölln, 2016).

Robinson *et al.*, (2007) e Kölln (2016), em estudos avaliando a eficiência e resposta de diferentes genótipos de cana-de-açúcar em casa de vegetação, concluíram que existem diferenças da EUN de acordo com cada genótipo, e ainda que o sistema radicular é o principal responsável por esse aumento na eficiência de absorção do N.

Portanto, o aumento na EUN por genótipos de cana-de-açúcar pode ter potencial representativo na redução dos impactos ambientais e existe uma lacuna de informações para a EUN da cana-planta em condições de campo. A hipótese desse trabalho é que variedades de cana-de-açúcar apresentam diferenças quanto a eficiência e resposta ao uso do N a campo, sendo necessário uma recomendação específica no posicionamento da adubação nitrogenada, de acordo com a característica do material genético. Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a eficiência de uso e resposta de N em genótipos de cana-de-açúcar em condições de campo no ciclo de cana-planta.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical de ampla importância agrícola, cultivada há séculos e amplamente disseminada em regiões tropicais e subtropicais. Sua origem é atribuída ao Sudeste Asiático e principalmente à Papua-Nova Guiné, de onde se espalhou e foi domesticada ao longo do tempo (Sreenivasan; Ahloowallia; Heinz, 1987; Amaral; Santos; Barbosa, 2015).

Pertencente à família Poaceae, a cultura apresenta colmos ricos em sacarose, dos quais se extrai açúcar. Os híbridos modernos resultam do cruzamento entre *S. officinarum* e *S. spontaneum*, com predominância genética da primeira (Piperidis; Piperidis; Hont, 2010). O colmo maduro contém, em média, 70% de água, 15% de fibras, 13% de sacarose e 2% de outros compostos (FAO, 2012; Rodrigues; Ross, 2020).

A cana-de-açúcar apresenta bom desenvolvimento em regiões com temperaturas entre 20 e 35°C, sendo que fora dessa faixa o crescimento é limitado (Marin *et al.*, 2009). A exigência hídrica gira em torno de 1.200 a 1.500 mm de chuvas bem distribuídas ao longo do ano, com consumo diário que pode chegar a 8 mm nas fases de maior acúmulo de biomassa (Inman-Bamber; McGlinchey, 2003; Santos, 2005; Marin *et al.*, 2009). Adaptada ao clima tropical, a cultura é cultivada em mais de 100 países, com destaque para regiões entre os paralelos 30°N e 30°S (FAO, 2012). No Brasil, foi introduzida ainda no período colonial e, entre os séculos XVI e XVIII, consolidou-se como principal atividade econômica do país (Amaral; Santos; Barbosa, 2015; Barbosa, 2018).

Sustentando o título de maior produtor mundial da cultura e de seus principais produtos (açúcar e álcool), o Brasil possui na atual safra 2024/2025 uma área plantada de 8.695,5 milhões de hectares, com a produtividade esperada de 78,048 kg ha<sup>-1</sup> e a produção total de 678.668,2 milhões de toneladas. Apesar de manter o Brasil no topo do ranking, esta produtividade é 8,8% menor que a safra anterior, enquanto a produção chega a 4,8% de redução, que é explicada devido a fatores climáticos adversos ao longo da atual safra (CONAB, 2024).

Além do destaque mundial na quantidade produzida, a agroindústria brasileira também é referência positiva ao redor do mundo devido a produção sustentável, em um sistema onde praticamente todas as partes da planta são aproveitadas. A cana é considerada uma das grandes alternativas para a geração de biocombustíveis como o etanol e outros subprodutos, sendo que o Brasil já iniciou a produção de bioetanol que emite até 90% menos gases de efeito estufa em

comparação com a gasolina, e é gerado através da cana-de-açúcar, ou seja, uma fonte renovável (CONAB, 2020).

A cultura é um dos pilares do produto interno bruto (PIB) brasileiro, desempenhando um papel fundamental não apenas na agricultura, mas também na transição para práticas mais sustentáveis em outros setores como a produção de biocombustível. Diante de sua relevância, é imprescindível a contínua realização de estudos para melhorar o manejo, aumentando produtividade e reduzindo custos de produção, de modo a garantir a competitividade e a sustentabilidade da cana-de-açúcar a longo prazo no Brasil.

## 2.2. Nitrogênio

O nitrogênio (N) é um macronutriente primário essencial ao desenvolvimento vegetal, sendo o elemento requerido em maior quantidade pelas plantas (Malavolta; Moraes, 2007). Atua como componente de aminoácidos, proteínas, enzimas, vitaminas e da clorofila, desempenhando papel central em processos fisiológicos como a fotossíntese, o crescimento e a frutificação (Reetz Jr, 2016; Barros, 2020).

Durante o ciclo da cultura, a absorção de N varia conforme o estágio fenológico, com maior demanda nas fases de crescimento acelerado e redução com a senescência (Barros, 2020). No solo, o N passa por transformações como amonificação, nitrificação, mineralização, imobilização, desnitrificação e fixação biológica, que afetam sua disponibilidade para as plantas (Malavolta, 2006).

Devido à alta exigência das culturas e limitação das fontes naturais de N, a agricultura passou a depender de fertilizantes nitrogenados. Sendo hoje, segundo a Associação internacional de fertilizantes, 50% da produção mundial de alimentos depende exclusivamente dos fertilizantes nitrogenados (IFA, 2025). Um marco histórico para a produção desses insumos foi o desenvolvimento do processo Haber-Bosch, no início do século XX, que possibilitou a síntese industrial de amônia ( $\text{NH}_3$ ) a partir do N atmosférico ( $\text{N}_2$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), sob condições de alta temperatura e pressão na presença de catalisadores. Essa tecnologia viabilizou a produção em larga escala de fertilizantes nitrogenados e garantiu um avanço significativo na produtividade agrícola (Reetz Jr, 2016; Galloway *et al.*, 2017).

A ureia, com 46% de N, é atualmente o fertilizante nitrogenado mais utilizado no mundo, devido ao seu baixo custo e elevada concentração. No entanto, outra fonte amplamente empregada é o nitrato de amônio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), com cerca de 34% de N, composto por duas formas assimiláveis: o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), prontamente disponível para absorção, e o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), que

pode ser assimilado ou convertido em outras formas de N no solo (Reetz JR, 2016). Essa composição confere ao nitrato de amônio alta eficiência agrônômica, menor perda por volatilização em comparação à ureia e boa compatibilidade com outras formulações, como fertilizantes NPK.

Seu uso, no entanto, exige cuidados adicionais devido ao seu potencial explosivo. Após eventos como o atentado de 11 de setembro de 2001 nos Estados Unidos e acidentes industriais, sua comercialização passou a ser regulada por normas de segurança quanto ao transporte e armazenamento (Franco e Neto, 2007). Além disso, o nitrato de amônio apresenta características físicas que requerem aditivos para evitar empedramento, devido ao seu alto poder higroscópico.

No metabolismo vegetal, o nitrato absorvido pode ser reduzido por enzimas específicas e atuar como sinalizador metabólico, enquanto o amônio é rapidamente assimilado na síntese de aminoácidos e proteínas. Apesar de suas vantagens, o nitrato de amônio ainda pode apresentar perdas por lixiviação e, em menor escala, por volatilização, exigindo um manejo adequado para garantir eficiência agrônômica e sustentabilidade ambiental (Crawford; Forde, 2002; Kazimierczuk *et al.*, 2023).

Apesar da eficiência agrônômica do nitrato de amônio, seu uso envolve cuidados logísticos e ambientais, além de representar um investimento significativo. Por isso, compreender os custos envolvidos na adubação nitrogenada é fundamental para um manejo mais racional e economicamente viável.

### **2.3. Perda de nitrogênio e o impacto ambiental**

Conforme discutido anteriormente, os fertilizantes nitrogenados estão sujeitos a diferentes formas de perdas no ambiente, sendo as principais a lixiviação, desnitrificação e volatilização. Processos que não apenas reduzem a eficiência agrônômica, mas também contribuem para impactos ambientais significativos.

A lixiviação do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ocorre quando ele não é absorvido pelas plantas e se move verticalmente no perfil do solo, atingindo camadas profundas e podendo contaminar lençóis freáticos e corpos d'água (Fageria *et al.*, 2011). Esse processo é intensificado em solos arenosos, devido à menor capacidade de retenção de ânions, mas também pode ocorrer em solos argilosos, principalmente quando há acúmulo de N disponível (Sangoi *et al.*, 2003; Freitas, 2020; Carvalho; Zambot, 2012; Pinto *et al.*, 2020). O nitrato, por ser um ânion altamente solúvel e pouco adsorvível pelos colóides do solo, está entre as formas de N mais suscetíveis à lixiviação.

A desnitrificação, por sua vez, é um processo microbiano anaeróbico no qual o nitrato é reduzido a formas gasosas como  $N_2O$  e  $N_2$ . Embora o  $N_2$  represente uma forma inofensiva ao retornar à atmosfera, o  $N_2O$  é um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global aproximadamente 300 vezes maior que o  $CO_2$ , representando sério risco ambiental quando a desnitrificação é incompleta (Moura *et al.*, 2023).

Já a volatilização ocorre especialmente com o uso de ureia, que ao sofrer hidrólise forma compostos voláteis como o  $NH_3$ , principalmente em solos com pH elevado. Esse gás, além de representar perda de N, atua como poluente atmosférico e contribui para o aquecimento global (Krol *et al.*, 2020; Dawar *et al.*, 2021; Swelum *et al.*, 2021).

Essas perdas também estão diretamente relacionadas a um dos principais efeitos ambientais da aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados: a eutrofização das águas. Esse processo ocorre pelo acúmulo de nutrientes, especialmente N e fósforo (P), em lagos, rios e reservatórios, promovendo o crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas (Brigante e Espíndola, 2004; Esteves, 2011). A decomposição dessa biomassa consome o oxigênio dissolvido na água, levando à morte de organismos aquáticos e à liberação de gases tóxicos e odores desagradáveis. Além disso, a proliferação de cianobactérias pode comprometer a qualidade da água, tornando-a imprópria para consumo humano (Rocha, 2021).

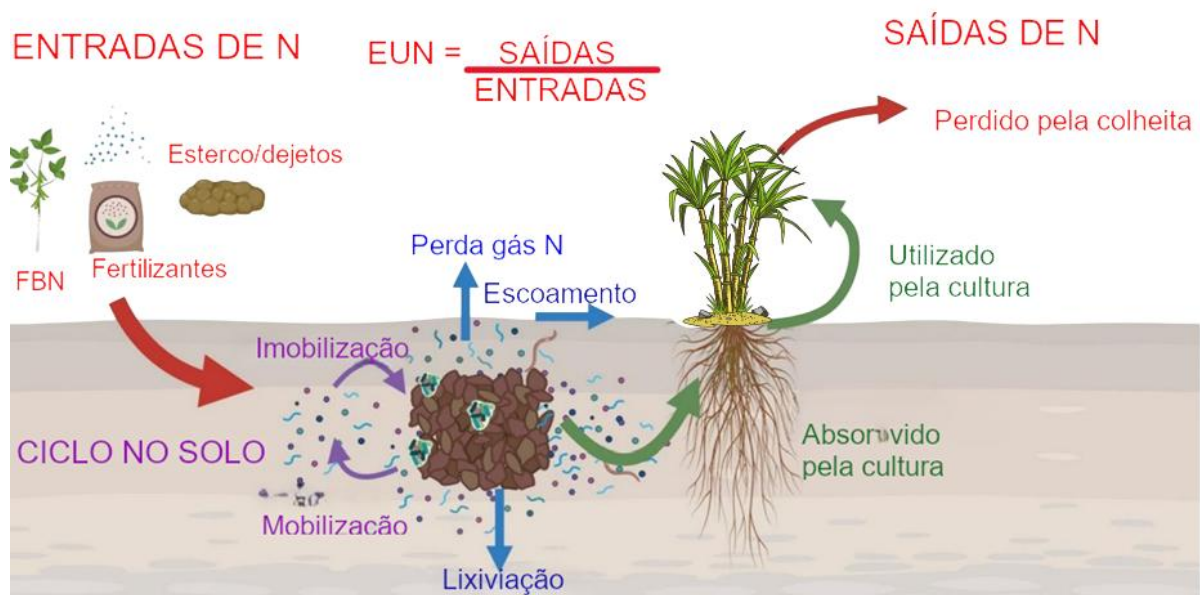
Segundo Gadelha *et al.* (2022), a eutrofização em rios costuma ser marcada por alta mortalidade de peixes e aspecto turbido da água, enquanto em lagos, o destaque é para o mau cheiro e contaminação. A agricultura é uma das fontes relevantes desse problema, especialmente pelo uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, embora o descarte inadequado de esgoto urbano ainda seja o principal responsável.

Diante desses impactos, fica evidente a importância de estratégias de manejo mais sustentáveis. O conceito de EUN surge como ferramenta essencial para maximizar a absorção pelas plantas, reduzir perdas e mitigar os efeitos ambientais associados ao uso de fertilizantes nitrogenados.

## **2.4. Eficiência de utilização de nitrogênio**

Dado o papel essencial do N na produção agrícola e seus impactos ambientais, é fundamental um manejo eficiente e responsável desse nutriente. A EUN ou na sigla em inglês NUE (*nitrogen use efficiency*) é um modo de comparar todos os efeitos agrônômicos que o N pode alcançar (Udivardi *et al.*, 2021). Para se referir a eficiência existem três conceitos utilizados, são eles: (i) a razão entre o rendimento e as entradas de N no sistema solo-planta,

conhecido por produtividade parcial do fator; (ii) a razão do N que foi exportado pela planta (quantidade de N que permaneceu na biomassa ou no grão após a colheita) e as entradas no sistema, este é chamado de eficiência da remoção de N; e (iii) o conceito mais tradicional é a eficiência de utilização de N, estimada a partir do rendimento da cultura e o N absorvido pela planta chamado de  $NUE_{\text{Soil}}$  (Martinez-Feria *et al.*, 2018). A Figura 1 a seguir ilustra esquematicamente os diferentes processos envolvidos na EUN.



**Figura 1** - Eficiência de utilização de N (EUN) seguindo o conceito da razão entre as saídas e as entradas de N no sistema solo-planta. Principais entradas e saídas, sendo a fixação biológica de N (FBN) naturalmente relevante apenas em leguminosas. Entradas e saídas de N no sistema (setas vermelhas) o ciclo do N com as partículas de solo (setas roxas), formas de perda tanto para a atmosfera quanto para o solo (setas azuis) e o aproveitamento de N pela cultura (setas verdes).

**Fonte:** Adaptado de Udivardi *et al.*, 2021.

Existem muitas outras expressões matemáticas utilizadas por vários autores para se referir a EUN (Novoa e Loomis, 1981; Moll; kamprath; Jackson, 1982; Doberman, 2007; Erisman *et al.*, 2018; Martinez-Feria *et al.*, 2018), cada uma delas possui algum tipo de limitação e deve ser analisada cuidadosamente para escolher a que melhor se encaixe a determinadas situações. A limitação mais comum a todas é não considerar o N residual do solo que pode interferir e subestimar ou superestimar o resultado da EUN.

Zhang *et al.* (2015) em uma ampla revisão de literatura, chegaram à conclusão de que a EUN dos sistemas de cultivo ao redor do mundo é em torno de 42%. Essa informação corrobora com pesquisadores anteriores a ele que estabeleceram uma faixa entre 30 e 50% para a EUN.

Dessa forma, a baixa eficiência no uso do N o coloca como uma das cinco principais ameaças que o planeta enfrenta atualmente (PNUMA, 2019). Apesar de parecer simples, o conceito por trás da EUN envolve muitos fatores, o que traz uma grande complexidade, iniciando pelas várias fontes de N que são possíveis de participar desse sistema, a dinâmica com o solo, características químicas e físicas deste solo, genética das culturas envolvidas e o clima. Uma interpretação precisa da EUN e um manejo eficiente levam em conta todos os fatores descritos (Erisman *et al.*, 2018; Martinez-Feria *et al.*, 2018).

Apesar de existirem vários conceitos e métodos de cálculo diferentes, a EUN na maioria das vezes é baseada em índices que consideram um único ciclo, as fontes de fertilizantes utilizadas, o solo e a planta sendo uma cultura específica por estudo. Essa abordagem pode limitar alguns resultados, deixando de lado fatores genéticos e outros pontos agrônômicos relevantes (Congreves *et al.*, 2021). Dessa forma, é necessário que se adote uma abordagem multidisciplinar, a qual não deixe nenhum fator de fora, para evitar que os índices obtidos sejam limitados a situações muito específicas.

No caso do fator genético, levando em consideração as inúmeras variedades existentes para uma única cultura, especificamente para a cana-de-açúcar, ainda são escassas as informações sobre EUN testadas em condições de campo. Otto *et al.* (2013) concluíram que a cana-de-açúcar pode apresentar diferentes respostas às doses de N, provando que a adubação nitrogenada baseada apenas em estimativas do rendimento esperado da cultura não é a melhor opção de manejo sustentável do N para a cana-de-açúcar.

Esses dados corroboram com Robinson *et al.* (2007), na Austrália, e Kölln (2016), no Brasil, que estabeleceram diferentes EUN para genótipos de cana-de-açúcar em condições controladas, demonstrando que é importante considerar o fator genético ao planejar a adubação nitrogenada.

A EUN, portanto, representa quanto do fertilizante nitrogenado aplicado ao longo do ciclo foi, de fato, aproveitado pela planta, refletindo-se na produção de biomassa para a cana-de-açúcar e, por exemplo, em grãos para outras culturas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização da região do experimento.

O experimento foi realizado na Usina Jacarezinho, unidade sucroenergética do Grupo Maringá, localizada na BR 153, km 09, no município de Jacarezinho, estado do Paraná. Suas coordenadas geográficas são latitude 23°06'17.2" S, longitude 49°56'51.7" W e altitude de 426m. O estudo ocorreu de agosto de 2023 a agosto de 2024, no ciclo de cana-planta.

O município pertence à mesorregião norte pioneiro paranaense que representa 1,4% do território estadual. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é subtropical úmido, mesotérmico (Cfa), com verões quentes e com geadas pouco frequentes. As chuvas tendem a se concentrar entre dezembro e fevereiro, enquanto o período mais seco ocorre entre junho e agosto, sem uma estação seca definida. A temperatura oscila entre 27 e 28°C nos períodos mais quentes e entre 17°C a 18°C para os meses mais frios. A precipitação anual varia de 1.400 a 1.600 mm, com os meses mais chuvosos durante o verão (IAT, 2006).

Quanto a classificação de solos, segundo a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS/NEPAR, 2024), aproximadamente 27,88% da área do município de Jacarezinho é composta por Neossolos, sendo predominante na área experimental o Neossolo Quartzarênico. Esse solo ocorre normalmente em áreas de relevo plano a suavemente ondulado, com perfil de textura arenosa.

Trata-se de um solo profundo, sem impedimentos físicos significativos ao crescimento radicular. No entanto, a presença de caráter álico ou distrófico pode restringir o desenvolvimento das raízes em profundidade, especialmente associada à limitada capacidade de retenção de água, típica de solos arenosos. Além disso, esses solos apresentam baixos teores de matéria orgânica, fósforo e micronutrientes, e são marcados por alta susceptibilidade à lixiviação de nitratos (EMBRAPA, 2021).

Complementando a caracterização da área experimental, destaca-se que esta é oriunda da reforma do canavial, com os restos culturais tendo sido incorporados no sistema. O histórico dos últimos 10 anos teve apenas o cultivo da cana-de-açúcar conduzido com as práticas de manejo usuais para a cultura, sem o uso de outras espécies nesse período. Adicionalmente, a colheita foi realizada sob o sistema de cana-crua, que dispensa o uso do fogo, contribuindo para a preservação da cobertura vegetal e das características do solo ao longo do tempo.

As Figuras 2 e 3 e as Tabelas 1; 2 e 3 a seguir apresentam a localização de Jacarezinho no estado do Paraná e no Brasil, além da análise de solo da área experimental.



**Figura 2** - Localização do município de Jacarezinho no Brasil, estado do Paraná, mesorregião (MESO) e microrregião de referência (MRG).

**Fonte:** Adaptado de Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IPARDES; IBGE, 2010).

**Tabela 1** - Análise química do solo da área experimental

Amostra	P	M.O	C	K	Ca	Mg	H + Al	Al	SB	pH CaCl <sub>2</sub>	CTC pH <sub>7</sub>	CTC efetiva	V	m
	mg/dm <sup>3</sup>	g/dm <sup>3</sup>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>						cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>		%			
0 – 25 cm	157	8	0,50	0,36	3,30	0,80	2,40	0,1	4,46	5,3	6,86	4,56	65	2,2

\*P = fósforo; M.O = Matéria Orgânica; C = Carbono; K = Potássio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; H + Al = Hidrogênio + Alumínio; Al = Alumínio; SB = Soma de bases; pH CaCl<sub>2</sub> = Potencial hidrogeniônico, medido em cloreto de cálcio; CTC pH<sub>7</sub> = Capacidade de troca catiônica em pH neutro; CTC efetiva = Capacidade de troca catiônica – hidrogênio; V% = saturação por base; m% = saturação por alumínio

**Fonte:** Agrolab - análise agropecuária / Usina jacarezinho.

**Tabela 2** - Percentual de Potássio, Cálcio e Magnésio na CTC do solo e proporção entre os nutrientes na CTC

Amostra	K na CTC	Ca na CTC	Mg na CTC	Al na CTC	Ca/K	Ca/Mg	Mg/k
	%						
0 – 25 cm	5,2	48,1	11,7	1,5	9,2	4,1	2,2

\*Percentual de potássio, cálcio, magnésio e alumínio na CTC; proporção entre cálcio e potássio; cálcio e magnésio e entre magnésio e potássio.

**Fonte:** Agrolab - análise agropecuária / Usina jacarezinho.

**Tabela 3** - Análise física de solo da área experimental.

Amostra	Areia	AD Pred	Class. AD	Argila	Silte
	%	mm/cm		%	
0 – 25 cm	82	0,54	AD2	12	5

\*Areia = percentual de areia; AD Pred = Água disponível predita; Class AD = Classificação de água disponível EMBRAPA; Argila = percentual de argila; Silte = Percentual de silte.

**Fonte:** Agrolab - análise agropecuária / Usina jacarezinho.

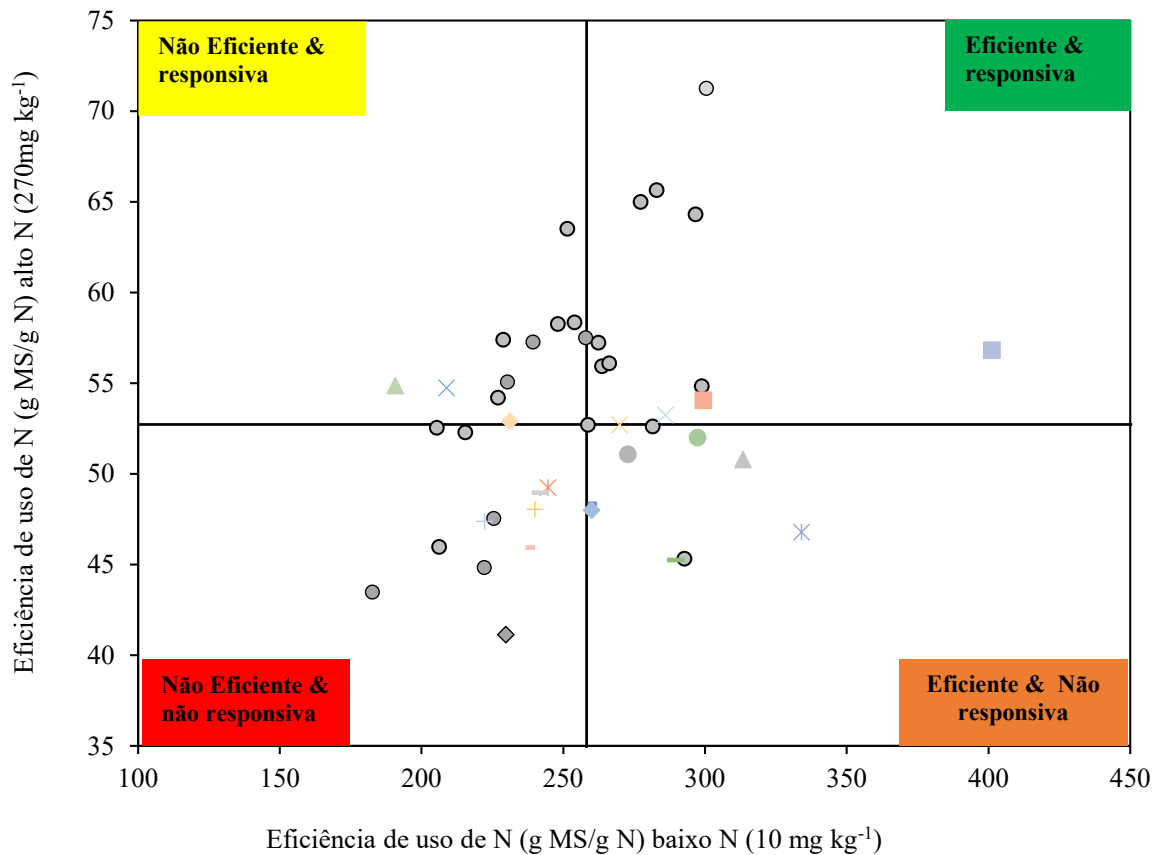
### 3.2. Seleção dos genótipos

O experimento foi elaborado a partir da seleção em 46 materiais de cana-de-açúcar provenientes de cinco programas de melhoramento genético (CTC, CV, IAC, RIDESA BRASIL e SP COPERSUCAR). A seleção ocorreu em fase inicial de desenvolvimento, sendo 20 materiais oriundos de Kölln (2016) e 26 de Andrade (2023), ambos testados em casa de vegetação. O resultado da seleção, foram 11 genótipos selecionados de Andrade (2023) e 5 de Kölln (2016).

Dentre os materiais avaliados, foram escolhidos 4 genótipos de cada quadrante, distribuídos da seguinte forma:

- 4 genótipos eficientes e responsivos (quadrante verde);
- 4 genótipos não eficientes e responsivos (quadrante amarelo);
- 4 genótipos eficientes e não responsivos (quadrante laranja);
- 4 genótipos não eficientes e não responsivos (quadrante vermelho).

Dos 46 materiais analisados, 16 foram selecionados por apresentarem melhor desempenho em casa de vegetação e maior interesse econômico para cultivo no campo. A Figura 3 abaixo ilustra os quadrantes em relação a eficiência e resposta.



**Figura 3-** Distribuição dos trabalhos anteriores em relação às variedades de cana-de-açúcar divididas em quadrantes de eficiência e resposta ao N. Quanto mais acima e para a direita a variedade é eficiente e responsiva, quanto mais para baixo e a esquerda a variedade é não eficiente e não responsiva.

A Tabela 4 apresenta todos os genótipos avaliados para chegar aos 16 selecionados com melhor desempenho e interesse econômico, para seguirem os estudos a campo. Na coluna 1 estão os genótipos testados por Kölln (2016) em Campinas/SP, exclusivamente variedades do programa de melhoramento da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA BRASIL), devido a uma parceria estabelecida entre o autor e o referido programa de melhoramento, e por serem materiais de grande interesse econômico na região centro-sul do Brasil. Já a coluna 2 apresenta os genótipos testados por Andrade (2023) em Bandeirantes/PR em condições idênticas do primeiro estudo, representando uma ampla variedade de materiais utilizados em todo o Brasil, oriundos dos demais programas de melhoramento mencionados. A coluna 3, destacada em vermelho, indica os 16 materiais selecionados para os testes realizados a campo no presente trabalho.

**Tabela 4** - Genótipos de cana-de-açúcar testados quanto a eficiência e resposta ao N em casa de vegetação (colunas 1 e 2), genótipos selecionados para teste de eficiência e resposta de N a campo (coluna 3).

Genótipos (Kölln, 2016)	Genótipos (Andrade, 2022)	Genótipos selecionados para campo
RB72454	CTC 022994	CTC 4
RB835054	CTC 1007	CTC 1007
RB835486	CTC 20	CTC 9001
RB855156	CTC 4	CTC 9002
RB855453	CTC 9001	CTC 9006
RB867515	CTC 9003	CV 7870
RB92579	CTC 9005	IAC5094
RB9286064	CTC 9006	IAC5503
RB935486	CV 6654	IAC8008
RB937570	CV 7870	RB127825
RB965902	IAC5094	RB855156
RB965917	IAC5503	RB867515
RB975201	IAC8008	RB92579
RB975242	RB016916	RB966928
RB975375	RB035060	RB975375
RB975952	RB127825	RB987935
RB985476	RB966928	
RB995867	RB988082	
	RB015177	
	RB005014	
	RB064773	
	RB077210	
	RB987935	
	SP 801816	

### 3.3. Descrição dos tratamentos e das parcelas

O preparo da área foi iniciado em 20 de julho de 2023, com a aplicação de herbicidas para o controle químico de plantas daninhas. Em 31 de julho de 2023, foram realizadas a sulcação e o preparo do solo, com a aplicação de 48 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo, na forma de fosfato natural reativo (GAFSA). O plantio foi realizado em 10 de agosto de 2023, utilizando toletes provenientes do viveiro da própria Usina Jacarezinho.

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com 16 genótipos de cana-de-açúcar (descritos na Tabela 4), cada um com quatro repetições por tratamento. Cada genótipo foi submetido a dois níveis de adubação nitrogenada: baixa dose (9 kg ha<sup>-1</sup> de N, correspondente a 10% da recomendação) e alta dose (180 kg ha<sup>-1</sup> de N, correspondente a 200% da recomendação), totalizando 64 parcelas e 128 subparcelas.

A dose padrão de adubação nitrogenada considerada foi de 90 kg ha<sup>-1</sup> de nitrato de amônio, conforme a metodologia utilizada pela Usina Jacarezinho, que adota o critério baseado na estimativa de produtividade multiplicada por 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante nitrogenado. A aplicação do N foi realizada de forma superficial (a lanço), próxima à linha de plantio, durante a operação de quebra-lombo, em 30 de outubro de 2023.

As parcelas experimentais apresentaram área total de 102 m<sup>2</sup>, compostas por quatro sulcos de 17 m de comprimento, com espaçamento de 1,5 m entre linhas. Cada parcela foi subdividida ao meio, resultando em duas subparcelas de 8 m de comprimento, separadas por um espaço de 1 m. Para a coleta de dados, foi considerada como área útil apenas as duas linhas centrais de cada subparcela, totalizando 24 m<sup>2</sup> de área útil por subparcela, as outras duas linhas de cada subparcela foram consideradas como bordadura e não tiveram uso para coleta de dados. A área total do experimento foi de 10.677,75 m<sup>2</sup>.

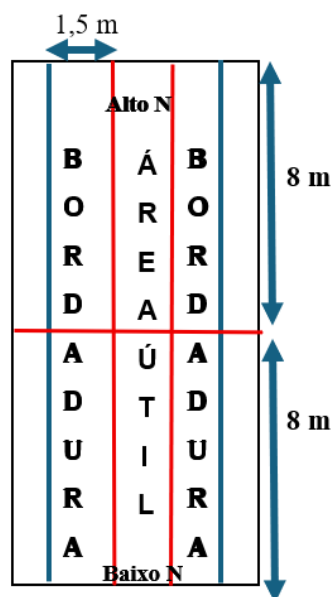
Todos os demais tratos culturais, incluindo controle de pragas, doenças, plantas daninhas e adubação potássica, foram conduzidos conforme os protocolos de manejo padrão estabelecidos pela Usina Jacarezinho. Apenas a adubação nitrogenada foi alterada conforme os tratamentos descritos.

As Figuras 4; 5 e 6 a seguir, demonstram como ficaram dispostos os tratamentos em blocos casualizados no croqui, as divisões em subparcelas e uma imagem de como o croqui ficou de fato disposto no campo.

Área da parcela: 102 m<sup>2</sup>, área total: 10667 m<sup>2</sup>



Figura 4 - Croqui do experimento no campo



**Figura 5** - Divisão da parcela demonstrando a área útil utilizada para coleta de dados nas duas linhas centrais (24 m<sup>2</sup> por subparcela), a bordadura representada nas duas linhas das extremidades, além da divisão das subparcelas entre alto e baixo N, com 8 metros de comprimento e 1,5m de espaçamento entre linhas, mantendo 4 linhas para cada tratamento.



**Figura 6** - Imagem aérea feita por drone, demonstrando de modo real como ficou disposto o croqui do experimento.

**Foto:** Adalberto Alves dos Santos Junior, 2024.

### 3.4. Avaliações

Aos 180 dias após o plantio (DAP), em 05/02/2024, dentro da área útil das parcelas, foi estimado o teor de clorofila nas folhas +1, com o auxílio do aparelho clorofiLOG CFL 2060. Após a medição, as mesmas folhas medidas tiveram sua região central coletada para análise do nível de N, sendo 10 folhas por subparcela, totalizando 20 por parcela. Após as coletas, o limbo foliar foi separado da nervura central e levado para estufa de circulação de ar forçado por 96 horas. Em seguida, as amostras foram pesadas e moídas em moinho tipo Willey e enviadas para análise em laboratório. As figuras a seguir ilustram as metodologias descritas.



**Figura 7** - Aparelho ClorofiLOG CFL 2060 realizando a medição dos níveis de clorofila da folha +1 aos 180 DAP

**Foto:** Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024



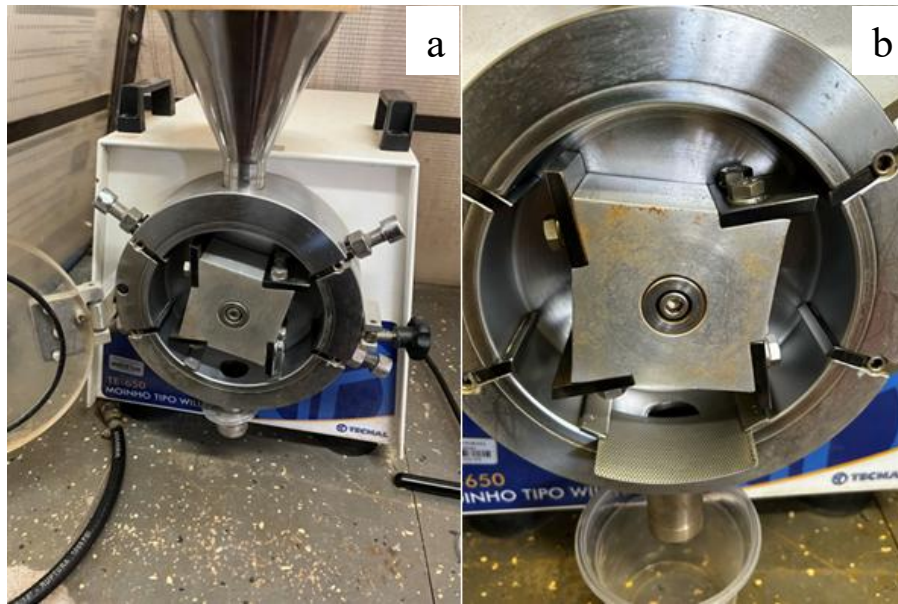
**Figura 8** - Exemplo de amostra da folha +1 coletada (a); separação da nervura central e limbo foliar (b)

**Foto:** Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.



**Figura 9** - Amostras separadas em sacos de papel para serem colocadas na estufa (a); Amostras secando em estufa de circulação de ar forçado, vista interna da estufa (b).

**Foto:** Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.



**Figura 10** - Moinho modelo TE-650 tipo Willey, vista frontal (a); vista interna (b)

**Foto:** Marcela Marques Freire, 2025.



**Figura 11** - Padrão de amostra após moagem (a); pote identificado para ser encaminhado para análise em laboratório (b).

**Foto:** Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.

Por fim, foi realizada a colheita da área e a avaliação final do experimento. Em 30/07/2024, foram coletadas amostras para a análise de acúmulo e partição de biomassa entre ponteiro, colmo e folha seca. Utilizando gabarito de um metro, foram coletados os dois lados da rua de cana, totalizando dois metros dentro de cada subparcela. As amostras foram pesadas

ainda no campo com uma balança portátil digital (balança de pesca), acoplada a um cabo de madeira e um recipiente para colocar as amostras. Após esse procedimento, feixes de três colmos e três ponteiros foram separados para serem triturados em forrageira, e uma quantidade de folhas secas colocadas em sacos de papel, identificadas e posteriormente trituradas. Todas as amostras foram pesadas para determinação do peso fresco, levadas para estufa de circulação de ar forçado por 96 horas, pesadas novamente para conhecer o peso seco e a partir disso estimar a fração de água dos tratamentos para ponteiro, colmo e folhas.

Nos dias seguintes (31/07/2024 e 01/08/2024), foi realizado o corte da área e avaliação da produtividade em toneladas de colmo por hectare (TCH). As duas linhas centrais de cada subparcela (8 metros) foram despalhadas, limpas, cortadas manualmente e separadas entre ponteiro e colmo. Os feixes com todos os colmos das duas linhas de cada subparcela (alto N e baixo N) foram pesados separadamente utilizando balança do tipo relógio com garra, acoplada a uma carregadeira de cana. Após a pesagem no campo, os feixes seguiram para as análises de qualidade.

As análises para determinação dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar foram conduzidas no laboratório da própria usina, seguindo as diretrizes estabelecidas no manual de instruções do conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e etanol do Estado de São Paulo (CONSECANA – SP, 2015). A quantificação da porcentagem de sacarose aparente (Pol) no caldo foi realizada utilizando o refratômetro digital Autopol 589 (Tecna Equipamentos para laboratórios), que possui correção automática de temperatura. Também foram avaliados percentual de fibra (Fibra%), açúcar total redutor (ATR) e percentual de pureza do caldo (Pza %).

A seguir algumas imagens representam as metodologias adotadas no momento de colheita do experimento.



**Figura 12** - Coleta e pesagem no campo, de dois metros de cada subparcela, das folhas secas (a); colmos (b); e exemplo do feixe de ponteiros (c).

**Fonte:** Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.



**Figura 13** - Procedimento de despalha dos colmos, com objetivo de não haver interferência na massa real de cada tratamento e da produtividade final.

**Fonte:** Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.



**Figura 14** - Modelo de balança digital portátil (balança de pesca) utilizada para as pesagens a campo, é possível observar no visor o peso de 390 g do recipiente que foi utilizado.

**Foto:** Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.



**Figura 15** - Feixes de três ponteiros com placa de identificação (a); feixe com três colmos com placa de identificação (b).  
Foto: Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.



**Figura 16** - Modelo da balança do tipo relógio utilizada para pesagem dos feixes inteiros de cada subparcela (esquerda); sistema completo utilizado para erguer os feixes e realizar a pesagem (direita).

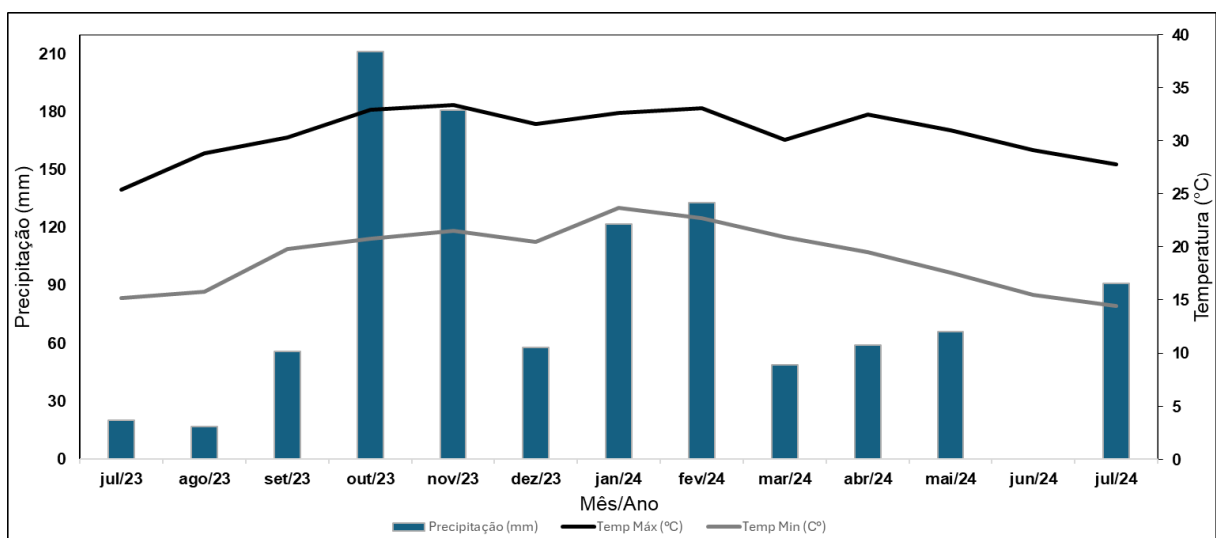
Foto: Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.



**Figura 17** - Sistema para a pesagem em funcionamento, sendo possível observar os colmos completamente limpos, sem a presença de palha (a); vista frontal do sistema completo (b).  
Foto: Eduardo Siqueira Dias Júnior, 2024.

### 3.5. Precipitação, temperatura máxima e mínima

Durante o experimento, os dados mensais de precipitação, temperatura máxima e mínima foram coletados da estação meteorológica da usina jacarezinho, localizada próxima a área experimental. A figura 18 a seguir demonstra esses dados.



**Figura 18** - Precipitação (mm), temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) mensal no período de julho de 2023 a julho de 2024  
Fonte: Usina Jacarezinho

### 3.6. Análise estatística

Todas as variáveis foram submetidas inicialmente a uma análise de variância (ANOVA), pelo teste F, por meio do software estatístico Rstudio (R Core team, 2003), para comparação entre os genótipos. Para acúmulo de biomassa, variáveis biométricas e teor N na planta, quando significativo ( $P < 0,05$ ), foi utilizado o teste a posteriori de Scott-Knott que possibilitou a comparação entre os genótipos e o teste T entre os dois níveis de N para o mesmo genótipo ( $p < 0,05$ ).

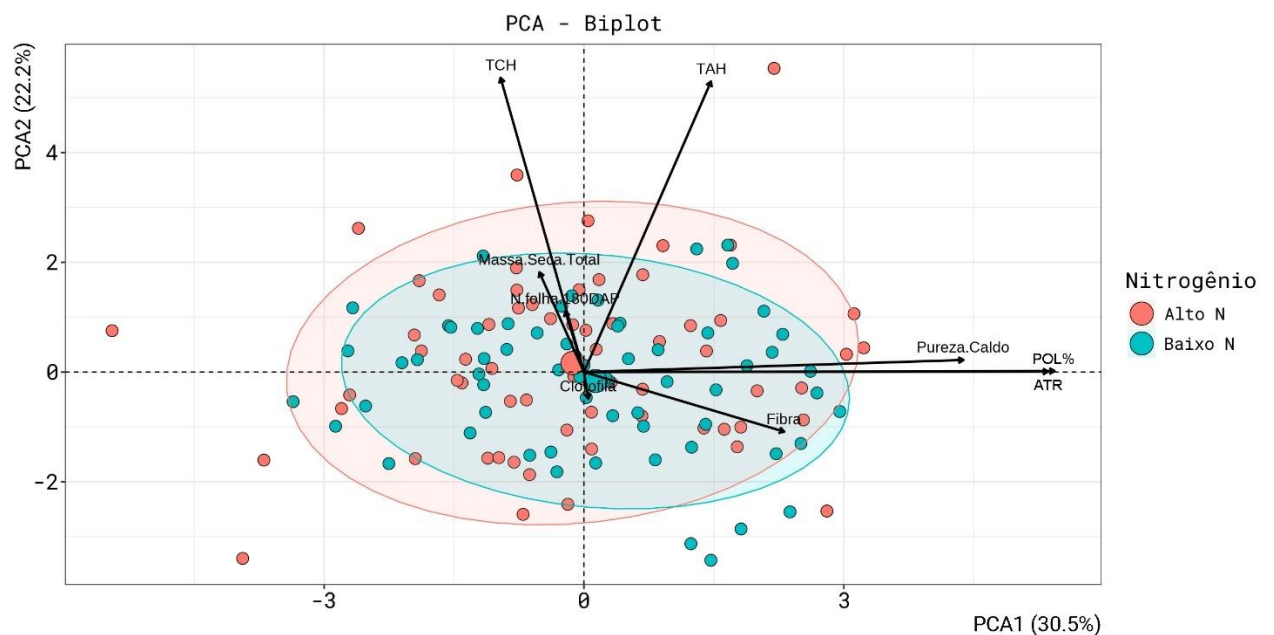
Também foi realizada a Análise de Componentes Principais (PCA), com o objetivo de avaliar o efeito das doses alta e baixa de N sobre o conjunto de variáveis analisadas no experimento. A análise foi conduzida no software RStudio, por meio do pacote FactoMineR, com as variáveis previamente padronizadas, a fim de eliminar a influência das diferentes unidades de medida e garantir uma comparação adequada entre os componentes.

Utilizando metodologia descrita em Robinson *et al.* (2007) a qual utiliza a média dos tratamentos de alto (eixo y) e baixo N (eixo x) para formar quadrantes quanto sua eficiência e resposta, de modo que quanto mais acima e a direita o genótipo estiver significa eficiente e responsivo, já quanto mais abaixo e a direita significa não eficiente e não responsivo. Essa metodologia permitiu a diferenciação dos materiais quanto a eficiência e a resposta a adubação com N em relação a massa seca total e produtividade pelo TCH.

## 4. RESULTADOS

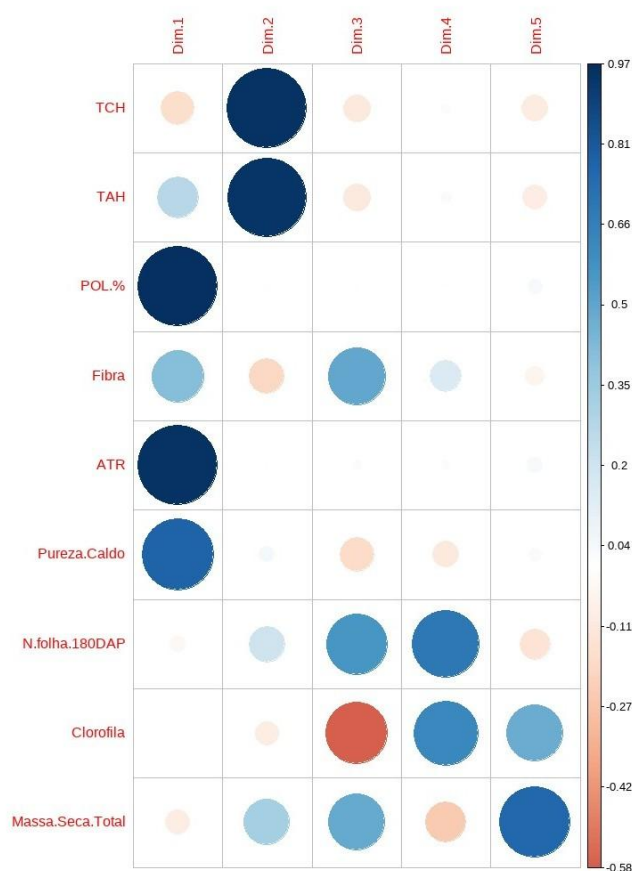
### 4.1. Análise de componentes principais em relação ao nitrogênio

As doses de N utilizadas nos tratamentos praticamente não geraram efeito significativo nos componentes avaliados no presente trabalho, sugerindo que nas condições experimentais empregadas todos os genótipos conseguiram absorver a quantidade mínima de N para desempenhar funções vitais nas plantas, outra forma de visualizar essa informação é de que não houve sinais de deficiência de N na área. A seguir, as Figuras 19 e 20 demonstram a análise de componentes principais (PCA) com todas as variáveis avaliadas durante o trabalho.



**Figura 19** - Gráfico da análise dos componentes principais de forma multivariada

\*PCA = Análise de componentes principais; Tratamentos com alto N = Círculos vermelhos; Tratamentos com baixo N = Círculos azuis ciano; TCH = Tonelada de colmos por hectare; TAH = Tonelada de açúcar por hectare; Massa seca total = Soma da massa seca de folhas, ponteiro e colmo; N folha aos 180 DAP = Nível de N nas folhas aos 180 dias após o plantio; Clorofila = índice de clorofila pelo clorofilo; Fibra = Percentual de fibra no colmo; Pureza do Caldo = percentual de pureza do caldo (POL / °BRIX); POL = Sacarose aparente do caldo em percentagem; ATR = Açúcar total redutor ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).



**Figura 20** - Gráfico de correlação das variáveis com os componentes principais

\*TCH = Tonelada de colmos por hectare; TAH = Tonelada de açúcar por hectare; Massa seca total = Soma da massa seca de folhas, ponteiro e colmo; N folha aos 180 DAP = Nível de N nas folhas aos 180 dias após o plantio; Clorofila = índice de clorofila pelo clorofilog; Fibra = Percentual de fibra no colmo; Pureza do Caldo = percentual de pureza do caldo (POL / °BRIX); POL = Sacarose aparente do caldo em percentagem; ATR = Açúcar total redutor ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

Conforme ilustrado na Figura 19, as variáveis que mais contribuíram para a explicação da variabilidade dos dados foram TCH, TAH, POL% e ATR, evidenciadas pelo maior comprimento de suas setas no gráfico. Em contraste, as demais variáveis apresentaram contribuição reduzida, com destaque para estimativa de clorofila, avaliada pelo clorofilog, que apresentou a menor influência sobre os componentes principais.

Ainda na mesma figura, verifica-se que os pontos representando as doses de N (indicados pelas cores vermelha e azul ciano) não exibiram um padrão de separação direcional, permanecendo distribuídos de forma aleatória ao longo do gráfico. Esse comportamento indica a ausência de efeito significativo do N sobre as variáveis avaliadas, o que é reforçado pela sobreposição dos círculos de concentração relativos às doses, evidenciando a inexistência de predominância de um grupo sobre uma região específica do espaço multivariado. Além disso,

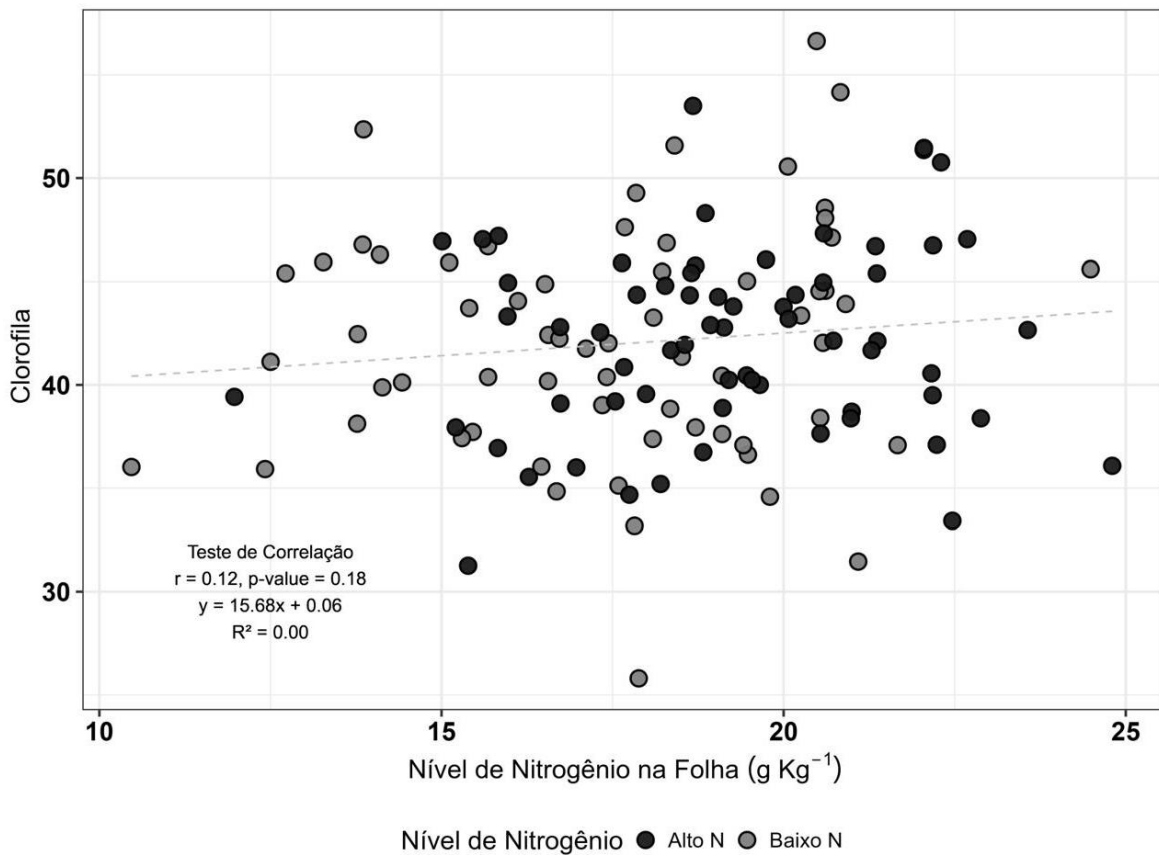
observa-se que os pontos de maior destaque gráfico, que indicam a tendência geral dos tratamentos, encontram-se praticamente sobrepostos no centro da representação, comprovando a ausência de distinção entre os níveis de N.

As Figuras 19 e 20 também permitem analisar a correlação entre as variáveis. Direções semelhantes entre as setas indicam correlação positiva, como observado entre TCH, TAH e massa seca total. Em outra dimensão, nota-se a forte associação entre pureza do caldo (PZA), POL% e ATR. Por outro lado, variáveis posicionadas em sentidos opostos ou perpendiculares, como clorofila e fibra (opostas a maioria das variáveis), demonstram ausência de correlação com os demais atributos.

A Figura 20 apresenta a distribuição das cinco dimensões que, em conjunto, explicam 100% da variância total dos dados. Dentre essas, as duas primeiras dimensões, representadas na Figura 19, são responsáveis por mais da metade dessa explicação. Através do gráfico de cores por dimensão (Figura 20), é possível visualizar de forma complementar as variáveis com maior contribuição e o grau de correlação entre elas, sendo que círculos maiores e de tonalidade azul mais intensa indicam maior importância e correlação, enquanto círculos menores e em vermelho claro refletem menor representatividade em cada dimensão.

#### **4.2. Nitrogênio na folha aos 180 dias após o plantio e estimativa do teor de clorofila**

Aos 180 dias após o plantio, não foi identificada correlação estatisticamente significativa entre o teor de clorofila nas folhas e o teor de N foliar, com base na análise de correlação de Pearson. A Figura 21 apresenta os valores obtidos para essa relação.

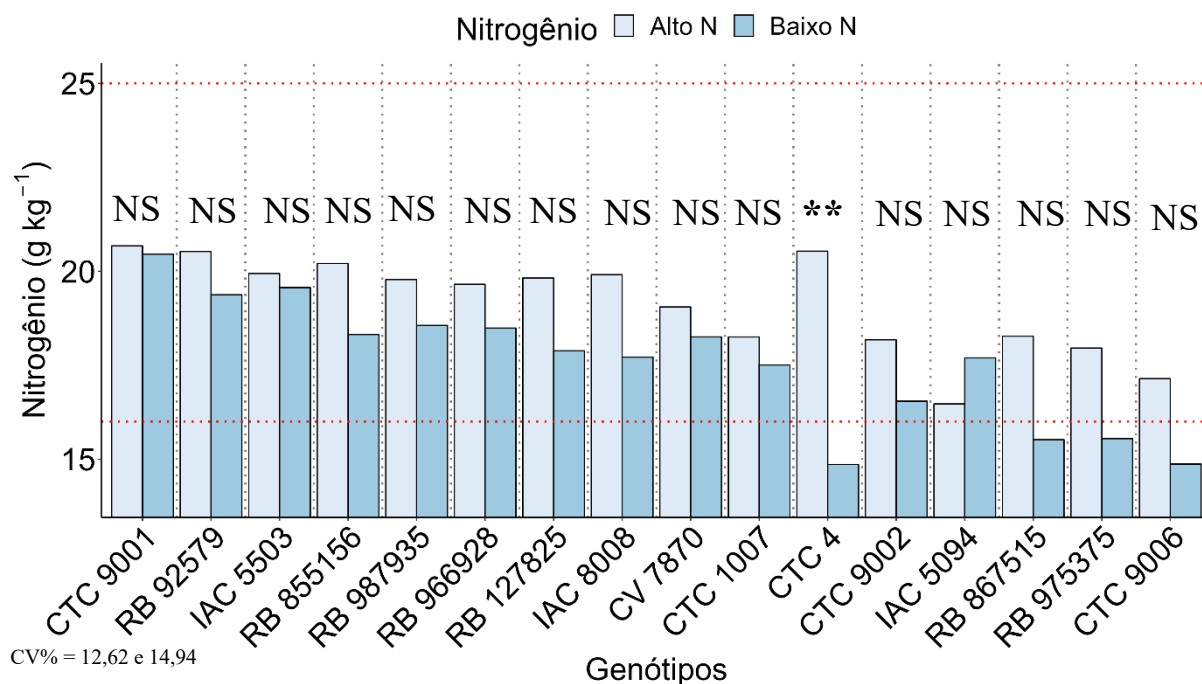


**Figura 21** - Gráfico da correlação de Pearson entre estimativa da Clorofila e o teor de N nas folhas aos 180 DAP ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

\*Cada ponto representa uma repetição/coleta de folha, separadas por nível de N (alto ou baixo). A correlação observada foi fraca ( $r = 0,12$ ) e não significativa ( $p = 0,18$ ), com baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,00$ ), indicando ausência de relação linear expressiva entre as variáveis analisadas.

Como ilustrado no gráfico, a correlação foi baixa ( $r = 0,12$ ), com dispersão acentuada dos pontos e pouca aderência à linha de tendência, o que evidencia a fraca associação linear entre o teor de clorofila e o conteúdo de N nas folhas nesse estágio de desenvolvimento.

A seguir, a Figura 20 demonstra o gráfico apenas do teor de N nas folhas durante o mesmo período de avaliação.



**Figura 22** - Gráfico do Teor de N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) aos 180 DAP em 16 genótipos de cana-de-açúcar sob doses alta e baixa de N.

\*coeficiente de variação (CV%) correspondentes às doses alta e baixa de N respectivamente, encontra-se indicado na figura. As médias dos tratamentos não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ), em ambas as doses de N. A diferença para os níveis de N no mesmo genótipo pelo teste T são indicadas como Não Significativo (NS) e significativo (\*\*). As linhas vermelhas tracejadas na horizontal indicam o nível adequado de N nas folhas, sendo o mínimo em  $16 \text{ g kg}^{-1}$  e o máximo em  $25 \text{ g kg}^{-1}$ .

Apesar de não terem sido identificadas diferenças estatísticas significativas, a Figura 22 mostra que o genótipo CTC 9001 teve um acúmulo levemente superior aos demais, chegando a  $20 \text{ g kg}^{-1}$  em ambas as condições (alto e baixo N). Também é possível observar que, de modo geral, os tratamentos com a dose alta de N tiveram um maior teor desse nutriente na folha, o que já era esperado devido à discrepância entre as doses. No entanto, o fato de esse acúmulo ser mínimo em relação a dose menor de N chama atenção. Apenas o genótipo CTC 4 teve uma diferença maior em relação às doses, sendo que, para os tratamentos com alto N, este foi o que obteve a segunda maior média de ( $20,53 \text{ g kg}^{-1}$ ), enquanto para o baixo N foi a pior média com ( $14,86 \text{ g kg}^{-1}$ ) e foi o único genótipo que apresentou diferença significativa pelo teste T entre os níveis de N.

Os genótipos CTC 4, CTC 9006, RB867515 e RB875375 apresentaram níveis de N foliar abaixo do índice mínimo recomendado ( $16 \text{ g kg}^{-1}$ ), apenas sob a condição de baixo N, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 22 pela linha vermelha. Nenhum genótipo atingiu o limite máximo considerado dentro da faixa recomendada ( $25 \text{ g kg}^{-1}$ ).

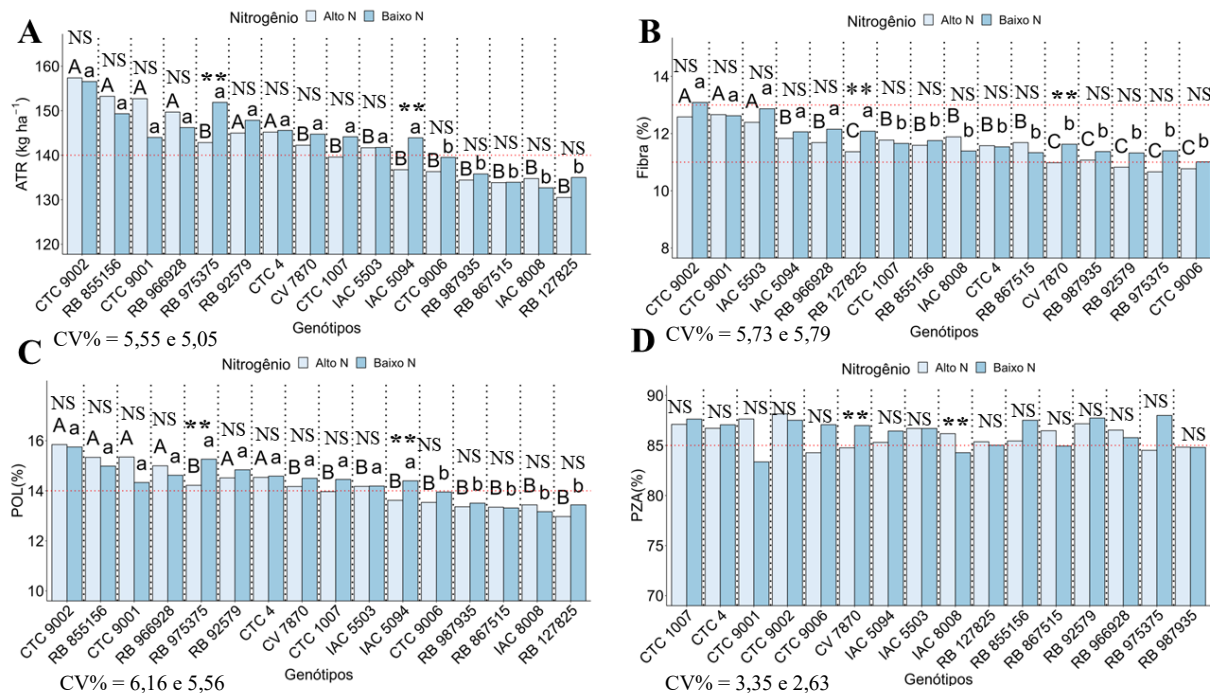
### 4.3. Desempenho tecnológico dos genótipos

Os parâmetros tecnológicos utilizados para avaliação da qualidade da cana-de-açúcar incluíram sacarose aparente (POL), pureza do caldo (PZA), açúcar total recuperável (ATR) e percentual de fibra, conforme recomendação da EMBRAPA (2022). A Tabela 5 apresenta as faixas de valores consideradas adequadas para esses indicadores. Os resultados obtidos para cada um dos parâmetros avaliados são apresentados na Figura 23.

**Tabela 5** - Indicadores de qualidade e valores recomendados para cana de açúcar

Indicadores	Valores Recomendados
POL	>14
Pureza (Pol/°Brix)	>85%
ATR	140 (kg t <sup>-1</sup> )
Fibra	11 a 13%

Fonte: Adaptado de Ripoli; Ripoli, (2009); EMBRAPA, (2022); Santos-Junior, (2023); Mattos (2024).



**Figura 23** - Gráficos desempenho tecnológico da cana-de-açúcar avaliados na usina jacarezinho.

\*Valores médios de 16 genótipos de cana-de-açúcar cultivados sob duas doses de N, sendo alta (180 kg ha<sup>-1</sup>) e baixa (9 kg ha<sup>-1</sup>). São apresentados: açúcares totais recuperáveis – ATR (kg t<sup>-1</sup>) (A); teor de fibra (%) (B); teor de sacarose aparente – POL (%) (C); e pureza aparente do caldo – PZA (%) (D). Os coeficientes de variação (CV%) correspondentes às doses alta e baixa de N respectivamente, encontram-se indicados em cada gráfico. Letras maiúsculas (Alto N) e minúsculas (Baixo N) iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ), em ambas as doses de N. Para o parâmetro PZA % não houve diferença estatística

entre os 16 genótipos em ambas as condições de N, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ). A diferença para os níveis de N no mesmo genótipo pelo teste T são indicadas como Não Significativo (NS) e significativo (\*\*). As linhas vermelhas tracejadas na horizontal indicam os valores recomendados para a cana-de-açúcar conforme da Tabela 5.

Conforme apresentado na Figura 23, os genótipos CTC 9001 e CTC 9002 destacaram-se positivamente em relação aos atributos de qualidade industrial da cana-de-açúcar, apresentando os maiores valores de ATR ( $\text{kg t}^{-1}$ ), POL (%) e pureza aparente do caldo (PZA%), tanto sob a condição de alta quanto de baixa disponibilidade de N. Por outro lado, os genótipos RB127825, RB867515, IAC 8008, RB975375 e RB987935 apresentaram desempenhos inferiores na maioria dos parâmetros avaliados, sendo considerados os destaques negativos.

Ao comparar os resultados obtidos com as faixas de referência descritas na Tabela 5, observa-se que o ATR foi considerado satisfatório para a maioria dos genótipos, com exceção dos materiais CTC 1007 e RB987935 na condição de alto N, e RB127825 e novamente RB987935 na condição de baixo N, cujos valores ficaram abaixo do mínimo recomendado.

Para o POL (%), apenas os genótipos IAC 8008, RB127825, RB855156 e RB987935 apresentaram valores inferiores ao valor de 14%, independentemente da dose de N, sendo que as diferenças entre alto e baixo N para este parâmetro foram mínimas.

Em relação ao percentual de fibra (%), os genótipos CTC 9006, RB92579 e RB975375, nas condições de alto N, apresentaram valores inferiores ao limite mínimo de 11%. Em baixa adubação nitrogenada, nenhum genótipo ficou abaixo desse valor, reforçando a pequena influência das doses de N sobre esse componente.

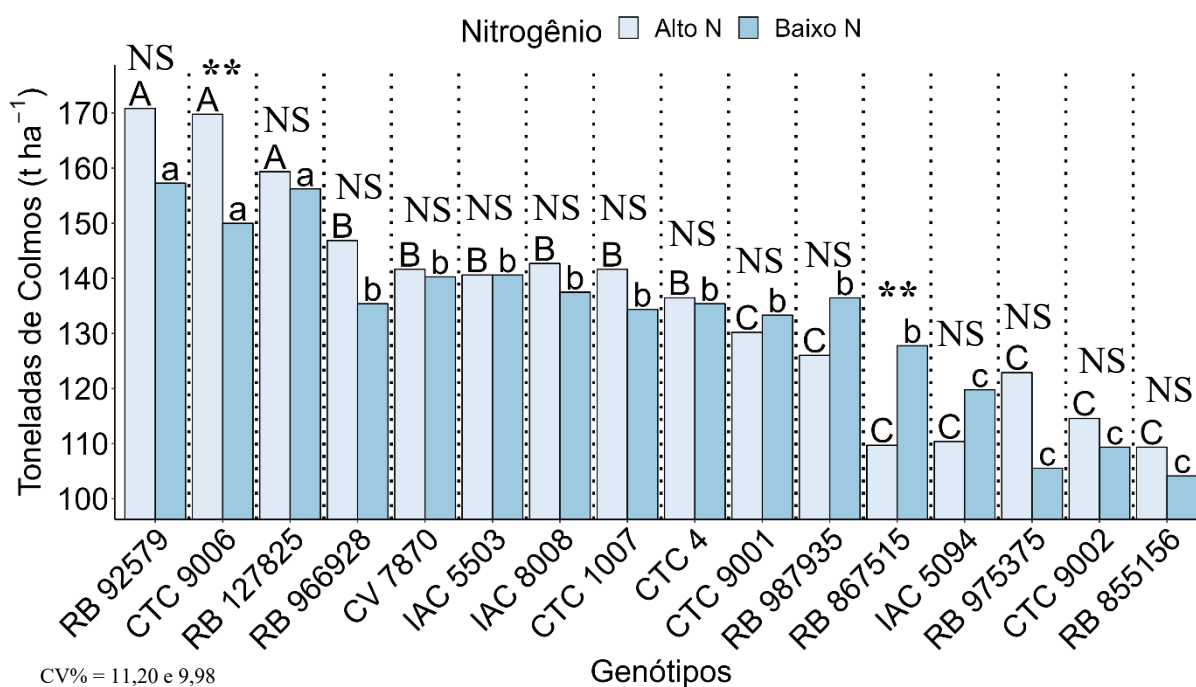
Quanto à pureza aparente do caldo (PZA%), observa-se que poucos genótipos apresentaram valores abaixo do mínimo recomendado de 85%. Em baixo N, destacaram-se negativamente os genótipos CTC 9001, IAC 8008, RB867515 e RB987935, enquanto, em alto N, os genótipos CTC 9006, CV 7870, RB975375 e novamente RB987935 apresentaram valores ligeiramente inferiores ao recomendado.

De maneira geral, ao comparar todos os componentes de qualidade do caldo avaliados para alto e baixo N, as diferenças foram inferiores a 1%.

#### **4.4. Produtividade de colmos TCH e açúcar TAH**

Os gráficos a seguir, ilustrados nas Figuras 24 e 25 apresentam os valores obtidos para produtividade da cana-de-açúcar, expressos em toneladas de colmo por hectare (TCH) e

toneladas de açúcar por hectare (TAH). Esses parâmetros foram utilizados como indicadores de desempenho, sendo as duas principais métricas de produtividade da cultura.



**Figura 24** - Gráfico da produtividade em toneladas de colmo ha<sup>-1</sup> (TCH) dos 16 genótipos de cana-de-açúcar submetidos às condições de baixa e alta dose de N

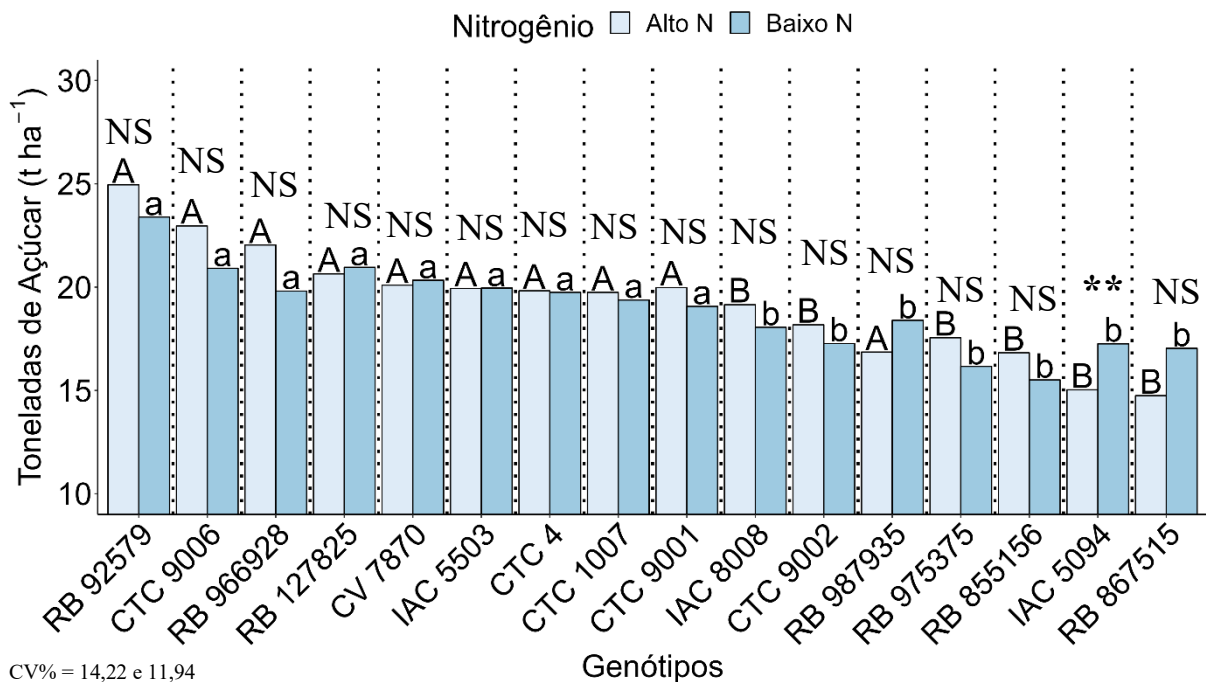
\* coeficiente de variação (CV%) correspondentes às doses alta e baixa de N respectivamente, encontra-se indicado na figura. Letras maiúsculas (Alto N) e minúsculas (Baixo N) iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ), em ambas as doses de N. A diferença para os níveis de N no mesmo genótipo pelo teste T são indicadas como Não Significativo (NS) e significativo (\*\*).

No gráfico de TCH, o genótipo RB92579 apresentou a maior produção de colmos, tanto sob alta disponibilidade de N (170,81 t ha<sup>-1</sup>) quanto sob baixa disponibilidade (157,27 t ha<sup>-1</sup>), demonstrando um elevado potencial produtivo, independentemente da quantidade de N fornecida durante o ciclo da cana-planta. Outros genótipos também se destacaram positivamente, como o RB127825, com 159,35 t ha<sup>-1</sup> sob alto N e 156,23 t ha<sup>-1</sup> sob baixo N, e o CTC 9006, que alcançou 169,77 t ha<sup>-1</sup> com alto N e 149,98 t ha<sup>-1</sup> com baixo N. Esses resultados indicam que tais genótipos podem ser eficientes e responsivos à adubação nitrogenada, mantendo altos níveis de produtividade mesmo sob condições menos favoráveis.

Por outro lado, os genótipos CTC 9002, IAC 5094, RB975375, RB855156 e RB867515 apresentaram os menores valores de TCH, sendo estatisticamente inferiores aos demais. A diferença entre esses materiais e os genótipos mais produtivos chegaram a aproximadamente 60 t ha<sup>-1</sup>, o que evidencia um desempenho agrônomo consideravelmente inferior. Em relação à média geral dos tratamentos com alto e baixo N, a diferença observada foi de apenas 3,1 t

ha<sup>-1</sup>, um valor relativamente pequeno, considerando que as doses aplicadas representaram 200% e 10% da recomendação para a área experimental.

Em relação à diferença pelo teste t, apenas os genótipos CTC 9006 e RB867515 apresentaram diferença significativa. O primeiro obteve rendimento superior sob o tratamento com alto N, enquanto o segundo apresentou cerca de 18 t ha<sup>-1</sup> a mais sob a condição de baixo N, em comparação ao alto N, diferença essa que foi a maior entre todos os genótipos.



**Figura 25** - Gráfico da produtividade dos 16 genótipos de cana-de-açúcar em toneladas de açúcar ha<sup>-1</sup> (TAH) submetidos às condições de baixa e alta dose de N

\*coeficiente de variação (CV%) correspondentes às doses alta e baixa de N respectivamente, encontra-se indicado na figura. Letras maiúsculas (Alto N) e minúsculas (Baixo N) iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ), em ambas as doses de N. A diferença para os níveis de N no mesmo genótipo pelo teste T são indicadas como Não Significativo (NS) e significativo (\*\*).

Outro componente essencial para compreender a real produtividade da cana-de-açúcar é o TAH, que representa a quantidade de açúcar produzida por hectare. Nesse parâmetro, os genótipos RB92579, RB966928, RB127825 e CTC 9006 também se destacaram como estatisticamente superiores aos demais, tanto sob condições de alto quanto de baixo fornecimento de N. Por outro lado, os genótipos RB867515, RB855156, RB987935, RB975375, e IAC 5094 apresentaram os menores valores de TAH, sendo estatisticamente

inferiores e com diferença de aproximadamente 10 t ha<sup>-1</sup> em relação aos materiais mais produtivos.

Um dado relevante foi a pequena diferença entre as médias gerais dos tratamentos com alto e baixo N, que ficou abaixo de 1 t ha<sup>-1</sup> (19,78 t ha<sup>-1</sup> para alto N e 19,22 t ha<sup>-1</sup> para baixo N). Esse resultado reforça a observação que outros fatores, como o potencial genético e as condições edafoclimáticas, podem ter exercido maior impacto sobre esse componente de produtividade.

Ao comparar as duas Figuras (24 e 25) é possível observar que praticamente os mesmos genótipos foram destaques tanto positivos, quanto negativos. Este padrão, confirma o que foi apontado anteriormente na Figura 19, indicando uma correlação positiva entre a produtividade agrícola (TCH) e a produtividade de açúcar (TAH), evidenciando que os genótipos com maior rendimento de biomassa também apresentaram maior acúmulo de açúcares por hectare.

#### 4.5. Acúmulo de massa seca compartimentalizada

A avaliação da massa seca foi realizada de forma compartimentalizada, considerando os compartimentos folha, ponteiro e colmo da planta. Os resultados obtidos para cada compartimento são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, respectivamente.

**Tabela 6** - Massa seca compartimentalizada de folha (t ha<sup>-1</sup>)

Genótipos	Massa seca de folhas sob alto N	Massa seca de folhas sob baixo N	Significância	p-valor
CTC 1007	10,04	8,56	NS	0,33
CTC 4	8,78	8,94	NS	0,86
CTC 9001	9,35	8,44	NS	0,46
CTC 9002	6,65	6,26	NS	0,81
CTC 9006	9,20	8,25	NS	0,50
CV 7870	8,61	8,46	NS	0,72
IAC 5094	9,05	8,22	NS	0,67
IAC 5503	10,40	10,00	NS	0,86
IAC 8008	7,08	10,08	**	0,05
RB127825	8,80	10,55	NS	0,11
RB855156	9,70	9,85	NS	0,94
RB867515	8,78	8,89	NS	0,96
RB92579	9,59	9,27	NS	0,70
RB966928	9,20	7,55	**	0,05

Continua

Conclusão				
Genótipos	Massa seca de folhas sob alto N	Massa seca de folhas sob baixo N	Significância	p-valor
RB975375	10,19	8,05	NS	0,14
RB987935	8,85	7,50	NS	0,14
<b>CV% = 19,79</b>				
		<b>CV = 23,26</b>		

\*Médias não diferiram estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ), em ambas as doses de N. Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor  $< 0,005$  indica que a diferença entre as médias é significativa.

**Tabela 7** - Massa seca compartimentalizada de ponteiro ( $t\ ha^{-1}$ )

Genótipos	Massa seca de ponteiros sob alto N	Massa seca de ponteiros sob baixo N	Significância	p-valor
CTC 1007	6,30	5,15	**	0,013
CTC 4	6,31	5,01	NS	0,15
CTC 9001	4,61	4,52	NS	0,91
CTC 9002	4,94	4,28	NS	0,41
CTC 9006	5,53	5,28	NS	0,88
CV 7870	5,69	4,79	NS	0,48
IAC 5094	5,61	4,27	NS	0,36
IAC 5503	5,54	5,35	NS	0,84
IAC 8008	4,49	5,05	NS	0,31
RB127825	6,40	6,35	NS	0,95
RB855156	6,31	5,56	NS	0,58
RB867515	5,91	6,46	NS	0,70
RB92579	6,67	6,20	NS	0,59
RB966928	5,52	4,49	**	0,035
RB 975375	5,14	4,09	NS	0,31
RB 987935	5,91	4,13	NS	0,13
<b>CV= 28,77</b>		<b>CV= 23,57</b>		

\*Médias não diferiram estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ), em ambas as doses de N. Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor  $< 0,005$  indica que a diferença entre as médias é significativa.

**Tabela 8** - Massa seca compartimentalizada de colmo ( $t\ ha^{-1}$ )

Genótipos	Massa seca de colmos sob alto N	Massa seca de colmos sob baixo N	Significância	p-valor
CTC 1007	50,47	42,27	NS	0,26
CTC 4	51,8	46,17	NS	0,52
CTC 9001	36,75	42,51	NS	0,55

Continua

Genótipos	Conclusão		Significância	p-valor
	Massa seca de colmos sob alto N	Massa seca de colmos sob baixo N		
CTC 9002	42,21	37,73	NS	0,6
CTC 9006	43,29	31,54	**	0,03
CV 7870	38,43	40,58	NS	0,81
IAC 5094	38,65	36,03	NS	0,84
IAC 5503	42,11	45,16	NS	0,81
IAC 8008	39,02	50,49	**	0,09
RB127825	54,87	66,71	NS	0,21
RB855156	53,41	52,65	NS	0,94
RB867515	60,73	49,76	NS	0,54
RB92579	51,51	49,8	NS	0,77
RB966928	44,28	39,5	NS	0,36
RB975375	40,91	31,61	NS	0,32
RB987935	40,86	34,01	NS	0,34
	<b>CV= 26,75</b>	<b>CV= 29,74</b>		

\*Médias não diferiram estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ), em ambas as doses de N. Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor  $< 0,005$  indica que a diferença entre as médias é significativa.

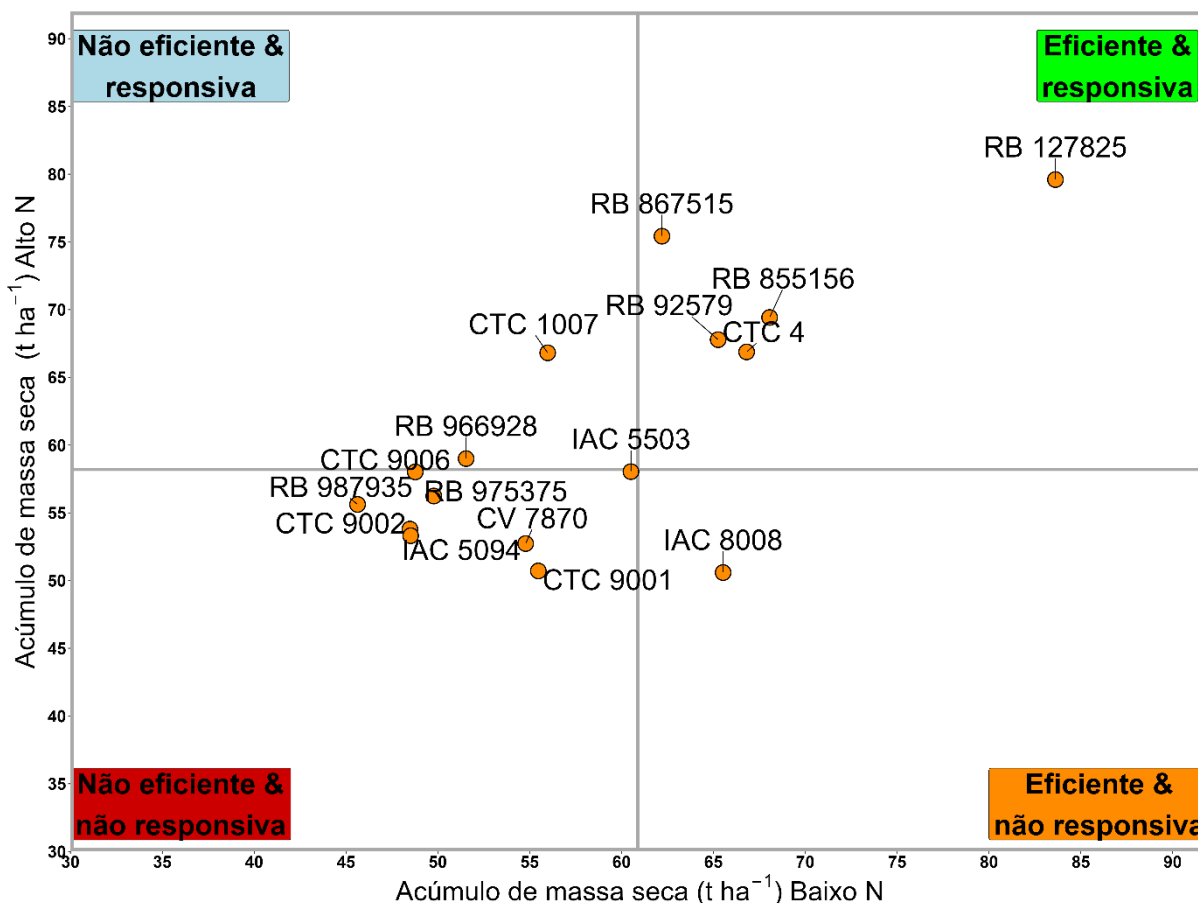
De modo geral, as avaliações de massa seca compartimentalizada apresentaram poucas diferenças significativas, tanto na comparação entre os genótipos quanto entre os tratamentos com alto e baixo fornecimento de N para um mesmo genótipo. Os destaques foram RB966928 o IAC 8008, que apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os níveis de N nas massas secas de folha e colmo, sendo os únicos materiais a demonstrar esse comportamento em mais de um compartimento avaliado.

Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas, o genótipo RB127825 obteve as maiores médias para os três compartimentos de massa seca analisados, com destaque para a produção de massa seca de colmo, que atingiu um valor de  $35,17 \text{ t ha}^{-1}$  superior ao do genótipo com pior desempenho sob a condição de alto N. De maneira geral, a diferença entre os tratamentos com alto e baixo N foi inferior a  $1 \text{ t ha}^{-1}$  para todos os compartimentos.

#### 4.6. Eficiência de utilização de nitrogênio em relação a massa seca e tonelada de colmo por hectare

A estimativa da eficiência do uso do N (EUN) foi realizada com base na razão entre a massa seca total da planta (folhas, ponteiro e colmo) e a quantidade de N aplicada. A Figura 26 apresenta os resultados da EUN em função da massa seca total, organizados em quadrantes

conforme a metodologia proposta por Robinson *et al.* (2007), que considera a eficiência e a resposta da cultura ao N.



**Figura 26** - Gráfico do acúmulo de massa seca total (t ha<sup>-1</sup>), com os 16 genótipos classificados em quatro quadrantes quanto sua eficiência e resposta ao N

\*azul (não eficiente e responsivo), verde (eficiente e responsivo), vermelho (não eficiente e não responsivo) e laranja (eficiente e não responsivo).

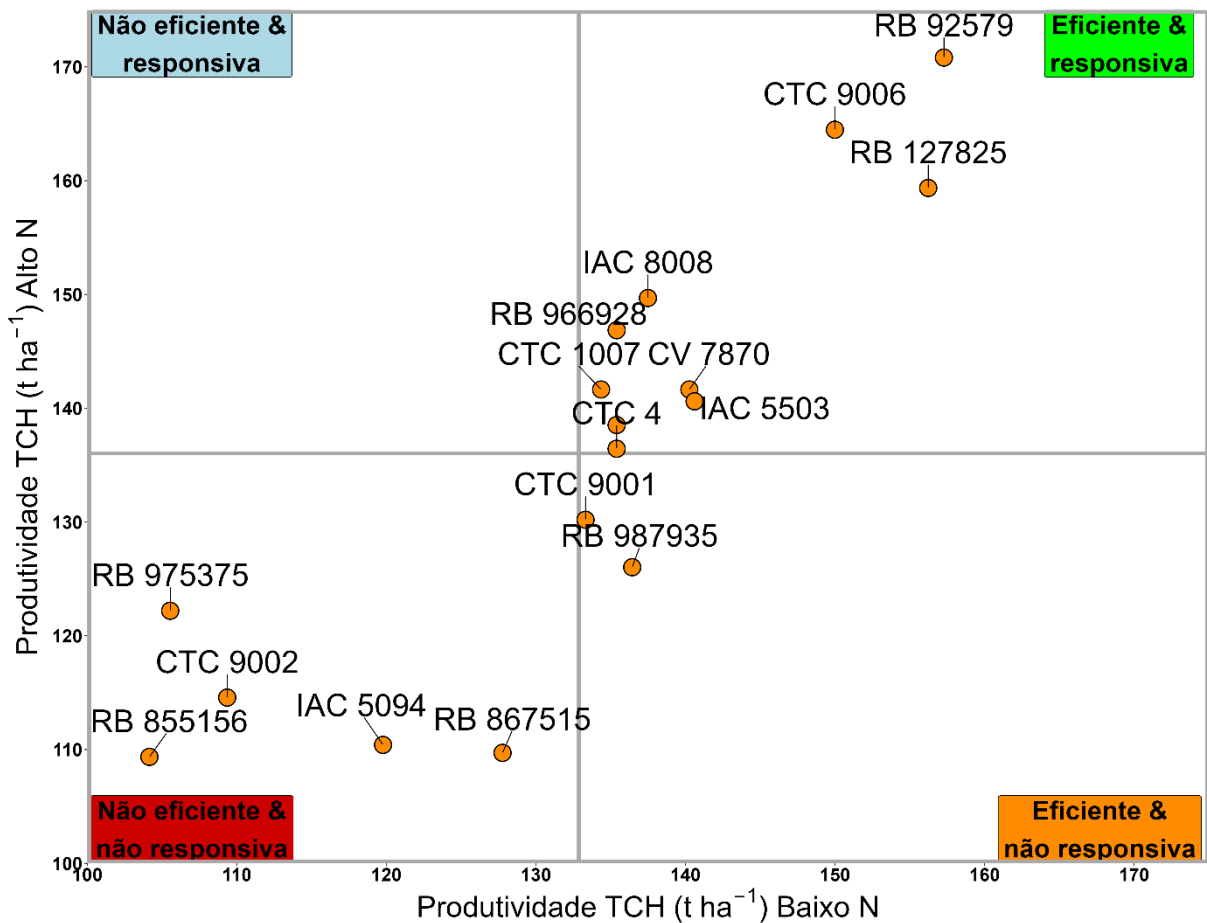
Os resultados apresentados na Figura 26 mostram que cinco genótipos foram classificados como eficiente e responsivo. Esses resultados indicam que os genótipos RB127825, RB867515, RB855156, RB92579 e CTC 4 tiveram eficiência em utilizar o N disponível na menor dose e também responderam em produção de massa seca com a maior dose testada. Já os genótipos CTC 1007 e RB966928 classificados como Não eficiente e responsivo (quadrante azul) indicam materiais que responderam a dose alta de N, mas não tiveram eficiência para a condição de baixo N.

Destaque para o genótipo IAC8008, único representante do quadrante eficiente e não responsivo, que demonstrou boa eficiência na absorção de N, mas não respondeu ao aumento das doses. Por outro lado, os genótipos CTC 9002, CTC 9001, CV 7870, IAC5094, RB987935,

RB975375, IAC5503 e CTC 9006 foram classificados como não eficientes e não responsivos, mostrando limitações tanto na absorção quanto na resposta ao incremento de N. O quadrante vermelho foi o que obteve mais representantes, indicando que para a cana-planta o potencial genético dos materiais foi mais relevante para a produção de massa seca do que a adubação nitrogenada propriamente. No entanto, é válido destacar que o material CTC 9006 ficou praticamente no limiar com o quadrante azul e o IAC 5503 ficou no limiar com o quadrante verde que seria o quadrante mais desejado.

De modo geral, os melhores genótipos estão no quadrante verde, pois conseguem se adaptar tanto a condições de baixa disponibilidade quanto ao acréscimo de N. Dentre eles, o RB127825 foi o principal destaque, atingindo  $79,29 \text{ t ha}^{-1}$  de massa seca total para as parcelas com baixo N, enquanto para alto N esse genótipo atingiu  $70,06 \text{ t ha}^{-1}$ . Já o IAC5094 foi considerado o pior genótipo para esse parâmetro, ficando com as menores médias entre todos os tratamentos:  $48,52 \text{ t ha}^{-1}$  para baixo N e  $53,31 \text{ t ha}^{-1}$  para alto N.

A Figura 27 a seguir apresenta os mesmos conceitos da anterior para o principal componente de produtividade, a tonelada de colmo por hectare (TCH) o qual abrange os conceitos de EUN, demonstrando o que de fato a planta teve capacidade de transformar produto industrializável, ou seja, colmo.



**Figura 27** - Gráfico da produtividade TCH ( $t\ ha^{-1}$ ), com os 16 genótipos classificados em quatro quadrantes quanto sua eficiência e resposta ao N

\*azul (não eficiente e responsivo), verde (eficiente e responsivo), vermelho (não eficiente e não responsivo).

Para a Figura 27, a maior distribuição dos genótipos ocorreu entre os quadrantes eficiente e responsivo (nove genótipos) e não eficiente e não responsivo (cinco genótipos). Os demais genótipos ficaram no quadrante eficiente e não responsivo (dois genótipos), enquanto nenhum foi classificado como não eficiente e responsivo. O TCH, principal métrica para medir a produtividade da cana-de-açúcar, demonstrou que boa parte dos materiais testados possui boa resposta e eficiência ao N, adaptando-se às condições testadas. No entanto, uma parcela significativa dos genótipos não conseguiu se adaptar, sendo classificada no pior quadrante (vermelho). Esses resultados demonstram que a maior parte dos genótipos testados apresentam grande potencial para serem classificados como eficientes e responsivos ao N.

O principal destaque foi o genótipo RB92579, que apresentou as maiores médias de produtividade nas duas condições:  $157,28\ t\ ha^{-1}$  em baixo N e  $170,82\ t\ ha^{-1}$  em alto N. Esse resultado foi mais de 50 toneladas superior ao do genótipo RB855156, que obteve as menores médias:  $104,16\ t\ ha^{-1}$  para baixo N e  $109,36\ t\ ha^{-1}$  para alto N. Esses resultados complementam

as informações da Figura 27, demonstrando quais genótipos conseguiram traduzir o acúmulo de matéria seca e a absorção de N em produção final.

Outro ponto relevante foi que, em 12 genótipos, os tratamentos com alto N tiveram uma produtividade maior em relação ao baixo N, principalmente para o CTC 9006, com uma diferença próxima de 15 toneladas, e RB92579, com a diferença de praticamente 14 toneladas. Os outros 10 genótipos apresentaram diferenças pequenas. Enquanto isso, apenas quatro genótipos tiveram o baixo N com produtividade superior ao alto N: RB987935, com 10,41 t ha<sup>-1</sup> de diferença; RB867515, que teve a maior diferença entre todos os tratamentos, com 18,06 t ha<sup>-1</sup>; CTC 9001, com uma diferença de 3,12 t ha<sup>-1</sup>; e IAC5094, que teve 9,37 t ha<sup>-1</sup> de diferença. Todos esses foram classificados como não responsivos.

Diante de todos os resultados para EUN expostos, o índice que melhor se encaixa ao conceito de EUN para a cana-de-açúcar é em relação à massa seca total (Figura 26). O esperado era que os genótipos tivessem uma distribuição nos quadrantes próxima aos resultados de Andrade (2023) e Kölln (2016), com uma boa distribuição entre todos os quadrantes; porém, não foi o que ocorreu.

Dessa forma a distribuição de EUN para o presente estudo segue a Figura 26 sendo:

- (-) Eficiente e (+) Responsiva (quadrante azul): 2 genótipos;
- (+) Eficiente e (+) Responsiva (quadrante verde): 5 genótipos;
- (-) Eficiente e (-) Responsiva (quadrante Vermelho): 8 genótipos;
- (+) Eficiente e (-) Responsiva (quadrante laranja): 1 genótipo.

## 5. DISCUSSÃO

Como observado nas Figuras 19 e 20, além das Tabelas 6; 7 e 8 a adubação nitrogenada gerou pouco ou nenhum efeito em todas as variáveis avaliadas neste trabalho. Essa baixa resposta ao N em campo reforça a importância de comparar os resultados aqui obtidos com estudos anteriores realizados em condições controladas. Este trabalho trouxe contribuições complementares, com resultados de campo, aos obtidos anteriormente em casa de vegetação por Kölln (2016) e Andrade (2023).

Os resultados aqui descritos apresentam semelhanças em alguns aspectos, mas divergem em outros em relação aos observados por esses autores. Enquanto Kölln (2016) relatou uma diferença de 2,2 vezes na produção de biomassa entre os melhores e os piores tratamentos de baixo N e 1,5 vezes para a dose alta de N, os primeiros resultados deste estudo em campo foram semelhantes, com 1,62 vezes para baixo N e 1,37 vezes para alto N. No entanto, a maior divergência entre os resultados foi em relação à diferença de massa seca: para o referido autor, essa diferença foi de 5 vezes na parte aérea, enquanto, no presente trabalho, essa diferença foi de apenas 1,06 vezes, indicando que as doses de N não tiveram um impacto significativo na produção de biomassa dos genótipos testados em condições de campo no ciclo de cana-planta.

Andrade (2023), também em condições controladas, chegou a diferenças pequenas na produção de biomassa da parte aérea para alto e baixo N, as quais são mais próximas às encontradas neste trabalho, devido a maior parte dos genótipos testados terem sido os mesmos que o autor trabalhou em casa de vegetação e neste estudo foram levados para o campo. Os resultados também divergem de Robinson *et al.* (2007), que encontraram uma diferença de produção de biomassa incluindo raiz entre as doses em torno de 4 vezes maior para alto N, em experimento realizado sob condições controladas, em casa de vegetação na Austrália.

Todos os autores citados, com trabalhos similares em casa de vegetação, destacaram que os resultados encontrados necessitavam de novos estudos em condições de campo. O presente trabalho, ao testar em condições de campo, não encontrou diferenças significativas na produção de biomassa com a dose mínima ou máxima de N avaliadas. Dessa forma, fica evidente que o comportamento da cana-de-açúcar no campo foi diferente das condições controladas.

Em ciclo de cana-planta, há uma grande incorporação de resíduos orgânicos provenientes na reforma do canavial, favorecendo a mineralização de nutrientes, além disso alguns nutrientes já estavam elevados no solo especialmente o P que também está ligado ao

crescimento das plantas. A boa saturação por bases (65%) pode ter favorecido a absorção do fertilizante nitrogenado e do N já presente no solo, diminuindo a diferença entre as doses aplicadas.

Esse fato pode ser confirmado especialmente porque as parcelas submetidas a doses baixas não apresentaram sintomas de deficiência de N ou tiveram seu crescimento limitado. Otto *et al.* (2009), ao testarem doses de N em cana-planta para dois tipos de solo diferentes (Latosolo Vermelho-Amarelo eutrófico e Latossolo Vermelho distrófico), também não observaram incrementos na massa seca da parte aérea no segundo tipo de solo. Os autores relataram que o tratamento com dose 0 kg ha<sup>-1</sup> atingiu um acúmulo de massa seca da parte aérea muito próximo aos tratamentos com 40 kg ha<sup>-1</sup>, 80 kg ha<sup>-1</sup> e 120 kg ha<sup>-1</sup> de N.

Corroborando essas observações, Franco *et al.* (2007), ao avaliarem o acúmulo de macronutrientes em área de reforma, relataram que os restos culturais anteriores continham 200 kg ha<sup>-1</sup> de N. No entanto a real absorção do N vindo exclusivamente de resíduos culturais acaba sendo baixa para cana-planta devido à alta relação C:N. Conforme relatado por Vitti *et al.* (2011) existe um aproveitamento desses resíduos que contribuem significativamente para a nutrição, mas não o suficiente para suprir a necessidade total da planta.

Além desses fatores, é importante considerar também a própria dinâmica de absorção de N pela cana-de-açúcar, que pode ajudar a explicar os resultados obtidos, essa dinâmica é objeto de estudo há décadas, especialmente em trabalhos voltados ao comportamento do N no solo, através de fertilizantes marcados, e à forma como a planta absorve esse nutriente.

Nesse sentido, Sampaio; Salcedo e Betany (1984) identificaram que a cana-planta, no ciclo de 16 meses, em solo arenoso, absorveu cerca de 250 kg ha<sup>-1</sup> de N e, através do uso de ureia marcada (<sup>15</sup>N), constataram que menos de 10% desse total foi proveniente do fertilizante aplicado. Eles ainda relataram que todos os tratamentos, incluindo a testemunha (sem aplicação de N) absorveram 50 kg ha<sup>-1</sup> durante os três primeiros meses do ciclo, e que todo esse N foi proveniente das reservas que o próprio solo disponibilizou (para a testemunha). Ainda no mesmo trabalho, outro fator que chamou a atenção dos autores foi o fato de que, nos tratamentos com 20 kg ha<sup>-1</sup> e 60 kg ha<sup>-1</sup>, as plantas absorveram parte do fertilizante e parte das reservas do solo neste mesmo período, sendo que as maiores quantidades, 86% e 60%, respectivamente, foram absorvidas do solo.

Esse e vários outros trabalhos apontam que de maneira geral, a cana-de-açúcar (seja planta ou soca) apresenta uma tendência a absorver prioritariamente o N já disponível no solo, proveniente da mineralização da matéria orgânica, da absorção de nitrato por raízes mais

profundas e da palha residual de ciclos anteriores, em relação ao N aplicado via fertilizantes. Uma vez que em todos os casos as quantidades relatadas de absorção são maiores que a quantidade de fertilizante aplicado (Trivelin; Rodrigues; Victoria, 1996; Oliveira, 1999; Ambrosano *et al.*, 2005 Oliveira *et al.*, 2011).

A exemplo disso, Robinson *et al.* (2008) ao levar o experimento com 13 genótipos para o campo e replicar as doses alta ( $140 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e baixa ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ), em solo desmatado que ficou aproximadamente cinco anos em pousio, não encontraram diferenças significativas entre essas doses para a maioria dos componentes avaliados durante o ciclo de cana-planta, os autores justificaram a ausência da diferença entre as doses devido a problemas com o sistema de irrigação utilizado no experimento. No entanto é possível relacionar com o presente trabalho e comprovar que a cana-de-açúcar, especialmente no primeiro ano tem uma grande preferência pelo N já disponível no solo ao invés do fertilizante

Outro fator que pode ter influenciado essa dinâmica foi a boa distribuição das chuvas ao longo do ciclo. Com exceção de outubro, nenhum mês apresentou precipitação superior a 200 mm. Esses aspectos podem ter contribuído para reduzir a perda de  $\text{NO}_3^-$  em profundidade. Salcedo e Sampaio (1984) explicam que a quantidade de água no solo está diretamente relacionada à lixiviação de nitrato em solos arenosos, ou seja, principalmente se houvesse grandes precipitações nos primeiros meses do ciclo uma grande quantidade de nitrato poderia ter sido perdida, fato que não ocorreu.

As informações descritas por todos esses autores ajudam a explicar o que pode ter ocorrido no solo do presente estudo, uma vez que não foram realizadas medições específicas para determinar se o N absorvido pelas plantas teve origem no fertilizante ou nas reservas do solo. Ainda assim, considerando o comportamento já amplamente relatado da cultura da cana-de-açúcar, associado às condições de solo e clima observadas na área experimental, é possível afirmar que grande parte do N absorvido pelas plantas teve como principal fonte o próprio solo, o que justifica a baixa resposta às doses aplicadas.

Em relação à produtividade do experimento, a principal métrica é o TCH, que apresentou uma diferença superior a 60 toneladas entre os tratamentos com alto e baixo N ao comparar o melhor e o pior genótipos encontrados. No entanto, ao analisar a média geral dos tratamentos para alto e baixo N, essa diferença foi de apenas  $3,12 \text{ t ha}^{-1}$  e não apresentou diferença significativa entre os níveis de N utilizados. Além da influência do N orgânico do solo e dos restos culturais, como mencionado anteriormente, há diversas afirmações na literatura de que a adubação nitrogenada não exerce um efeito significativo na produtividade

(TCH) em cana-planta quando o solo possui uma reserva de N suficiente para suprir a exigência da planta, o que explica essa pequena diferença entre as doses.

Outros estudos, principalmente em condições de cana queimada, como o de Cantarella e Raij (1985), que avaliaram 81 experimentos em todo o estado de São Paulo, encontraram um incremento na produção de colmos associado à aplicação de N em apenas 31 deles (aproximadamente 40%), sendo que a maioria desses casos apresentou pouco aumento mesmo com a queima da cana reduzindo a quantidade de resíduos orgânicos. Orlando-Filho *et al.* (1999) também não encontraram resposta significativa da aplicação de N na produtividade de cana-planta, mas relataram que o N aumentou o vigor das soqueiras, a produtividade e a longevidade do canavial. Outros trabalhos, como os de Resende *et al.* (2006), Xavier (2006) além de Prado e Pancelli (2008), também destacam o efeito positivo do N nas soqueiras seguintes, especialmente em sistema de cana-crua.

Sampaio e Salcedo (1984), destacam que a maior taxa de absorção de N pela cana-de-açúcar ocorre nos primeiros 20 cm de solo, onde se concentra cerca de 60% do sistema radicular. No entanto, quando necessário, as raízes podem atingir profundidades próximas a 100 cm, permitindo que a planta, durante o ciclo de cana-planta, utilize o N dessa camada (0–100 cm). Esse fato aumenta a demanda por adubação nitrogenada na soqueira seguinte e pode, em parte, explicar a ausência de respostas significativas em experimentos realizados no primeiro ano de plantio, contrastando com os resultados mais expressivos observados em ciclos de cana-soca. Apesar de envolver muitos fatores, a adubação nitrogenada tende a trazer incrementos pequenos em produtividade para cana-planta, sendo um pouco maiores em solos de textura arenosa e com colheita crua (Cantarella *et al.*, 2007; Schultz; Reis; Urquiaga, 2015).

A produtividade da cana-de-açúcar, medida pelo TCH, é um índice bem representativo para a EUN da cultura, uma vez que o maior acúmulo de biomassa e, conseqüentemente, de N no momento da colheita ocorre nos colmos. Franco (2008) concluiu que 50% do N total na planta no momento da colheita encontra-se nos colmos. No presente estudo, as características genéticas dos materiais testados se destacaram em termos de produtividade para cana-planta, o que explica por que o gráfico de EUN para TCH foi diferente dos estudos preliminares que avaliaram a massa seca total. Esses resultados mostram que a maioria dos genótipos testados conseguiram expressar uma forte tendência de serem eficientes e responsivos ao N, destacando a importância de os programas de melhoramento trabalharem para continuar melhorando a EUN dos materiais.

A análise conjunta do TCH e do TAH como observado nas figuras 24 e 25, ajuda a entender não apenas quanto a planta produziu em termos de massa, mas também o quanto dessa produção representa açúcar aproveitável pela indústria. Isso é importante porque nem sempre uma alta produção de colmos significa maior rendimento industrial.

A produtividade expressa em toneladas de açúcar por hectare (TAH t ha<sup>-1</sup>) apresentou uma correlação positiva (Figura 19) com o TCH, apontando que os materiais que tiveram maior produção de colmos, também converteram essa produção em açúcar. Para a dose baixa de N, a média geral foi de 19,22 t ha<sup>-1</sup>, enquanto para a dose alta foi de 19,78 t ha<sup>-1</sup>. No entanto, ao comparar as médias individuais dos genótipos, a diferença entre a maior e a menor média foi próxima de 5 t ha<sup>-1</sup> para ambas as condições. O genótipo RB92579 atingiu as maiores médias em ambas as situações, demonstrando ser eficiente e responsivo ao N, enquanto o RB855156 apresentou as piores médias e demonstra ser não eficiente e não responsiva. No entanto esse material por ser considerado super precoce, pode ter sido levemente prejudicado com a colheita sendo realizada em 30 de julho.

Esses resultados contrastam com os de Bologna-Campbell (2007), que observou um aumento de 50% na produção de açúcar na maior dose de N aplicada em relação à testemunha. A autora relacionou esse aumento à maior quantidade de colmos, mas essa relação pode variar de acordo com o genótipo. No estudo de Bologna-Campbell, foi testado apenas um material e em vasos de 200 litros, enquanto no presente trabalho foram avaliados 16 genótipos a campo, os quais apresentaram características distintas. O RB92579 destacou-se em ambos os parâmetros (TCH e TAH), corroborando os resultados da autora, mas outros genótipos não seguiram o mesmo padrão. Isso chama a atenção para a diferença na EUN entre os materiais e reforça a importância de considerar a esse fator em estudos com cana-de-açúcar.

Diante de todos esses fatores, o genótipo que obteve o maior destaque em relação a EUN em todos os índices avaliados foi RB92579, ficando no quadrante verde para todos os métodos e tendo a maior média para o alto N em todos os parâmetros voltados para EUN o colocando como eficiente e altamente responsivo ao N. O presente estudo corrobora com os anteriores (Robinson *et al.*, 2007; Kölln, 2016; Andrade, 2023) no sentido de que os genótipos testados a campo apresentam características diferentes em relação ao N, e esse deve ser um fator a se considerar no momento de posicionar os materiais a campo, sendo importante essa informação chegar aos produtores de cana-de-açúcar.

Além disso, é importante destacar que parte das diferenças observadas entre os genótipos pode estar relacionada a uma limitação natural na base genética das variedades

comerciais mais modernas de cana-de-açúcar. Um exemplo disso é o estudo de Whan *et al.* (2010), que foi o primeiro a mapear regiões do DNA (os chamados QTLs) associadas a características fisiológicas ligadas à eficiência de uso de N na cultura. Trabalhando com uma população de plantas resultante do cruzamento entre um genitor comercial australiano e um genitor ancestral, os autores perceberam que, nas condições de alta disponibilidade de N, a maior parte da variação genética para eficiência estava concentrada no genitor ancestral. Ou seja, as variedades comerciais avaliadas mostraram menos diversidade genética para responder ao N nesses níveis mais altos.

Os autores sugerem que isso pode ser consequência de anos de melhoramento genético voltado principalmente para produtividade e qualidade tecnológica, o que acabou deixando de lado características relacionadas à eficiência no uso de nutrientes. Esses resultados indicam que, para melhorar a EUN da cana-de-açúcar no futuro, será necessário que os programas de melhoramento (tanto na Austrália quanto no Brasil) passem a incluir esse critério na seleção de novos materiais, ampliando a variabilidade genética disponível para esse atributo e, dessa forma a adubação nitrogenada deixe de ser recomendada apenas com base em produtividade esperada.

Em outras culturas, como o milho, a diferença de EUN entre os genótipos é maior em condições de baixo N, enquanto em alto N não foram observadas diferenças significativas para a EUN (Hirel *et al.*, 2007; Coque; Gallais, 2007; Oliveira *et al.*, 2013). Esses resultados também ajudam a explicar as diferenças obtidas no presente trabalho de campo em comparação aos realizados em casa de vegetação, uma vez que, em campo, os resultados para o milho também apresentam respostas em ambas as condições. Por exemplo, Souza *et al.* (2008), testando 8 genótipos em campo, e Carvalho, Pinho e Davide (2011), avaliando a EUN em 10 genótipos de milho em campo, concluíram que os materiais respondem de maneira diferente ao N em condições de alto e baixo N, indicando que, em campo, os resultados podem ser diferentes dos encontrados em condições controladas.

Outras gramíneas como o trigo também apresentam diferenças em relação a EUN. Como demonstrado por Marinho, (2024) em experimento a campo, realizado em 4 regiões edafoclimáticas diferentes no Paraná. Campestrini *et al.* (2014) avaliando a EUN em 10 cultivares de arroz, também concluíram que respondem de maneira diferente ao N e que a maioria delas é eficiente e altamente responsiva ao N, tendo sido observados incrementos significativos em componentes produtivos do arroz em alt há diversas afirmações o N.

Para os atributos de qualidade tecnológica avaliados, os genótipos CTC 9001 e CTC 9002 obtiveram destaque para todos os itens, em alto e baixo N. No entanto, as diferenças entre

as doses altas e baixas foram mínimas (Figura 23), mostrando que o N não teve efeito sobre esses parâmetros e as diferenças obtidas dentro dos tratamentos (alto e baixo N) estão atreladas ao potencial genético das plantas. Esses dados corroboram com Costa *et al.* (2003) que também não encontraram diferenças nos parâmetros tecnológicos com diferentes doses de N, Trivelin *et al.* (2002) também não observaram efeito significativo do N nesses parâmetros.

No presente trabalho todos os parâmetros tecnológicos ficaram dentro das faixas recomendadas na Tabela 5, o ATR foi superior aos 140 kg t<sup>-1</sup> recomendados. Também foi observado um teor de fibra entre 11 e 12% o qual ficou dentro da faixa recomendada, e são valores próximos de outros trabalhos como Scarpari e Beuclair. (2008). Pereira. (2015) encontrou resultados próximos a esses para fibra, além do teor de pureza (PZA%) na faixa dos 88% próximos ao presente estudo que ficou com as médias próximas de 85%, com algumas diferenças para os autores citados devido a quantidade de genótipos diferentes. Portanto a EUN não teve relação com os parâmetros de qualidade de tecnológicas para a cana-de-açúcar no primeiro ano de ciclo.

A estimativa do teor de clorofila folhas, pode ser um bom indicativo do comportamento do N dentro da planta, uma vez que esse nutriente é um dos componentes estruturais da molécula de clorofila. No entanto, no presente estudo, não foi observada correlação significativa entre o teor de clorofila e o teor de N foliar aos 180 dias após o plantio, foi realizada devido a esse período representar o momento aproximado da inversão desse acúmulo da folha para o caule, em condições normais de campo (sem irrigação) conforme demonstrado por Coleti *et al.* (2006), Moura-Filho (2006) e Silva *et al.* (2008).

Já em condições de irrigação, essa inversão começa a ocorrer por volta dos 120 DAP (Oliveira *et al.*, 2011). No presente estudo, o teor de N aos 180 DAP não apresentou diferenças significativas entre alto e baixo N, indicando que essa é uma característica intrínseca da cana-de-açúcar de acumular N nas folhas enquanto os colmos ainda não estão desenvolvidos.

Apesar de não ter apresentado diferenças estatísticas, a CTC 9001 destacou-se tanto para alto quanto para baixo N, com aproximadamente 20 g kg<sup>-1</sup>, o que pode sugerir uma relação com os parâmetros tecnológicos, uma vez que esse genótipo foi o destaque em todos esses parâmetros tecnológicos. Por outro lado, a CTC 4, que obteve a segunda maior média para alto N, apresentou a pior média em baixo N, sendo o genótipo com a maior diferença entre as duas condições. Nesse caso, o alto N apresentou 5,67 g kg<sup>-1</sup> a mais que o baixo N.

No entanto, mesmo com a pequena diferença entre as doses, não foi observado uma forte correlação entre o acúmulo de N nas folhas e os níveis de clorofila pelo índice Clorofilog

(Figuras 19 e 21). Esse resultado pode ser explicado pelo período de avaliação, conforme comentado acima, por volta dos 180 DAP é o momento de maior conversão do N da folha para o caule (colmo).

Em avaliação similar, Moura-Filho *et al.* (2014), também não encontraram diferenças no teor de N na folha para 10 genótipos de cana em condições de campo. Os teores encontrados por esses autores aos 180 DAP foram, em média, 17,8 g kg<sup>-1</sup>, valores próximos aos observados no presente estudo. No entanto, Malavolta *et al.* (1997) recomendam que esses teores estejam na faixa de 20 a 22 g kg<sup>-1</sup>, o que também corrobora com os resultados obtidos neste trabalho.

Oliveira *et al.* (2011), em condições irrigadas, observaram um decréscimo linear de N na folha após os 100 dias, enquanto um acúmulo de N foi constatado no colmo durante o mesmo período, formando uma curva que atingiu seu máximo por volta dos 130 DAP. Corroborando esses achados, Salviano *et al.* (2017), em condições de campo com irrigação, constataram que cerca de 60 a 90% de todos os nutrientes da cana-de-açúcar são exportados durante a colheita, uma vez que o máximo acúmulo ocorre nos colmos. Robinson *et al.* (2008) também constataram que especialmente em condições de alta disponibilidade de N, esse excesso é armazenado como aminoácido no colmo e o aproveitamento é feito de forma lenta ao longo do ciclo, com diferença desse aproveitamento entre os genótipos. Esses autores também explicam que a NUE para cana-de-açúcar é prejudicada quando existe uma alta taxa de senescência nas folhas, sendo que quanto maior tempo elas permanecerem verdes o aproveitamento de N pode ser maior.

Outro fator que pode contribuir para a interpretação dos resultados gerais obtidos neste experimento é o ciclo dos genótipos, classificados em precoce, médio e tardio. Conforme descrito na metodologia, a colheita foi realizada em um único dia, o que favoreceu o desempenho máximo dos materiais de ciclo médio (CTC 9002, CTC 9006, CTC 1007, CTC 4, CV 7870, IAC 5503, IAC 8008, RB975375 e RB987935), que representaram a maioria dos genótipos avaliados. Os materiais de ciclo precoce foram: CTC 9001, IAC 5094, RB855156 e RB966928; enquanto os de ciclo tardio foram: RB127825, RB867515 e RB92579.

Por outro lado, os genótipos de ciclo precoce ou tardio podem ter sido prejudicados, especialmente em relação ao TAH, seja por ainda não terem atingido o pico de produção de açúcar, seja por já apresentarem início do processo de inversão da sacarose devido ao atraso na colheita. Ao completar o ciclo a planta de cana paralisa o crescimento e inicia o acúmulo de açúcares, processo esse que é feito entrenó por entrenó, ou seja, o entrenó mais velho acumula açúcar primeiro (Aude, 1993). Esse processo de formação do açúcar pode explicar o motivo de alguns genótipos terem sido beneficiados com o momento de colheita.

A época de colheita tem influência direta nos parâmetros de produtividade TCH, TAH e ATR. Marchiori (2004) ao testar diferentes épocas de colheita para três cultivares de cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta e 1º soca, concluiu que as diferentes épocas de corte afetaram os parâmetros de produtividade citados, obtendo os maiores valores com as colheitas no mês de setembro.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos achados relevantes deste estudo, algumas limitações devem ser consideradas. O experimento foi conduzido em um único ciclo produtivo (cana-planta) o qual conhecidamente demonstra pouca resposta a adubação nitrogenada. Além disso, a condução em uma única localidade limita a extrapolação dos resultados para outras regiões, sendo necessário validar os achados sob diferentes condições edafoclimáticas e de manejo. A colheita realizada em um único momento também pode ter comprometido a expressão do potencial de genótipos de ciclos precoce e tardio, especialmente em relação à formação e ao acúmulo de açúcares.

Dessa forma, estudos futuros deverão considerar avaliações em longo prazo, abrangendo múltiplos ambientes e ciclos produtivos (incluindo cana-soca), a fim de validar e ampliar a aplicabilidade dos resultados obtidos.

## 7. CONCLUSÕES

1. O genótipo RB 127825 foi o mais eficiente e responsivo, enquanto 50% dos genótipos foram não eficientes e não responsivos quanto a produção de massa seca total para a cana-de-açúcar nas condições do experimento no ciclo de cana-planta;
2. A dose alta (200%) de N não se diferiu significativamente da dose baixa (10%) em relação ao mesmo genótipo, reforçando o baixo efeito da adubação nitrogenada em cana-planta nas condições do experimento;
3. Os 16 genótipos testados apresentaram comportamento diferente para a EUN em relação a massa seca total e a produtividade pelo TCH;
4. O fator genótipo deve ser considerado para o melhor posicionamento dos materiais de cana-de-açúcar a campo, trazendo ganhos econômicos e de manejo sustentável;
5. O teor de N na folha aos 180 DAP não diferiu entre alto e baixo N, mostrando o mesmo comportamento de alto acúmulo na folha durante esse período;
6. Os parâmetros tecnológicos avaliados não tiveram interferência do N e os genótipos CTC 9001 e CTC 9002 se destacaram para todos os parâmetros tecnológicos em ambas as condições.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, A.L; SANTOS, J.M; BARBOSA, G.V.S; **Denominação de cultivares de cana-de-açúcar como suporte a documentação e utilização do germoplasma conservado.** Embrapa Tabuleiros Costeiros. 1º edição. Aracaju. Embrapa, 2015. 31 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042905/1/Doc196.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2025.
- AMBROSANO, E.J; TRIVELIN, P.C.O; CANTARELLA, H; AMBROSANO, G.M.B; SCHAMMASS, E.A; GUIRADO, N; ROSSI, F; MENDES, P.C.D; MURAOKA, T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. **Scientia agrícola**. Piracicaba. v.62 n.6. p. 534 – 542, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600004>
- ANDRADE, L. M. **Avaliação de eficiência e resposta ao nitrogênio em genótipos de cana-de-açúcar nos estágios iniciais de desenvolvimento.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2024.
- AUDE, M.I.S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria. v.23. n. 2. p. 241 – 248, 1993
- BARBOSA, P.S. **Procedimentos para caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar: estudos para otimização e padronização.** 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.
- BARROS, J.F.C. **Fertilidade do solo e Nutrição das plantas.** Évora: Universidade de Évora. p. 33, 2020. PDF.
- BHERING, S. B.; SANTOS, H. G.; BOGNOLA, I. A.; CURCIO, G. R.; CARVALHO JÚNIOR, W.; CHAGAS, C. S.; MANZATTO, C. V.; ÁGLIO, M. L. D.; SILVA, J. S. Mapa de solos do estado do Paraná: legenda atualizada. In: **XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo.** Embrapa, 2009.
- BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta.** Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. 2007.
- BRIGANTE, J; ESPÍNDOLA, E.G; **Limnologia fluvial: um estudo no rio Mogi-Guaçu.** São Carlos, Editora: Rima. 2004, p. 1 – 430. PDF
- CAMPESTRINI, R; PRATES, R.G; SOUSA, S.A; OLIVEIRA, T.C; SILVA, J; FIDELIS, R.R. Eficiência de genótipos de arroz no uso de nitrogênio em solos de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana.** Recife. v. 19. n. 1. p. 25 – 32, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.12661/pap.2014.005>
- CANTARELLA, H; JORIS, H.A.W; SAARES, J.R; VARGAS, V.P; MONTEZANO, Z.F. Uso eficiente de fertilizantes na nutrição de plantas. IN: PRADO, R.M. (ed). **Nutrição de plantas. Diagnose foliar em frutíferas.** Joticabal. FCAV. 579 p, 2012

CANTARELLA, H; RAIJ, B. Adubação nitrogenada no estado de São Paulo. In: **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus: Sociedade Brasileira de Ciência do solo. p. 47 – 49, 1985. PDF.

CARVALHO, J.L.N; OLIVEIRA, B.G; CANTARELLA, H; CHAGAS, M.F; GONZAGA, L.C; LOURENÇO, K.S; BORDONAL, O.R; BONOMI, A. Implications of regional N<sub>2</sub>O-N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 149. p. 111423. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111423>

CARVALHO, N. L.; ZABOT, V. Nitrogênio: Nutriente ou poluente? **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e tecnologia Ambiental**. Santa Maria. v. 6. n. 6. p. 960–974, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5902/223611704671>

CARVALHO, R.P; PINHO, R.G.V; DAVIDE, L.M.C. Desempenho de cultivares de milho quanto à eficiência de utilização de nitrogênio. **Revista Brasileira de milho e Sorgo**. v. 10. n. 2. p. 108 – 120. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v10n2p108-120>

CHAI, R; YE,X; MA,C. WANG,Q. TU, R; ZHANG, L; GAO, H. Greenhouse gas emissions from synthetic nitrogen manufacture and fertilization for main upland crops in China. **Carbon Balance Management**. P. 14 – 20. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0133-9>

COLETI, J.T; CASAGRANDE, J.C; STUPIELLO, J.P; RIBEIRO, L.D; OLIVEIRA, G.R. Remoção de macronutrientes pela cana-planta e cana-soca, em argissolos, variedades RB 835486 e SP81-3250. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**. v.24. p. 32 – 36. 2006.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTCIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília,DF, v. 12, n. 3 novembro 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 13 de mar. 2025.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Produção de cana-de-açúcar é estimada em 689.8 milhões de toneladas na safra 2024/2025**. Brasília -DF. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5685-producao-de-cana-de-acucar-e-estimada-em-689-8-milhoes-de-toneladas-na-safra-2024-2025>. Acesso em: 05. Mar. 2025.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento**, 2020. Brasília: Conab, 2020. 58p.

CONGREVES, K.A; OTCHERE, O; FERLAND, D; FARZADFAR, S; WILLIAMS, S; ARCAND, M.M; Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. **Frontiers in Plant Science**. v. 12. 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.637108

**Conhecendo os solos das mesorregiões Norte Central e Norte Pioneiro do Paraná :Abordagem para educadores do ensino fundamental e médio**. livro eletrônico 1. ed. Cornélio Procópio, PR: NEPAR-SBCS, 2024;

CONSECANA - SP. Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e etanol do estado de São Paulo. **Manual de instruções**. 6.ed. Piracicaba: Ed. Eletrônica, 2015. 80 p.

COQUE, M.; GALLAIS, A. Genetic variation for nitrogen remobilization and postsilking nitrogen uptake in maize recombinant inbred lines: Heritabilities and correlations amongtraits.

**Crop Science**, v. 47, n. 5, p. 1787-1796, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.02.0096>

COSTA, M.C.G; VITTI, G.C; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH<sub>3</sub> de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de ciência do Solo**. Viçosa. v. 27. p. 631 – 637. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400007>

CRAWFORD, N.M; FORDE, B.G. **Molecular and developmental biology of inorganic nitrogen nutrition. Arabidopsis**. v. 1. p. e0011. 2002. DOI: 10.1199/tab.0011

DANIELS, J; ROACH, B.T. Taxonomy and Evolution. *IN*: HEINZ, D.J. **Sugarcane improvement through breeding**. Volume 11. Amsterdam. Elsevier, 1987. p. 7 – 84.

DAWAR, K; KHAN, A; SARDAR,K; FAHAD, S; SAUD, S; RAHUL, D; DANISH, S. Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and mulch on N<sub>2</sub>O emission and fertilizer use efficiency using <sup>15</sup>N tracing techniques. **Science of the Total Environment**. v. 757. p. 143739. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143739>

DEGASPARI, I.A.M; SOARES, J.R; MONTEZANO, Z.F; DEL GROSSO, S.J; VITTI, A.C; ROSSETTO, R; CANTARELLA, H. Nitrogen sources and application rates affect emissions of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. v. 116. n. 3. p. 329 – 344. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10045-w>.

DOBERMANN, A., 2007. Nutrient use efficiency—measurement and management. In: Krauss, A., Isherwood, K., Heffer, P. (Eds.), **Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for Their Adoption and Voluntary Initiatives Versus Regulations**. International Fertilizer Industry Association, Paris, France, p.1–28. PDF.

EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL. **Qualidade de matéria-prima**. Campinas, SP. 2022. Disponível em: [https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacaotecnologica/cultivos/cana/pos-producao/gestao-industrial/qualidade-de-materiaprima#:~:text=ATR%20\(Açúcares%20Redutores%20Totais\):,13%20a%2017%2C5%25](https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacaotecnologica/cultivos/cana/pos-producao/gestao-industrial/qualidade-de-materiaprima#:~:text=ATR%20(Açúcares%20Redutores%20Totais):,13%20a%2017%2C5%25). Acesso em: 15. Mar. 2025

EMBRAPA. **Neossolo Quartzarênico**. Brasília, DF: Embrapa, (2021). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos/neossolo-quartzarenicos>. Acesso em: 8 maio. 2025

ERISMAN, J.W; LEACH, A; BLEEKER, A; ATWELL, B; CATTANEO, L; GALLOWAY, J. Na integrated approach to a nitrogen use efficiency (NUE) indicator for the food production-consumption chain. **Sustainability**. v. 10. p. 1 – 29. 2018. DOI: 10.3390/su10040925

ESTEVEES, F.A. **Fundamentos da limnologia**. 3º ed. Rio de Janeiro. Interciência. 2011. p. 826. PDF.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 560 p. ISBN 978-1-4398-1695-0. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479711000263>

FAO. **Crop yield response to water**. Italy: FAO, 2012.

FAOSTAT, **Food and Agricultural commodities production: commodities by regions**. 2013.

FRANCO, H.C.J; BOLOGNA, I.R; FARONI, C.E; VITTI, A.C; TRIVELIN, P.C.O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**. Campinas. v. 66. n. 4. p. 699 – 647. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400017>

FRANCO, H.C.J; TRIVELIN, P.C.O; FARONI, C.E; VITTI, A.C; OTTO, R. Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. Viçosa. v. 32. n. esp. p. 2763 – 2770. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700021>

FRANCO, Henrique Coutinho Junqueira. **Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada de cana-planta**. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. 2008.

FRANCO, J.A.M; NETO, A.F. Produção de fertilizantes nitrogenados e suprimento de matéria-prima. p. 73 - 107. *IN*: YAMADA; T. STIPP, S.R; VITTI. A.G.C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. International Plant Nutrition Institute. Piracicaba. 2007.

FREITAS, S.E. **Lixiviação de nitrato em colunas de solo afetada por textura, doses de nitrogênio e lâmina de água adicionada**. 2020. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu.

GADELHA, J.E.F.S; FERREIRA, K.F; MARCIONÍLIO, S.M.L.O; CASTRO, R.M. Consequência da eutrofização em corpos hídricos. **Revista Multidisciplinar do nordeste mineiro**. v.3. acesso em: 10 de mar de 2025  
<https://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/908>

GALLOWAY, J. N; LEACH A.M; ERISMAN J.W; BLEEKER, A. A nitrogen: the historical progression from ignorance to knowledge, with a view to future solutions. **Soil Research**. v. 55. n. 6. p. 417-424, 2017; DOI: [doi.org/10.1071/SR16334](https://doi.org/10.1071/SR16334). Acesso em: 03 mar. 2025.

HIREL, B; LE-GOUIS, J; NEY, B; GALLAIS, A. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. **Journal of Experimental Botany**, Oxford. v. 58. p. 2369 – 2387. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erm097>

[http://www.ipardes.gov.br/pdf/mapas/base\\_fisica/mesorregioes\\_geograficas\\_parana.pdf](http://www.ipardes.gov.br/pdf/mapas/base_fisica/mesorregioes_geograficas_parana.pdf) (acessado em 26/02/2025); IBGE (2004).

IFA - International Fertilizer Association. **O que são fertilizantes?** 2025. Disponível em: <https://www.fertilizer.org/about-fertilizers/what-are-fertilizers/>. Acesso em 06. Mar. 2025

INMAN-BAMBER, N.G; MCGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurement. **Field Crops Research**, Amsterdam. v. 83, n. 2, p. 125 – 138. 2003. DOI: [10.1016/S0378-4290\(03\)00069-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00069-8).

IAP - Instituto Ambiental do Paraná. **Plano de manejo do Refúgio de Vida Silvestre de Jacarezinho**: Instituto Ambiental do Paraná, 2006.

SANTOS - JÚNIOR, A. A. **Avaliação da qualidade tecnológica e da biomassa gerada pela cana-de-açúcar em função de suas impurezas vegetais**. 2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2023

KAZIMIERCZUK, K; BARROWS, S.E; OLARTE, M.V; QAFOKU, N.P. Decarbonization of agriculture: the greenhouse gas impacts and economics of existing and emerging climate-smart practices. **ACS engineering, Austria**. v. 6. n. 3. p. 426 – 442. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acseengineeringau.3c00031>

KÖLLN, O.T. **Eficiência de uso de nitrogênio pela cana-de-açúcar: diferenças genotípicas, preferência por amônio e N<sub>2</sub>O**. 2016. 119 f. Tese (Doutorado em fertilidade do solo e nutrição de plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2016.

KROL, D.J; FORRESTAL, P.J; WALL, D; LANIGAN, G.J; SANZ-GOMEZ, J; RICHARDS, K.G. Nitrogen fertilizers with urease inhibitors reduce nitrous oxide and ammonia losses, while retaining yield in temperate grassland. **Science of the Total Environment**. v. 725. p. 138329. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138329>

MA, R; ZOU, J; HAN, Z; YU, K; WU, S; LI, Z; LIU, S; NIU, S; HORWATH, W.R; ZHU-BARKER, X. Global soil-derived ammonia emissions from agricultural nitrogen fertilizer application: A refinement base on regional and crop-specific emissions factors. **Global Change Biology**, Oxford. v. 27 n. 4. p. 855 – 867. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15437>

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Editora Agronômica Ceres Ltda, São Paulo, 1º ed. 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: ABPPF, 1997. 319p. PDF

MALAVOLTA, E; MORAES, F.M. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. p. 189 - 228. *In*: YAMADA; T. STIPP, S.R; VITTI. A.G.C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. International Plant Nutrition Institute. Piracicaba. 2007.

MARCHIORI, L. F. S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. 2004.

MARIN, F.R; PELLEGRINO, G.Q; ASSAD. E.D; PINTO. H.S; ZULLO-JUNIOR.J., Cana-de-açúcar *IN*: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. 1º edição. Brasília. INMET. 2009. p. 530.

MARINHO, J. L. **Adubação nitrogenada e densidade de semeadura no desempenho produtivo, qualidade de sementes e tecnológica de grãos de genótipos de trigo**. Tese

(Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. 2024.

MARTINEZ-FERIA, R.A; CASTELLANO, M.J; DIETZEL, R.N; HELMERS, M.J; LIEBMAN, M; HUBER, I. Linking crop-and soil-based approaches to evaluate system nitrogen-use efficiency and tradeoffs. **Agriculture, Ecosystems & environment**. v. 256. p. 131 – 143. Doi: 10.1016/j.agee.2018.01.002

MATTOS, A.J.N. **Desmistificando o Consecana**. SSRN. Universidade de São Paulo (USP). Ribeirão Preto – SP. p. 24. 2024.

MOHAJAN, H.K. Acid rain is a local environment pollution but a global concern. **Open Science Journal of Analytical Chemistry**. v.3 p. 47 – 55. 2018. DOI: <https://mpr.ub.uni-muenchen.de/91622/>

MOLL; R. H; KAMPRATH, E. J; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**. v.74, p.562–564. 1982. DOI: 10.2134/agronj1982.00021962007400030037x

MOURA, I; PAULETA, S.R; CAREPO, M.S.P; CORDAS, C.M; MAIA, L.B; 1MOURA, J.J.G. Elogio da Desnitrificação. **Química**, v. 47. n. 171. p. 271 – 278. 2023. Disponível em : <https://abrir.link/RDvjp>. Acesso em : 10 de mar. 2025

MOURA-FILHO, G; ALMEIDA, A; SILVA, L; SOUZA, J; TEODORO, I; BARBOSA, G. (2006). Crescimento e absorção de nutrientes em quatro variedades de cana-de-açúcar. **Seminário Alagoano sobre Variedades de Cana-de-açúcar**, 16.

MOURA-FILHO,G; ALBUQUERQUE, A.W; MOURA, A.B; SANTOS, A.C.I; OLIVEIRA-FILHO, M.S; SILVA; L.C. Diagnose nutricional de variedades de cana-de-açúcar em argissolos. **Agriambi**. Campina Grande. PB. v.18. n.11. p. 1102 – 1109. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1102-1109>

NOVOA, R; LOOMIS, R. S. Nitrogen and plant production. **Plant Soil** v.58 p.177-204. 1981. DOI: 10.1007/BF02180053

OLIEIRA, L.R; MIRANDA, G.V; LIMA, R.O; FRITSCHÉ-NETO, R; GALVÃO, J.C.C. Eficiência na absorção e utilização de nitrogênio e atividade enzimática em genótipos de milho. **Revista Ciência Agrônômica**. v. 44. n. 3 p. 614 – 621. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000300025>

OLIVEIRA, E.C.A; FREIRE, F.J; OLIVEIRA, R.I; OLIVEIRA, A.C; FREIRE, M.B.G. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista ciência agrônômica**. v. 42. n. 3. p. 579-588. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300002>

OLIVEIRA, M.W. **Dinâmica do nitrogênio da uréia (15N), no sistema solocana-de-açúcar com e sem queima da palhada**. Tese (Doutorado em fertilidade do solo e nutrição de plantas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. 1999.

ORLANDO FILHO, J. RODELLA, A.A; BELTRAME, J.A; LAVORONTI, N.A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB - Açúcar, Álcool e**

**Subprodutos**, v. 17, n. 4, p. 39-41, 1999. Tradução. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001029053> Acesso em: 17 mar. 2025.

OTTO, R; FRANCO, H.C.J; FARONI, C.R; VITTI, A.C; TRIVELIN, C.O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília**. v. 44. n. 4. p. 398 – 405. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000400010>

OTTO, R; MULVANEY, R.L; KHAN, S.A; TRIVELIN, P.C.O. Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. **Biol Fertil Soils**. v. 49. p. 893 – 904. 2013. DOI: [10.1007/s00374-013-0787-5](https://doi.org/10.1007/s00374-013-0787-5)

PEREIRA, Greice Leal. **Transformação do nitrogênio no solo e a resposta da cana-planta à adubação nitrogenada em função da rotação com crotalária**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2015.

PINTO, L. A. S. R.; BEUTLER, S. J.; ASSUNÇÃO, S. A.; ROSSI, C. Q. GUARESCHI, R.F.; ZANDONÁ, S. R.; SANTOS, O. A. Q. Extração e quantificação das frações de fósforo orgânico no solo. **Brazilian Journal of Development**. v. 6. n. 6. p. 34268 – 34278. 2020. DOI: [10.34117/bjdv6n6-102](https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-102).

PIPERIDIS, N; PIPERIDIS, G; HONT, D. Molecular cytogenetics. *IN*: HENRY, R.L; KOLE, C. **Genetics, genomics and breeding of sugarcane**. 1º edição. Nova Iorque. Science Publishers. 2010. p. 9 – 18.

PRADO, R.M; PANCELLI, M.A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**. v. 67. p. 951 – 959, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000400018>

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). *Frontiers 2018/2019: Emerging Issues of Environmental Concernm*. Nairobi: PNUMA. 2019.

REETZ, H.F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**; Tradução: ALFREDO, S.L. São Paula. Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). p. 178. 2017. PDF.

RESENDE, A.S; SANTOS,A; XAVIER, R.P; COELHO, C.H; GONDIM, A; OLIVEIRA, O.C; ALVES, B.J; BODDEY, R.M; URQUIAGA, S. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 30. p. 937 – 941. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600003>

RIPOLI, T.C.C; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Acesso em: 15 mar. 2025. 2009

ROBINSON, N; FLETCHER, A; WHAN, A; CRITCHLEY, C; WIRÉN, N.V; LAKSHMANAN, P; SCHMIDT, S. Sugarcane genotypes differ in internal nitrogen use efficiency. **Functional Plant Biology**. v. 34. n. 12. p. 1122 – 1129. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP07183>

ROBINSON, N; FLETCHER, A; WHAN, A; VINALL, K; BRACKIN, R; PLAKSHMANAN; SCHMIDT, S. Sustainable sugarcane production systems reducing: plant nitrogen demand. **Sugar Cane International**. v.26 n. 5. p. 9 – 12. 2008

ROCHA, F.N.S. Influência da dinâmica de nutrientes para a eutrofização em corpos hídricos. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**. v.2 n. 2. p. 91. 2021 DOI: <https://doi.org/10.51189/rema/1660>

RODRIGUES, G.S.S.C; ROSS, J.L.S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental**. UFU. 1º edição. Uberlândia. EDUFU. 2020. p. 272.

RODRIGUES, L; BELON, J.G; RODRIGUES, L. Por onde anda o etanol no Brasil?. **AgroANALYSIS**, v. 44, n. 05, p. 18-21. 2024.

SALCEDO, I.H; SAMPAIO, E.V.S.B. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar II. Deslocamento vertical e horizontal de NO<sub>3</sub>-N e NH<sub>4</sub>-N no solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**. Brasília. v. 19 n. 9. p. 1103-1108. 1984. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1984.v19.16054>

SALVIANO, A.M; MOURA, M.S.B; SILVA, T.G.F; CARMO, J.F.A; BRANDÃO, E.O. Acúmulo e exportação de macronutrientes pela cana-de-açúcar irrigada no semiárido Brasileiro. **Intellecto**. v.2. n.2. 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1079294/1/Alessandra2017.pdf>. Acesso em: 18 de mar. 2025.

SAMPAIO, E.V.S.B; SALCEDO, I.H; BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar I. Eficiência na utilização de uréia (.15N) em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa agropecuária brasileira**. Brasília. v. 19. n.8. p. 943 – 949. 1984. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1984.v19.15991>

SANGOI, L; ERNAN, P.R; LECH, V.A; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação de ureia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**. Santa Maria. v. 33. n.1. p 65 – 70. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000100010>

SANTOS, L.A; SANTOS, W.A; SPERANDIO, M.V.L; BUCHER, C.A; SOUZA, S.R; FERNANDES, M.S. Nitrate uptake kinetics and metabolic parameters in two rice varieties grown in high and low nitrate. **Journal of Plant Nutrition**. v. 34. n. 7. p. 988 – 1002. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.555581>

SANTOS, M.A.L. **Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): um modelo de análise de decisão para o estado de Alagoas**. 2005. 100f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SCARPARI, M.S; BEUCLAIR, E.G.F. Anatomia e botânica IN: DINARDO-MIRANDA, L.L; VASCONCELOS, A.C.M; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas. Instituto Agrônomo de Campinas Fundação. 2008. Cap. 2. p. 47 – 56. PDF.

SCHULTZ, N. MASSENA. R; SEGUNDO U. **Resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada: fontes nitrogenadas, formas de aplicação, épocas de aplicação e efeito varietal**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2015. 52 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos 298). Acesso em 17 mar. 2025.

SILVA, L; MOURA FILHO, G; SILVA, V; FERREIRA, L; CARNAÚBA, P; ALMEIDA, C; SANTOS, V. (2008). Acúmulo e eficiência de potássio em sete cultivares de cana-de-açúcar na Região de Cururipe-AL. In **CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL** (Vol. 9, pp. 244-248).

SILVESTRE, D.A. **Absorção de nitrato de amônio em genótipos contrastantes de cana-de-açúcar (*saccharum spp.*) inoculados ou não bactérias diazotróficas**. Dissertação (mestrado em Agronomia e Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Instituto de Agronomia – Curso de Pós-Graduação em Agronomia e Ciência do Solo, 2017.

SOARES, T.M; COELHO, F.S; OLIVEIRA, V.B; PONTES, O; PAVINATO, P.S. Soil nitrogen dynamics under tobacco with diferente fertilizer management in Southern Brazil. **Geoderma Regional**. v. 21. p. e00282. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00282>

SOUZA, L.V; MIRANDA, G.V; GALVÃO, J.C.C; ECKERT, F.R; MANTOVANI, E.E; LIMA, R.O; GUIMARÃES, L.J.M. Genetic control of grain yield and nitrogen use efficiency in tropical maize. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília. v. 43. n.11 p. 1517 – 1523. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001100010>

SREENIVASAN, T.V; AHLLOWALIA, B.S; HEINZ, D.J. Cytogenetics. *IN*: HEINZ, D.J. **Sugarcane improvement through breeding**. Volume 11. Amsterdam. Elsevier. 1987. p. 211-253.

SWELUM, A.A; EL-SAADONY, M.T; EL-HACK, M.E.A; GHANIMA, M.M.A; SHURKY, M; ALHOTAN, R.A; HUSSEIN, E.O.S; SULIMAN, G.M; BA-AWADH, H; AMMARI, A.A; AYMAN, E.T; EL-TARABILY, K.A. Ammonia emissions in poultry houses and microbial nitrification as a promising reduction strategy. **Science of the Total Environment**. V. 781. p. 146978. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146978>

SYLVESTER-BRADDLEY, R; KINDRED, D.R. Analyzing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. **Journal of Experimental Botany**. Oxford. v. 60. p. 1939 – 1951, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp116>

TRIVELIN, P.C.O; RODRIGUES, J.C.S; VICTORIA, R.L. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia – 15N e Ureia – 15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v. 31. p. 89 – 99. 1996 DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1996.v31.4457>

TRIVELIN, P.C.O; VITTI, A.C; OLIVEIRA, M.W; GAVA, G.J; SARRIÉS, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de ciência do solo**. Viçosa. v.26 p. 637 – 646. 2002.

UDVARDI, M; BELOW, F.E; CASTELLANO, M.J; EAGLE, A.J; GILLER, K.E; LADHA, J.K; LIU, X; MAAZ, T.M; NOVA-FRANCO, B; RAGHURAM, N; ROBERTSON, G.P; SONALI, R; SAHA, M; SCHMIDT, S; TEGEDER, M; YORK, L.M; PETERS, J.W. A research road map for responsible use of agricultural nitrogen. **Frontiers in sustainable food systems**. v.5. 2021. DOI: 10.3389/fsufs.2021.660155

VIDAL, M.F. Açúcar: Cenário mundial e situação de produção no Brasil e no nordeste brasileiro. 2021. **Disponível em:** [https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/765/3/2021\\_CDS\\_162.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/765/3/2021_CDS_162.pdf). Acesso em: 13 mar. 2025.

VITTI, A.C; TRIVELIN, P.C.O; FERREIRA, D.A; OTTO, R; FORTES, C; FARONI, C.E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília,DF. v. 46. p. 287 – 293. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000300009>

WATSON, C.J. AKHONZADA, N.A; HAMILTON, J.T.G; MATTHEWS, D.I. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil Use and Management**. v.24. n. 3. p. 246 – 253. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00157.x>

WHAN, A; ROBINSON, N; LAKSHMANAN, P; SCHMIDT, S; AITKEN, K. A Quantitative genetics approach to nitrogen use efficiency in sugarcane. **Functional Plant Biology**. v.37. p. 448 – 454. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP09260>

XAVIER, R.P. **Contribuição da fixação biológica de nitrogênio na produção sustentável da cultura da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, 2006.

ZHANG, X; DAVIDSON, E.A; MAUZERALL, D.L; SEARCHINGER, T.D; DUMAS, P. SHEN, Y. Managing nitrogen for sustainable development. **Nature**. v. 528. p. 51 – 59. 2018. DOI: 10.1038/nature15743

**APÊNDICE A** – Tabela do teste T para o nível de n foliar aos 180 DAP em 16 genótipos sob alto e baixo N.

<b>Genótipos</b>	<b>Índice de N na folha sob alto N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Índice de N na folha sob baixo N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Significância</b>	<b>p-valor</b>
CTC 1007	18,25	17,50	NS	0,741942963
CTC 4	20,53	14,86	**	0,016163084
CTC 9001	20,67	20,45	NS	0,914294927
CTC 9002	18,176	16,54	NS	0,299247365
CTC 9006	17,14	14,86	NS	0,139858796
CV 7870	19,05	18,25	NS	0,62403782
IAC 5094	16,471	17,69	NS	0,533710967
IAC 5503	19,94	19,56	NS	0,797469525
IAC 8008	19,91	17,71	NS	0,239144111
RB 127825	19,82	17,88	NS	0,529639883
RB 855156	20,20	18,31	NS	0,481052953
RB 867515	18,27	15,51	NS	0,146288211
RB 92579	20,52	19,37	NS	0,359849325
RB 966928	19,65	18,49	NS	0,46738397
RB 975375	17,95	15,54	NS	0,204693496
RB 987935	19,78	18,56	NS	0,448047212

\*Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor <0,005 indica que a diferença entre as médias é significativa. DAP = Dias após o plantio.

**APÊNDICE B** - Tabela do teste T para o TAH em 16 genótipos sob alto e baixo N.

<b>Genótipos</b>	<b>TAH sob alto N (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>TAH sob baixo N (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Significância</b>	<b>p-valor</b>
CTC 1007	19,74	19,37	NS	0,818493076
CTC 4	19,82	19,74	NS	0,933427846
CTC 9001	19,973	19,06	NS	0,613800305
CTC 9002	18,17	17,27	NS	0,582195092
CTC 9006	22,95	20,90	NS	0,152379771
CV 7870	20,09	20,33	NS	0,869401124
IAC 5094	15,03	17,25	**	0,091907009
IAC 5503	19,93	19,95	NS	0,987073939
IAC 8008	19,14	18,05	NS	0,294508078
RB 127825	20,63	20,95	NS	0,80754255
RB 855156	16,82	15,51	NS	0,420526708
RB 867515	14,74	17,03	NS	0,238883223
RB 92579	24,94	23,38	NS	0,647726787
RB 966928	22,03	19,80	NS	0,246879153
RB 975375	17,54	16,16	NS	0,696099729
RB 987935	16,85	18,39	NS	0,342630026

\*Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor <0,005 indica que a diferença entre as médias é significativa. TAH = Toneladas de açúcar ha<sup>-1</sup>.

**APÊNDICE C - Tabela do teste T para o TCH em 16 genótipos sob alto e baixo N.**

<b>Genótipos</b>	<b>TCH sob alto N (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>TCH sob baixo N (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Significância</b>	<b>p-valor</b>
CTC 1007	141,6525	134,3615625	NS	0,589636117
CTC 4	136,4446875	135,403125	NS	0,84431148
CTC 9001	130,1953125	133,32	NS	0,752037319
CTC 9002	114,571875	109,3640625	NS	0,528633983
CTC 9006	169,7746875	149,985	**	0,071364952
CV 7870	141,6525	140,26375	NS	0,878036794
IAC 5094	110,405625	119,7796875	NS	0,224591971
IAC 5503	140,6109375	140,6109375	NS	1,00
IAC 8008	142,6940625	137,48625	NS	0,551087865
RB 127825	159,3590625	156,234375	NS	0,59060043
RB 855156	109,3640625	104,15625	NS	0,622067768
RB 867515	109,71125	127,765	**	0,053876335
RB 92579	170,81625	157,2759375	NS	0,436484044
RB 966928	146,8603125	135,403125	NS	0,123039155
RB 975375	122,904375	105,545	NS	0,433473088
RB 987935	126,0290625	136,4446875	NS	0,338126108

\*Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor < 0,005 indica que a diferença entre as médias é significativa. TCH = Tonelada de colmos ha<sup>-1</sup>.

**APÊNDICE D** - Tabela do teste T para o ATR (kg ha<sup>-1</sup>) em 16 genótipos sob alto e baixo N.

<b>Genótipos</b>	<b>ATR sob alto N (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>ATR sob baixo N (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Significância</b>	<b>p-valor</b>
CTC 1007	139,58	144,14	NS	0,24669902
CTC 4	145,18	145,58	NS	0,913673311
CTC 9001	152,69	143,99	NS	0,36263155
CTC 9002	157,37	156,54	NS	0,834318498
CTC 9006	136,31	139,51	NS	0,454476937
CV 7870	142,24	144,73	NS	0,412109037
IAC 5094	136,74	143,91	**	0,026838061
IAC 5503	141,67	141,74	NS	0,980977442
IAC 8008	134,75	132,68	NS	0,661889055
RB 127825	130,50	135,00	NS	0,59399828
RB 855156	153,23	149,31	NS	0,502639239
RB 867515	133,84	133,91	NS	0,991241821
RB 92579	144,97	147,85	NS	0,668813796
RB 966928	149,69	146,21	NS	0,711916635
RB 975375	142,83	151,875	**	0,035705852
RB 987935	134,42	135,795	NS	0,814510952

\*Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor < 0,005 indica que a diferença entre as médias é significativa. ATR = Açúcar total redutor.

**APÊNDICE E** – Tabela do teste T para o percentual de fibra em 16 genótipos sob alto e baixo N.

<b>Genótipos</b>	<b>Percentual de fibra sob alto N (%)</b>	<b>Percentual de fibra sob baixo N (%)</b>	<b>Significância</b>	<b>p-valor</b>
CTC 1007	11,77	11,65	NS	0,68095828
CTC 4	11,57	11,53	NS	0,948936688
CTC 9001	12,66	12,62	NS	0,915338489
CTC 9002	12,58	13,08	NS	0,625076751
CTC 9006	10,77	11,01	NS	0,645540018
CV 7870	10,98	11,62	**	0,091052985
IAC 5094	11,83	12,06	NS	0,530492918
IAC 5503	12,39	12,86	NS	0,322748109
IAC 8008	11,88	11,39	NS	0,248233443
RB 127825	11,36	12,08	**	0,038472439
RB 855156	11,59	11,75	NS	0,770979608
RB 867515	11,68	11,33	NS	0,543871783
RB 92579	10,82	11,32	NS	0,284554161
RB 966928	11,68	12,15	NS	0,368770666
RB 975375	10,66	11,39	NS	0,115920743
RB 987935	11,07	11,37	NS	0,487568104

\*Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor < 0,005 indica que a diferença entre as médias é significativa.

**APÊNDICE F** - Tabela do teste T para o percentual de POL no caldo em 16 genótipos sob alto e baixo N.

<b>Genótipos</b>	<b>Percentual do POL no caldo sob alto N (%)</b>	<b>Percentual do POL no caldo sob baixo N (%)</b>	<b>Significância</b>	<b>p-valor</b>
CTC 1007	13,96	14,452	NS	0,246500808
CTC 4	14,53	14,58	NS	0,901896114
CTC 9001	15,34	14,33	NS	0,344676514
CTC 9002	15,84	15,75	NS	0,812236392
CTC 9006	13,53	13,95	NS	0,400949582
CV 7870	14,17	14,49	NS	0,306930766
IAC 5094	13,61	14,39	**	0,027312594
IAC 5503	14,17	14,18	NS	0,969282558
IAC 8008	13,43	13,16	NS	0,579780534
RB 127825	12,97	13,43	NS	0,617054566
RB 855156	15,33	14,98	NS	0,599086418
RB 867515	13,34	13,31	NS	0,9669884
RB 92579	14,51	14,83	NS	0,654037388
RB 966928	14,99	14,62	NS	0,715319872
RB 975375	14,21	15,26	**	0,042136918
RB 987935	13,36	13,505	NS	0,822194763

\*Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor < 0,005 indica que a diferença entre as médias é significativa. POL = Sacarose aparente do caldo.

**APÊNDICE G** - Tabela do teste T para o percentual de PZa do caldo em 16 genótipos sob alto e baixo N.

<b>Genótipos</b>	<b>Percentual de pureza do caldo sob alto N (%)</b>	<b>Percentual de pureza do caldo sob baixo N (%)</b>	<b>Significância</b>	<b>p-valor</b>
CTC 1007	87,10	87,62	NS	0,597852476
CTC 4	86,71	87,06	NS	0,75003182
CTC 9001	87,63	83,35	NS	0,240844338
CTC 9002	88,15	87,51	NS	0,460000307
CTC 9006	84,27	87,07	NS	0,235028258
CV 7870	84,76	86,98	**	0,071312404
IAC 5094	85,30	86,43	NS	0,342623813
IAC 5503	86,69	86,69	NS	0,997172622
IAC 8008	86,17	84,27	**	0,072480806
RB 127825	85,36	85,02	NS	0,888449632
RB 855156	85,44	87,51	NS	0,526776165
RB 867515	86,46	84,94	NS	0,615953634
RB 92579	87,16	87,73	NS	0,70325873
RB 966928	86,53	85,77	NS	0,716530174
RB 975375	84,51	87,99	NS	0,210055773
RB 987935	84,825	84,8	NS	0,987338429

\*Coluna de significância indica quando as médias apresentaram diferença significativa (\*\*) para alto e baixo N dentro do mesmo genótipo e não significativo (NS) pelo teste T para comparação de duas médias. P-valor < 0,005 indica que a diferença entre as médias é significativa. PZa = Pureza do caldo

**APÊNDICE H** – Tabelas da análise de variância (ANOVA) para o índice de N na folha aos 180 DAP, ATR, fibra e POL.

ANOVA – N folha aos 180 DAP						
Condição	Fonte de variação	GL	SQ	MQ	f	p
Baixo N	Genótipos	15	170,2	11,35	1,64	0,0962
	Resíduos	48	330,7	6,89		
Alto N	Genótipos	15	98,92	6,59	1,12	0,358
	Resíduos	48	280,35	5,84		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

ANOVA – ATR						
Condição	Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F	P
Baixo N	Genótipos	15	2664	177,58	3.393	0,000643
	Resíduos	48	2512	52,34		
Alto N	Genótipos	15	3717,162	247,8108	3,927	<0.001
	Resíduos	48	2994,663	62,3888		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

ANOVA – Fibra %						
Condição	Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F	P
Baixo N	Genótipos	15	21,75	1,4497	3,092	0,0015
	Resíduos	48	22,50	0,4688		
Alto N	Genótipos	15	23,13	1,5417	3,5	0,00047
	Resíduos	48	21,14	0,4405		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

ANOVA – POL %						
Condição	Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F	P
Baixo N	Genótipos	15	42,10	2,8067	3,666	0,000302
	Resíduos	48	36,75	0,7657		
Alto N	Genótipos	15	42,1000	2,8067	3,6657	<0,001
	Resíduos	48	36,75	0,7657		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

**APÊNDICE I - Tabelas da análise de variância (ANOVA) para PZa, TCH e TAH.**

<b>ANOVA – Pureza do caldo</b>						
<b>Condição</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Baixo N	Genótipos	15	120,9	8,060	1,51	0,122
	Resíduos	48	247,8	5,163		
Alto N	Genótipos	15	82,6	5,507	0,622	0,807
	Resíduos	48	399,1	8,314		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

<b>ANOVA – Tonelada de colmos ha<sup>1</sup></b>						
<b>Condição</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Baixo N	Genótipos	15	15676	1045,1	5,953	9,96 <sup>-07</sup>
	Resíduos	48	8427	175,6		
Alto N	Genótipos	15	25862	1590,8	6,869	1,35 <sup>-07</sup>
	Resíduos	48	11116	231,6		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

<b>ANOVA – Tonelada de açúcar ha<sup>1</sup></b>						
<b>Condição</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Baixo N	Genótipos	15	248,4	16,561	3,618	0,000344
	Resíduos	48	219,7	4,577		
Alto N	Genótipos	15	447,7	29,846	3,971	0,000132
	Resíduos	48	360,7	7,515		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

**APÊNDICE J** – Tabelas de análise de variância (ANOVA) para massa seca  
compartimentalizada de folhas, ponteiros e colmos.

<b>ANOVA – Massa seca de colmo</b>						
<b>Condição</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Baixo N	Genótipos	15	3084	205,6	1,513	0,143
	Resíduos	48	5842	135,9		
Alto N	Genótipos	15	2133	142,2	0,923	0,547
	Resíduos	48	7089	154,1		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

<b>ANOVA – Massa seca de folhas</b>						
<b>Condição</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Baixo N	Genótipos	15	74,03	4,935	1,673	0,0896
	Resíduos	48	141,63	2,951		
Alto N	Genótipos	15	60,07	4,005	0,91	0,559
	Resíduos	48	211,19	4,400		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.

<b>ANOVA – Massa seca de ponteiro</b>						
<b>Condição</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Baixo N	Genótipos	15	36,14	2,409	1,136	0,353
	Resíduos	48	101,80	2,121		
Alto N	Genótipos	15	24,99	1,666	0,929	0,539
	Resíduos	48	86,04	1,792		

\*GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; F = valor de f; P = valor de p.