

MARIA CATIANA DE VASCONCELOS

**GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL PULSADO E CONTÍNUO E ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CANA-DE-AÇÚCAR NA MATA NORTE DE
PERNAMBUCO**

RECIFE - PE

2024

MARIA CATIANA DE VASCONCELOS

**GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL PULSADO E CONTÍNUO E ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CANA-DE-AÇÚCAR NA MATA NORTE DE
PERNAMBUCO**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

Orientador: Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva

RECIFE - PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Ana Catarina Macêdo – CRB-4 1781

V331g Vasconcelos, Maria Catiana de.
Gotejamento subsuperficial pulsado e contínuo e adubação nitrogenada na cana-de-açúcar na Mata Norte de Pernambuco / Maria Catiana de Vasconcelos. – Recife, 2024.
162 f.; il.

Orientador(a): Gerônimo Ferreira da Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências.

1. Cana-de-açúcar. 2. Fertirrigação. 3. Irrigação por gotejamento . 4. Rendimento I. Silva, Gerônimo Ferreira da, orient. II. Título

CDD 630

MARIA CATIANA DE VASCONCELOS

**GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL PULSADO E CONTÍNUO E ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CANA-DE-AÇÚCAR NA MATA NORTE DE
PERNAMBUCO**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva - DEAGRI/UFRPE
Presidente/Orientador

Prof. Dr. Alessandro Oliveira da Silva - UFC
Membro Externo

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto - EECAC/UFRPE
Membro Externo

Prof. Dr. Márcio Aurélio Lins dos Santos - UFAL/ARAPIRACA
Membro Externo

Prof. Dr. Thiago Jardelino Dias – CCHSA/UFPB
Membro da Externo

Aos meus pais, Rita de Cassia Vasconcelos e José Augusto Vasconcelos, pelo amor, carinho e exemplo de vida. Ensinaram-me que a verdadeira essência da vida está na bondade, generosidade e perseverança. Mesmo diante de desafios, nunca me faltou nada, proporcionando um alicerce sólido para a realização dos meus sonhos. Sou eternamente grata. Amo vocês.

Aos meus irmãos: José Sérgio, Elisangela e Maria do Carmo, por todo carinho, apoio, compreensão e auxílio essenciais que me permitiram alcançar este momento.

Ao meu esposo, Wilys Soares Sousa, por estar sempre ao meu lado, com paciência, carinho e amor, dando-me forças nos desafios dessa jornada. Sua presença é meu suporte e incentivo constante.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a *Deus* que com sua graça, me presenteou com a dádiva da vida, por me conceder saúde, força, coragem e sabedoria para enfrentar os desafios que permeiam o caminho da existência.

A minha família, meus pais José Augusto e Rita de Cássia, meus irmãos José Sérgio, Maria Elisângela e Maria do Carmo e meus sobrinhos Halison, Hávila, Lavínia, Leticia e Laiza por todo apoio, amor, incentivo, paciência e compreensão.

Ao meu esposo, Wilys Soares Sousa, por estar sempre ao meu lado, com paciência, carinho e amor, oferecendo apoio em todos os momentos.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - Departamento de Engenharia Agrícola, e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PGEA) pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa concedida, e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo financiamento da pesquisa através do projeto – Produção de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento contínuo e pulsado no Estado de Pernambuco.

À Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), pela disponibilização da área para a realização desta pesquisa. Destaco, de maneira especial, ao diretor Dr. Djalma Euzébio Simões Neto, a quem agradeço a assistência no decorrer desta pesquisa.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) pela concessão do acesso ao Laboratório de Análise de Ração e Planta (LAPRA) para a realização das análises nutricionais da cana-de-açúcar, em especial ao Dr. Antônio Félix da Costa.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva, pela orientação, paciência, conselhos e ensinamentos.

Aos meus colegas de campo, pela ajuda e apoio quando mais precisei: Bruna Braz, João Victor e Ana Cláudia. Em especial, à Karla Emanuelle, minha parceira de campo incansável, enfrentando comigo os desafios do dia a dia. Sua presença constante foi fundamental para compartilharmos as alegrias e superarmos juntos as dificuldades na condução do experimento.

Às amigas que a pós-graduação me presenteou – Brenna Verissimo, Carolayne Silva, Giselle Almeida, Irene Almeida, Maria de Fátima, Raissa Rattes e Martha

Katharinne por todo carinho, apoio e alegria compartilhadas. A Ana Paula e Tatiane pela amizade e momentos de descontração que trouxeram leveza a essa jornada.

Aos funcionários da Estação Experimental do Carpina (EECAC), em especial: Evanilson Paulino, sou muito grata por toda ajuda.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direto e indiretamente para eu chegar até aqui, expresso meu sincero agradecimento e gratidão a todos.

*Por isso não tema, pois estou com você;
não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o
fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei
com a minha mão direita vitoriosa.*

Isaías 41:10

*O sucesso nasce do querer, da
determinação e persistência em se chegar
a um objetivo. Mesmo não atingindo o
alvo, quem busca e vence obstáculos, no
mínimo fará coisas admiráveis.*

(José de Alencar)

RESUMO GERAL

Com a expansão do mercado de açúcar e etanol, a indústria canavieira reconheceu a necessidade de aumentar a produção de cana-de-açúcar, diante disto, novas tecnologias e ferramentas para elevar a produtividade agrícola são fundamentais. Nesse sentido, a fertilização com nitrogênio e a irrigação surgiram como fatores essenciais. A irrigação pulsada, como técnica de manejo da irrigação, apresenta potencial para um uso mais eficiente da água e dos fertilizantes aplicados. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar os efeitos da aplicação de diferentes doses de nitrogênio, aplicadas via fertirrigação pulsada e contínua sobre os parâmetros de crescimento e de produção, bem como os aspectos fisiológicos e nutricionais da cana-de-açúcar. O experimento foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina durante o segundo ciclo da cana-soca. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial (5 x 2). O primeiro fator, cinco doses de nitrogênio (80; 120; 160; 240 e 320 kg ha⁻¹) aplicadas via fertirrigação, enquanto o segundo fator dois tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua), com 4 repetições. Foram analisados, aos 180 e 240 dias após o corte, a condutância estomática (*gs*), a fotossíntese líquida (*A*), a temperatura foliar (*Tf*), a transpiração (*E*), a concentração interna de CO₂ (*Ci*), a eficiência intrínseca do uso da água (*A/g_s*), a eficiência instantânea de uso da água (*A/E*) e a eficiência instantânea de carboxilação (*A/Ci*). O crescimento das plantas foi acompanhado por meio de medições realizadas aos 60, 90, 120, 150, 180 e 310 DAC, sendo determinados a altura e diâmetro dos colmos, a área foliar e o índice de área foliar. Para extração e exportação, foram determinados os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, manganês, cobre, zinco e ferro. No final do ciclo, também, foi determinada a produtividade e o rendimento bruto de açúcar e etanol. O uso da irrigação pulsada mostrou ser mais eficiente, tanto na manutenção da umidade do solo quanto na absorção de nutrientes. A técnica de pulsar a água de irrigação favoreceu a extração e exportação dos nutrientes, assim como, os parâmetros fisiológicos, de crescimento e de produção da cana-de-açúcar. A aplicação de nitrogênio, aliada a uma irrigação controlada, foi suficiente para proporcionar a máxima eficiência hídrica e nutricional pela cultura da cana-de-açúcar, evitando, desperdícios de recursos.

PALAVRAS-CHAVE: Cana-soca, Fertirrigação, Irrigação por pulsos, Rendimento, *Saccharum* spp.

ABSTRACT GENERAL

With the expansion of the sugar and ethanol market, the sugarcane industry has recognized the need to increase sugarcane production. As a result, new technologies and tools to boost agricultural productivity are essential. In this context, nitrogen fertilization and irrigation have emerged as essential factors. Pulsed irrigation, as an irrigation management technique, shows potential for more efficient use of water and applied fertilizers. In this context, the objective of this research was to evaluate the effects of applying different nitrogen doses, administered through pulsed and continuous fertigation, on growth and production parameters, as well as the physiological and nutritional aspects of sugarcane. The experiment was conducted at the Carpina Sugarcane Experimental Station during the second ratoon cycle. The experimental design used was a randomized block design in a factorial scheme (5 x 2). The first factor consisted of five nitrogen doses (80, 120, 160, 240, and 320 kg ha⁻¹) applied via fertigation, while the second factor involved two types of irrigation application (pulsed and continuous), with 4 replicates. At 180 and 240 days after cutting, the following parameters were analyzed: stomatal conductance (g_s), net photosynthesis (A), leaf temperature (T_f), transpiration (E), internal CO₂ concentration (C_i), intrinsic water use efficiency (A/g_s), instantaneous water use efficiency (A/E), and instantaneous carboxylation efficiency (A/C_i). Plant growth was monitored through measurements taken at 60, 90, 120, 150, 180, and 310 days after cutting (DAC), determining stalk height and diameter, leaf area, and leaf area index. For extraction and export, the contents of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sulfur, manganese, copper, zinc, and iron were determined. At the end of the cycle, productivity and the gross yield of sugar and ethanol were also assessed. The use of pulsed irrigation proved to be more efficient in both maintaining soil moisture and enhancing nutrient absorption. The technique of pulsing the irrigation water improved the extraction and export of nutrients, as well as the physiological, growth, and production parameters of sugarcane. The application of nitrogen, combined with controlled irrigation, was sufficient to achieve maximum water and nutrient efficiency in sugarcane cultivation, preventing resource wastage.

KEYWORDS: Ratoon sugarcane, Fertigation, Pulsed irrigation, Yield, *Saccharum* sp.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	IX
ABSTRACT GENERAL.....	X
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
1. INTRODUÇÃO GERAL	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1. A cultura da cana-de-açúcar	21
2.1.1. Origem, aspectos botânicos e morfológicos.....	21
2.1.2. Aspectos agronômicos e fenológicos	22
2.1.3. Importância socioeconômica.....	23
2.2. Irrigação na cana-de-açúcar	25
2.3. Irrigação localizada	26
2.3.1. Gotejamento subsuperficial.....	26
2.4. Manejo da Irrigação por pulsos.....	28
2.5. Fertirrigação	30
2.6. Aspectos fisiológicos	31
2.7. Extração e exportação de nutrientes pela cana-de-açúcar.....	33
2.8. Nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar	35
2.8.1. Adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (cana-soca)	35
2.8.2. Interação entre irrigação e nitrogênio na cana-de-açúcar.....	36
5. REFERÊNCIAS.....	38
CAPÍTULO II: DOSES DE NITROGÊNIO E IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO SOBRE A EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELA CANA-DE-AÇÚCAR.....	57
1. INTRODUÇÃO	60
2. MATERIAL E MÉTODOS	62
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
4. CONCLUSÃO	84
5. REFERÊNCIAS.....	86
CAPÍTULO III: DOSES DE NITROGÊNIO E IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO SOBRE AS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	94
1. INTRODUÇÃO	97
2. MATERIAL E MÉTODOS	99
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107
4. CONCLUSÃO	117
5. REFERÊNCIAS.....	118
CAPÍTULO IV: CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DOSES DE NITROGÊNIO VIA FERTIRRIGAÇÃO PULSADA E CONTÍNUA	126

1. INTRODUÇÃO	129
3. MATERIAL E MÉTODOS	131
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	140
4. CONCLUSÃO	152
5. REFERÊNCIAS.....	154
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163

LISTA DE FIGURAS

Capítulo II.....	57
Figura 1. Mapa de localização da área experimental	62
Figura 2. Parcelamento mensal da aplicação, via fertirrigação, de N e K ₂ O na cultura da cana-de-açúcar.....	65
Figura 3. Área útil de cada parcela experimental.....	66
Figura 4. Dados de precipitação, evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração da cultura (ET _c), e lâmina bruta aplicada na cultura da cana-de-açúcar.	69
Figura 5. Produção de biomassa seca da parte aérea (BSPA) (A) e biomassa seca dos colmos (BSC) (B) em função das doses de nitrogênio e dos tipos de aplicação da irrigação (pulsado e contínuo).	72
Figura 6. Extração e exportação de nitrogênio (A e B) na cultura da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio (DN) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).	73
Figura 7. Extração e exportação de fósforo (A e B) na cultura da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).	75
Figura 8. Extração e exportação de potássio (A e B), e cálcio (C e D) na cultura da cana-de-açúcar em função dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).	77
Figura 9. Extração e exportação de magnésio (A e B), na cultura da cana-de-açúcar em função do efeito isolado das doses de nitrogênio (DN) e tipos de irrigação (pulsada e contínua).	79
Figura 10. Extração e exportação de enxofre (A e B), na cultura da cana-de-açúcar em função do efeito isolado dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).	80
Figura 11. Extração de Fe na cana-de-açúcar em função dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) (A) e exportação em função doses de nitrogênio (DN) aplicadas (B) e extração e exportação de Zn (C e D) função dos tipos de aplicação da irrigação.	81
Figura 12. Desdobramento da interação entre os fatores doses de nitrogênio versus tipos de aplicação da irrigação sobre a extração (A) e a exportação de manganês (B) pela cana-de-açúcar.....	83
Capítulo III.....	94
Figura 1. Mapa de localização da área experimental.	99

Figura 2. Parcelamento mensal da aplicação, via fertirrigação, de N e K ₂ O na cultura da cana-de-açúcar.	102
Figura 3. Dados de precipitação, evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração da cultura (ETc) e lâmina bruta aplicada na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2021/2022.	105
Figura 4. Efeito do desdobramento dos fatores doses de nitrogênio e tipos de aplicação da irrigação, aos 240 DAC (A) e efeito isolado das doses de nitrogênio aos 300 DAC (B), sobre a fotossíntese líquida da cana-de-açúcar.	109
Figura 5. Transpiração da cultura da cana-de-açúcar, aos 240 DAC, em função das doses de nitrogênio aplicadas.	111
Figura 6. Condutância estomática (<i>gs</i>) da cultura da cana-de-açúcar aos 240 (A) e 300 (B) DAC em função das doses de nitrogênio aplicadas.	112
Figura 7. Eficiência instantânea do uso da água (<i>A/E</i>), aos 240 (A) e 300 DAC (B) na cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio aplicadas.	113
Figura 8. Eficiência intrínseca do uso da água (<i>A/g_s</i>) (A) e eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/C_i</i>) (B) da cana-de-açúcar, aos 240 DAC, em função das doses de nitrogênio aplicadas.	115
Capítulo IV	126
Figura 1. Mapa de localização da área experimental.	131
Figura 2. Parcelamento mensal da aplicação, via fertirrigação, de N e K ₂ O na cultura da cana-de-açúcar.	134
Figura 3. Dados de precipitação, evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração da cultura (ETc), e lâmina bruta aplicada na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2021/2022.	137
Figura 4. Altura do colmo (DC) da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação pulsada e contínua (A) e das diferentes épocas de avaliação (dias após o corte) (B).	141
Figura 5. Diâmetro do colmo (DC) sob efeito das doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação (A) dos dias após o corte (DAC) e tipos aplicação da irrigação (pulsado e contínuo) (B) na cultura da cana-de-açúcar.....	144
Figura 6. Área foliar (A) e índice de área foliar (B) sob efeito da interação dos dias após o corte e doses de nitrogênio aplicadas e dos tipos de aplicação da irrigação (pulsado e contínuo) na cultura da cana-de-açúcar.	146

Figura 7. Produtividade de colmos (A), rendimento bruto de açúcar (B) e rendimento bruto de etanol (C) da cana-de-açúcar sob efeito da interação entre os fatores doses de nitrogênio aplicadas e dos tipos de aplicação da fertirrigação (pulsado e contínuo). .. 149

LISTA DE TABELAS

Capítulo II.....	57
Tabela 1. Análise química e física do solo da área de estudo e análise química da água utilizada para irrigação, Carpina 2024.....	63
Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.....	68
Tabela 3. Análise de variância para a extração e exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), e para a produção de biomassa seca da parte aérea (BSPA) e biomassa seca do colmo (BSC).....	69
Capítulo III.....	94
Tabela 1. Análise química e física do solo da área do estudo e análise química da água utilizada para irrigação, Carpina 2024.....	100
Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.....	105
Tabela 3. Resumo da análise de variância para os parâmetros fisiológicos fotossíntese líquida (<i>A</i>), transpiração (<i>E</i>), condutância estomática (<i>gs</i>), concentração interna de CO ₂ (<i>Ci</i>), eficiência instantânea do uso da água (<i>A/E</i>), eficiência intrínseca do uso da água (<i>A/g_s</i>), eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/Ci</i>), e temperatura foliar (<i>Tf</i>) da cana-de-açúcar, aos 240 e 300 DAC, em função da aplicação de doses de nitrogênio, via fertirrigação pulsada e contínua.....	106
Tabela 4. Teste de média para as variáveis de fotossíntese líquida (<i>A</i>), transpiração (<i>E</i>), condutância estomática (<i>gs</i>), concentração interna de CO ₂ (<i>Ci</i>) e temperatura foliar (<i>Tf</i>), eficiência instantânea do uso da água (<i>A/E</i>), eficiência intrínseca do uso da água (<i>A/g_s</i>), eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/Ci</i>) na cultura da cana-de-açúcar submetidas à irrigação por gotejamento pulsado e contínuo.....	114
Capítulo IV.....	126
Tabela 1. Análise química e física do solo da área do estudo e análise química da água utilizada para irrigação, Carpina 2024.....	130
Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.....	137

Tabela 3. Resumo da análise de variância para altura do colmo (AC), diâmetro do colmo (DC), área foliar (AF) e índice de área foliar da cana-de-açúcar (RB041443), em função das doses de nitrogênio aplicada via fertirrigação pulsada e contínua. 140

Tabela 4. Resumo da análise de variância para a produtividade de colmos (TCH), rendimento bruto de açúcar (RBA) e rendimento bruto de etanol (RBE), da cana-de-açúcar, em função das doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação pulsada e contínua. 148

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma cultura tropical e subtropical de grande relevância, propagada vegetativamente, cultivada em cerca de 27 milhões de hectares em mais de 120 países ao redor do mundo (Budeguer et al., 2021). Além disso, essa planta consegue armazenar sacarose nos tecidos do caule, possibilitando a criação de diversos produtos. O açúcar e o etanol são particularmente essenciais para a economia do país (Ungureanu et al., 2022). Outros produtos, como melaço, rapadura (açúcar não refinado), bagaço, aguardente de cana e vinhaça, também merecem reconhecimento. A vinhaça, em particular, é amplamente utilizada nas plantações de cana-de-açúcar devido ao seu teor de potássio, nitrogênio e fósforo (Silva et al., 2020a).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia e China (Vandenbergh et al., 2022). A produção brasileira de cana-de-açúcar é de aproximadamente 685,8 milhões de toneladas, abrangendo uma área de cerca de 8,6 milhões de hectares, anualmente, o Brasil produz 46 milhões de toneladas de açúcar (CONAB, 2024). O país também se destaca na produção de bioetanol, respondendo por aproximadamente 26% da produção mundial (Carminati et al., 2019; Wiesberg et al., 2021).

O estado de Pernambuco também desempenha papel significativo no cultivo da cana-de-açúcar, com uma produção de 13,8 milhões de toneladas colhidas em uma área de 233 mil hectares. Além disso, o estado fabrica aproximadamente 969,5 mil toneladas de açúcar e 331 milhões de litros de etanol (CONAB, 2024). Pernambuco é o segundo maior produtor da região Nordeste e o sétimo do país (IBGE, 2021).

Com a expansão do mercado de açúcar e etanol, a indústria canavieira reconheceu a necessidade de aumentar a produção para competir com outros países. Para isso, vem buscando novos métodos de gestão e avanços tecnológicos. Nesse Cenário, o uso da irrigação por gotejamento subsuperficial surge como um elemento essencial que visa melhorar a eficiência agrícola, aumentar o rendimento das culturas e mitigar os impactos da escassez hídrica.

A implementação de novas tecnologias e a melhoria das técnicas existentes nos sistemas agrícolas irrigados são essenciais para aumentar a eficiência destes sistemas e garantir o desenvolvimento de uma agricultura sustentável. Isso leva ao aumento da produtividade e à melhoria da qualidade do produto. Neste contexto, a técnica da irrigação pulsada surge como parte do manejo da irrigação, visando aumentar a produtividade das culturas e, ao mesmo

tempo, conservar água, reduzir perdas por evaporação ou percolação, reduzir o consumo de energia e melhorar a absorção de nutrientes (Zamora et al., 2019).

A irrigação por pulso consiste na aplicação de água de forma fracionada, com períodos de aplicação denominados pulsos. Durante esses curtos períodos, a água é aplicada, seguida de períodos de descanso, e esse processo se repete até que o volume total de água necessário seja disponibilizado à cultura (Almeida et al., 2018).

Atrelada à irrigação está a necessidade de fornecer adequadamente os nutrientes essenciais às culturas, sendo o nitrogênio um exemplo proeminente. A fertilização nitrogenada apresenta uma opção viável para aumentar a produtividade e a qualidade da produção da cana-de-açúcar. Dada a elevada produção de biomassa da cana-de-açúcar, o atendimento às demandas de água e nitrogênio torna-se fundamental quando se planeja otimizar a produtividade das culturas. Nesse cenário, é importante ressaltar que o nitrogênio é o nutriente mais requerido por esta cultura e desempenha papel fundamental no seu desenvolvimento vegetativo e produtivo (Castro et al., 2019; Oliveira Junior et al., 2023).

Considerando a importância da irrigação e da adubação nitrogenada para a cana-de-açúcar, é fundamental estudar como esses dois fatores podem afetar o crescimento, desenvolvimento vegetativo e a produtividade da cultura. Porém, há escassez de pesquisas que relatem os impactos da adubação nitrogenada e a irrigação pulsada no crescimento, na exportação e acúmulo de nutrientes e na produtividade da cana-de-açúcar, especialmente para a cultivar RB041443.

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de diferentes doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação pulsada e contínua sobre os parâmetros de crescimento e de produção, bem como os aspectos fisiológicos e nutricionais da cana-de-açúcar.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A cultura da cana-de-açúcar

2.1.1. Origem, aspectos botânicos e morfológicos

Acredita-se que a cana-de-açúcar se originou no Sudoeste Asiático, mais precisamente na região da Nova Guiné e Indonésia, onde foi domesticada e disseminada para o mundo (Lopes Sobrinho et al., 2019; Babu et al., 2022). No Brasil, ela chegou por volta de 1532, trazida pelos escravos para produção de açúcar. Caracteriza-se por ser uma planta de ciclo perene, alógama do gênero *Saccharum*, pertencente à família das Poaceae, da classe das monocotiledôneas, da tribo Andropogonae, e classificada como uma planta do tipo C4, que possui em seus colmos, grande potencial de armazenamento de sacarose (Lopes Sobrinho et al., 2019; Kane et al., 2022). Desse modo, devido anatomia foliar, a cultura apresenta boa adaptabilidade em regiões com elevada intensidade luminosa, altas temperaturas e baixa disponibilidade de água (Lacerda et al., 2019).

Assim como a maioria das plantas *Poaceae*, a cana-de-açúcar cresce em touceiras com formação de perfilhos (Almeida et al., 2022). Essas touceiras são formadas por duas partes: uma parte subterrânea composta por raízes e rizomas que armazenam nutrientes, e uma parte aérea composta por folhas, inflorescências, frutos e caules (Pissolato et al., 2021). Este último é altamente valorizado devido ao seu alto teor de sacarose, tornando-o um material de significativo interesse comercial. As touceiras formadas na cana-soca originam-se dos rizomas que brotam logo após a colheita (Silva e Silva., 2012).

A cana-de-açúcar se reproduz sexualmente, mas quando cultivada para fins comerciais, a multiplicação assexuada por meio de propagação vegetativa é comumente utilizada (Hasner et al., 2019; Ramírez-Mosqueda et al., 2023). As folhas são classificadas como completas e apresentam coloração verde, constituídas por bainha e lâmina foliar e numeradas de cima para baixo, começando pela folha superior, sendo marcada e identificada como folha +1 (Khan et al., 2022).

A inflorescência da cana-de-açúcar é do tipo panícula aberta, comumente chamada de bandeira ou flecha, e as flores são pequenas, formando pontas florais unidas em panículas e rodeadas por longas fibras sedosas, agrupando-se em maciços tufos cinza-prateados (Mozambani et al., 2006). Segundo Silva e Silva et al. (2012), essas flores são hermafroditas.

As raízes são fibrosas, com sistema radicular fasciculado, onde cerca de 85% delas se encontram nos primeiros 50 cm e podem atingir profundidades de até 4 metros (Silva e Silva et al., 2012; Som-Ard et al., 2021).

Os rizomas da planta são compostos por nós, entrenós e gemas, responsáveis pelo surgimento dos perfilhos, resultando na formação de touceiras, que logo após a colheita da cana-de-açúcar, os rizomas geram novas touceiras através da brotação (Meena et al., 2022). O colmo da cana-de-açúcar pode ter diferentes posturas, sendo ereto, semiereto ou decumbente, e composto por nós e entrenós distintos, que variam conforme a idade da planta (Silva e Silva et al., 2012).

2.1.2. Aspectos agronômicos e fenológicos

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene pertencente à família *Poaceae*, criada há cerca de um século através da combinação de espécies poliplóides de *Saccharum* (Tavares et al., 2023). No gênero *Saccharum*, existem pelo menos seis espécies, sendo *Saccharum officinarum* de particular relevância econômica para o Brasil devido ao seu alto teor de sacarose nos colmos (Ali et al., 2021). A cana-de-açúcar é considerada uma planta de metabolismo C4, o que lhe confere alta taxa fotossintética e eficiência na conversão de energia luminosa em energia química, resultando no aumento da produção e acúmulo de sacarose no colmo (Leite, 2018; Alves et al., 2021).

O sistema de produção da cana-de-açúcar é bastante complexo, a começar pelo plantio, denominada “cana-planta” por ainda não ter sido submetida ao corte. A duração em campo varia de 12 a 18 meses (Ali et al., 2021). Após a primeira colheita surge um novo broto, iniciando o ciclo da “cana soca”, que deve ser colhida preferencialmente aos 12 meses (Arshad et al., 2020). Normalmente, a “cana soca” é colhida várias vezes, mas no Brasil ocorre geralmente de quatro a cinco vezes.

Quanto à fenologia da planta, a cana-de-açúcar passa por quatro fases de desenvolvimento: 1 - brotação e estabelecimento da cultura; 2 - perfilhamento; 3 - crescimento acima do solo; e 4 - maturação dos colmos (acúmulo de sacarose) (Som-Ard et al., 2021). Essas fases não são fáceis de identificar no campo e a duração de cada uma varia dependendo da época de plantio ou colheita, temperatura e disponibilidade de umidade do solo (Marin, 2014; Dingre, 2023).

A fase de brotação e estabelecimento da cultura da cana-de-açúcar é influenciada por fatores como umidade do solo, temperatura, profundidade de plantio e variedade. Esta fase demanda normalmente entre 20 a 30 dias para ser concluída (Marafon, 2012). Nesse período, a cana-de-açúcar utiliza suas reservas de energia, nutrientes e recursos hídricos.

Após a brotação, a fase de perfilhamento inicia-se por volta dos 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias, o perfilhamento, inicia-se a fase de crescimento acima do solo que dura até 270 dias após o plantio, sendo uma etapa crucial responsável pelo acúmulo de aproximadamente 75% da matéria seca total (Marafon, 2012).

Dessa forma, a maturação dos colmos inicia-se aproximadamente 270 a 360 dias após o plantio e pode se estender por até 6 meses (Diola e Santos, 2010). Nessa fase, ocorre redução nas taxas de crescimento da cultura e aumento no acúmulo de sacarose nos colmos (Diola e Santos, 2010; Marafon, 2012). É desejável introduzir um período de estresse durante esta fase para otimizar o acúmulo de sacarose (Araújo et al., 2016).

2.1.3.Importância socioeconômica

A cana-de-açúcar possui importância socioeconômica para o Brasil devido ao seu potencial na produção de açúcar e etanol, tornando o Brasil o maior exportador de açúcar do mundo (Giolo et al., 2021). Globalmente, a cana-de-açúcar é a principal fonte de açúcar, contribuindo para 70% da produção de açúcar, rendendo mais de 300 milhões de toneladas anualmente (Parida et al., 2020; Ali et al., 2021).

Segundo a FAO (2022), a cana-de-açúcar é a cultura economicamente mais relevante no mundo, cultivada em mais de 120 países. O Brasil lidera atualmente como maior produtor, desde o plantio até a produção de açúcar e etanol, gerando 60% a mais que a Índia, segundo maior produtor, e a China, o terceiro maior. A cana-de-açúcar é considerada uma fonte alternativa para o setor de biocombustíveis devido ao seu potencial para produção de álcool e outros subprodutos como melaço, bagaço, biogás e aguardente. Ademais, as preocupações com as alterações climáticas e a procura de fontes de energia renováveis e mais limpas elevaram a importância econômica global da cana-de-açúcar (Tavares et al., 2023). Além disso, a cultura se destaca pelo seu papel na geração de empregos e renda tanto para a população quanto para o setor sucroenergético.

A produção de etanol é uma alternativa viável para substituir produtos derivados do petróleo e serve como fonte renovável de combustível, reduzindo emissões na atmosfera (Malik

et al., 2024). Na safra 2023/2024 de cana-de-açúcar, a área cultivada atingiu 8,3 milhões de hectares, resultando em uma produção de 713 milhões de toneladas. Para a safra 2024/2025 estima-se uma redução de 3,8% em relação ao ciclo anterior, levando a uma produção de 685,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Em relação à produção de etanol derivado da moagem de cana-de-açúcar, a primeira estimativa para o ciclo 2024/25 prevê uma produção brasileira de 27,3 bilhões de litros, representando uma redução de 8% em relação à safra anterior, que atingiu 29,6 bilhões de litros (CONAB, 2024).

A principal região produtora de cana-de-açúcar do país é o Sudeste, com estimativa de 442 milhões de toneladas em uma área de 5.398 milhões de hectares, refletindo aumento de 5,9% na área colhida em relação à safra anterior. Na região Centro-Oeste, a produção atingiu 145 milhões de toneladas em uma área de 1.778 milhão de hectares. No Nordeste, está prevista uma produção de 56,6 milhões de toneladas para a safra 2024/2025, representando uma redução de 0,7% em relação à safra anterior, cuja produção foi de 56,4 milhões de toneladas. Na região Sul, a área de cultivo produziu 38,7 milhões de toneladas de cana. Já para a região Norte, espera-se um crescimento de 6,4% na produção, totalizando 3.781 mil de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2024).

Em Pernambuco, a produção de cana-de-açúcar está concentrada na Zona da Mata, Norte e Região Metropolitana do Recife. Resumindo, a região da Mata Sul, composta por vinte e quatro municípios, é responsável por 38,80% da produção total do estado. A região da Mata Norte, com dezenove municípios, responde por outros 37,80%, enquanto as regiões Metropolitana e Agreste respondem por 15,61% e 7,79%, respectivamente (Menezes, 2022).

As fortes chuvas, nos meses de novembro de 2022 e fevereiro de 2023, resultaram em maior produtividade e produção de cana-de-açúcar. Na safra de 2023/2024, foram produzidas 13,81 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área de 236,7 mil hectares, com uma produtividade média de 59 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2024). Essa produção resultou em 1,15 milhão de toneladas de açúcar e 351,18 mil litros de etanol.

No estado, a colheita manual ainda predomina, 87,9% das áreas de produção, colhida mecanicamente, 12,1% da cana-de-açúcar. A prevalência da colheita manual se deve à topografia acidentada das áreas de plantio, que varia de ondulada a acentuadamente ondulada (CONAB, 2023).

No Nordeste do Brasil, as variedades de cana-de-açúcar que se destacam no setor de cana-de-açúcar e energia incluem RB92579, RB863129, RB872552, RB867515, RB002754 e

a recentemente lançada RB041443, essas variedades foram desenvolvidas pela RIDESA em colaboração com o Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco e são caracterizadas pelo rápido crescimento, alta produtividade, maturação precoce, alto teor de sacarose e maior tolerância à seca, problema prevalente no Nordeste (Mendonça, 2019).

2.2. Irrigação na cana-de-açúcar

A irrigação é uma prática estabelecida há muito tempo e benéfica para as culturas, por fornecer abastecimento artificial de água às plantas, garantindo uma fonte de água consistente ao longo de suas fases de desenvolvimento, porém, deve ser executada utilizando técnicas e sistemas apropriados (Zhang et al., 2021). No contexto da produção de cana-de-açúcar, as regiões que adotam a irrigação para superar as deficiências hídricas dependem de fatores como a frequência e a quantidade de água aplicada, bem como a uniformidade e a eficiência do sistema de irrigação, esses fatores estão associados a elementos como adubação, variedade de cana, idade de colheita, tipo de solo e precipitação (Dantas Neto, 2006; Coelho et al., 2018).

A irrigação, portanto, desempenha um papel fundamental no atendimento das necessidades hídricas da cultura. Entre os métodos de irrigação pressurizada, comumente utilizados nos canais estão a irrigação por aspersão e a irrigação localizada, com ênfase na irrigação por gotejamento subsuperficial (Bufon et al., 2021). Segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), a cana-de-açúcar possui a maior área irrigada do país, com 1,7 milhão de hectares do total de 5,7 milhões de hectares de área irrigada. As projeções sugerem que esta área poderá atingir 2,7 milhões de hectares até 2030.

No cultivo irrigado da cana-de-açúcar, são consideradas três diferentes sistemas de manejo da irrigação: irrigação plena, irrigação suplementar e irrigação de salvamento, sendo a irrigação de salvamento a mais utilizada (ANA, 2017). A irrigação total envolve a aplicação de quantidade suficiente de água para atender todas as necessidades hídricas da cana-de-açúcar, mas precisa ser interrompida no décimo mês do ciclo de crescimento para promover a maturação (ANA, 2017). Por outro lado, a irrigação suplementar visa fornecer uma quantidade parcial de água para compensar a deficiência hídrica da planta, respondendo por aproximadamente 50% das necessidades da cana-planta e da cana-soca, além disso, a irrigação suplementar é realizada após a colheita e deve ser suspensa ao final da primeira fase de crescimento (Santos e Frizzone, 2006).

A irrigação de salvamento, que cobre mais de 90% da área irrigada no cultivo da cana-de-açúcar, como o nome indica, visa resgatar a lavoura da cana-de-açúcar sendo realizada logo após a colheita anual, com uma única lâmina de 40 a 60 mm (Bufon et al., 2021). Atualmente, os recursos hídricos para irrigação são limitados e devem ser geridos de forma eficiente para minimizar desperdícios e reduzir custos, garantindo a sustentabilidade econômica do sistema (Mansour et al., 2017; Santos et al., 2019). Entre os sistemas de irrigação, a irrigação por gotejamento subsuperficial tem se mostrado promissora, ao permitir que água e nutrientes sejam aplicados diretamente no sistema radicular da planta (Gunarathna et al., 2018; Xiao et al., 2023).

2.3. Irrigação localizada

2.3.1. Gotejamento subsuperficial

Kirham et al. (2021) adaptaram a definição estabelecida pela ASAE em 1997 para descrever a irrigação por gotejamento subsuperficial como um sistema no qual a água é aplicada abaixo da superfície do solo por emissores a uma taxa de descarga semelhante à irrigação por gotejamento superficial. A irrigação por gotejamento tem o potencial de economizar água e nutrientes, fornecendo água lentamente às raízes das plantas, seja acima da superfície do solo ou enterradas abaixo dela, o que é conhecido como subsuperfície (Li e Kang, 2020).

Quando conduzido de forma subsuperficial, as fitas ou tubos gotejadores ficam enterrados abaixo da superfície do solo, permitindo o fornecimento direto de água à zona radicular da planta e umedecendo apenas uma parte do volume do solo (Paolinelli et al., 2021). Nos sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial, os tubos são enterrados em profundidades que variam de 10 a 80 cm, dependendo da cultura, tipo de solo, e, em condições adequadas de manejo, podem atingir eficiência superior a 95% (Gunarathna et al., 2018). No caso da produção de cana-de-açúcar irrigada, os tubos são normalmente enterrados em profundidades entre 0,2 e 0,4 metros, o que é considerado ideal para o desenvolvimento da cultura (Gunarathna et al., 2018; Manikandan e Thiyagarajan, 2021).

A técnica de irrigação por gotejamento subsuperficial foi aplicada pela primeira vez na década de 60 em Israel (Marques et al., 2006). Segundo Oliveira e Simões (2021), essa técnica envolve a utilização de um sistema de mangueiras com emissores embutidos, que ficam enterradas abaixo da superfície do solo, permitindo que a água seja aplicada diretamente na região radicular e umedecendo apenas uma parte do volume do solo.

O sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial tem se mostrado adequado para o cultivo da cana-de-açúcar. Em 1959, na Estação Experimental de Plantadores de Cana-de-açúcar no Havaí, foram iniciados os primeiros testes de viabilidade de irrigação por gotejamento subsuperficial na cana-de-açúcar, e a implementação desse sistema em plantações comerciais começou na década de 70, e até o final de 1984, 45.400 mil hectares de cana-de-açúcar estavam sendo irrigados, dos quais 34.800 mil hectares utilizavam o gotejamento subsuperficial (Bui e Kinoshita, 1985).

No Brasil, o uso dessa tecnologia no cultivo da cana-de-açúcar começou em 1996, quando um experimento foi instalado na Usina São Martinho, em Pradópolis, São Paulo, cujo objetivo principal desses estudos foi avaliar o desempenho de variedades de cana-de-açúcar e sua capacidade de produção em resposta a diferentes lâminas de irrigação por gotejamento subterrâneo (Aguiar et al., 2002).

Em termos de eficiência, a irrigação por gotejamento subsuperficial é considerada a melhor entre todos os sistemas disponíveis, aplica água em baixas vazões, alta frequência e baixas pressões, garantindo a umidade do solo com variações mínimas próximas à capacidade de campo (Bufon et al., 2021; Paolinelli et al., 2021).

Em relação aos benefícios proporcionados pelo sistema, são inúmeras as vantagens, como baixa lixiviação, melhor eficiência no uso de nutrientes pelas plantas, redução da evaporação da água do solo, promoção do crescimento das culturas, aumento da produtividade, redução do crescimento de plantas daninhas, prevenção do acúmulo superficial de sal no solo (Wang et al., 2022). Além disso, aumenta a eficiência da aplicação de fertilizantes dissolvidos na água de irrigação, conhecida como fertirrigação, e permite a automação do sistema, reduzindo custos com mão de obra (Bufon et al., 2021; Fu et al., 2021).

A combinação de irrigação por gotejamento subsuperficial e fertirrigação é uma técnica benéfica para os produtores de cana-de-açúcar, por levar aumento da produtividade, resultando em rendimentos mais elevados e melhor qualidade do açúcar e do etanol (Manikandan e Thiagarajan, 2021). Isto é conseguido mantendo um ambiente mais favorável de umidade e nutrientes na zona radicular da planta, promovendo um crescimento adequado e otimizando a absorção de nutrientes, o que se traduz em benefícios tangíveis para a produção (Valentin et al., 2020).

Porém, é importante lembrar que, como qualquer sistema de irrigação, o sucesso da irrigação por gotejamento subsuperficial depende de um manejo adequado, incluindo a escolha

da profundidade de instalação e o controle preciso da aplicação de água e nutrientes (Cahn et al., 2024).

2.4. Manejo da Irrigação por pulsos

A busca por técnicas que aumentem a produtividade e a qualidade das culturas e, ao mesmo tempo, utilizem os recursos de forma eficiente, está se tornando cada vez mais importante. Neste contexto, Karmeli e Peri (1974) apresentaram a irrigação pulsada como uma técnica que permite alcançar uma taxa de irrigação relativamente baixa através da utilização de um dispositivo de irrigação com uma taxa de aplicação mais elevada. Os autores definiram a irrigação pulsada como uma série de ciclos, sendo que cada ciclo compreende duas fases: a fase de operação seguida pela fase de repouso ou inatividade.

Durante a fase de irrigação (funcionamento), as bombas liberam água, com quantidade e duração controladas para atender às necessidades específicas das culturas, na fase de repouso, o sistema é desligado, permitindo que o solo absorva e retenha a umidade enquanto as raízes das plantas absorvem água e nutrientes. Essa técnica se caracteriza pela repetição desses ciclos de irrigação e repouso, podendo sua frequência e duração ser ajustadas conforme as necessidades da cultura, condições climáticas e características do solo (Rank e Vishnu et al. 2021).

Num contexto mais recente, Almeida et al. (2018) definiram a irrigação pulsada como uma técnica intermitente que envolve a aplicação fracionada da lâmina de irrigação necessária para a cultura. Esta aplicação ocorre em pulsos, consistindo em “períodos de umedecimento” alternados com períodos em que nenhuma lâmina de irrigação é aplicada até que a lâmina diária necessária seja completamente fornecida.

A irrigação pulsada oferece benefícios para as culturas, especialmente em regiões com escassez de água. Uma das principais vantagens é a economia de água e energia. Neste sentido, algumas pesquisas já foram realizadas com o intuito de investigar estratégias de economia de água e energia na agricultura, e os resultados foram promissores no contexto da irrigação pulsada. García-Prats e Guillem-Picó (2016) observaram que a irrigação pulsada demonstrou potencial de economia de energia, com reduções de 10,67, 6,43 e 6,99% na capacidade de energia, no consumo de energia e nos custos de energia, respectivamente. Em outro estudo com foco no cultivo da batata, Abdelraouf et al. (2013) encontraram um aumento de 63,90% na

eficiência do uso da água com tratamentos pulsantes, resultando em economia de água de até 25% por ciclo de cultivo. Almeida et al. (2015), estudando o cultivo da alface, observaram que a irrigação pulsada permitiu uma economia de água de 25% sob condições descobertas e de até 50% quando foi utilizada cobertura plástica, contribuindo substancialmente para melhorar a eficiência hídrica na irrigação.

Em relação aos benefícios da irrigação pulsada, vários pesquisadores relataram efeitos positivos no aumento da produtividade, na melhoria da qualidade do produto, no aumento da eficiência da absorção de nutrientes e na redução do entupimento dos emissores em seus trabalhos de pesquisa. A exemplo de Abdelraouf et al. (2013) que conduziu um estudo sobre a aplicação de irrigação pulsada numa área de cultivo de batata no Cairo, Egito, e afirmaram que a tecnologia de irrigação subsuperficial pulsada é economicamente vantajosa para a produção de batata. Esta tecnologia aumenta a produtividade, melhora a qualidade do produto, economiza água e, em última análise, conduz a benefícios econômicos positivos para os agricultores.

Zamora et al. (2019) conduziram um experimento envolvendo o cultivo de coentro utilizando irrigação pulsada e contínua e constataram que as plantas irrigadas por pulsos tiveram melhor desempenho, exibindo maior produtividade de massa seca e fresca, maior teor de água na parte aérea e nas raízes, e maior índice de produção de massa na parte aérea. Também com a cultura do coentro, Menezes et al. (2020) observaram que a irrigação por gotejamento pulsado proporcionou uma distribuição mais uniforme de água e nutrientes no solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes para as plantas de coentro em comparação com a irrigação contínuo. Já Mohammadi et al. (2024) constataram melhorias no crescimento do milho, no peso dos grãos e no rendimento da silagem. Além disso, verificou-se que o aumento no número de pulsos e na duração dos ciclos de irrigação melhorou a distribuição de água no solo, beneficiando o rendimento da cultura e a produtividade de água.

No que diz respeito aos estudos acerca da irrigação pulsada atrelada a doses de nitrogênio, ainda são escassos na literatura. Porém, em seu estudo, sobre os impactos da irrigação pulsada associada a doses de nitrogênio na cultura do milho, Huang et al. (2018) constataram que a técnica da irrigação pulsada promoveu o aumento do desenvolvimento radicular das plantas.

Embora os estudos discutidos tenham focado em diversas culturas, é fundamental destacar o potencial da irrigação pulsada no cultivo da cana-de-açúcar. Nesse contexto, Menezes (2022), estudando os aspectos nutricionais, fisiológicos, de crescimento e produtivos

da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação por gotejamento pulsado e contínuo, destacou que a irrigação pulsada atenuou os efeitos adversos do déficit hídrico, promovendo incrementos nos aspectos nutricionais, fisiológicos, de crescimento e produtividade da cultura.

Apesar do exposto, evidencia-se que ainda existem muitas lacunas de pesquisa específica nesse contexto. Considerando as vantagens demonstradas em outras culturas, a aplicação desta técnica na cana-de-açúcar pode potencialmente oferecer benefícios semelhantes, contribuindo não só para o uso racional da água, mas também para a sustentabilidade econômica e ambiental deste importante setor agroindustrial.

2.5. Fertirrigação

A fertirrigação, termo derivado de “fertilizante” e “irrigação”, envolve a aplicação de fertilizantes dissolvidos na água de irrigação, seja por meio de um sistema aberto ou fechado, usando sistemas de aspersão, inundação ou gotejamento (Kumar Jain et al., 2020). Em termos mais simples, fertirrigação refere-se à prática de distribuição de fertilizantes líquidos por sistemas de irrigação (Feng et al., 2023).

Como os fertilizantes são fornecidos na forma líquida, sua distribuição e entrega estão diretamente ligadas ao padrão de umidade do solo (Vaddula e Singh, 2023). Esse método utiliza fertilizantes líquidos solúveis em água, resultando em um aumento significativo na eficiência do uso de fertilizantes, que pode chegar a até 90% (Çetin e Akalp, 2019).

A técnica de combinar água de irrigação com fertilizantes começou no final da década de 1960 em Israel e em 1970, Arscott relatou pela primeira vez que a ureia aplicada através do sistema de irrigação era mais eficaz do que a aplicação manual na superfície (Kumar Jain et al., 2020). No Brasil, a fertirrigação começou a ser implementada na década de 1980, após estudos realizados pela Embrapa Semiárido (Kumar Jain et al., 2020).

Atualmente, a fertirrigação evoluiu para um método de aplicação de fertilizantes altamente avançado e eficiente, com potencial na agricultura moderna, levando a rendimentos mais elevados e à melhoria da qualidade dos produtos agrícolas (Kumar Jain et al., 2020). Neste contexto, os sistemas de irrigação localizada, como a irrigação por gotejamento, permitem uma maior eficiência na utilização de água e fertilizantes (Karishma, 2021).

A aplicação de fertilizantes através da água de irrigação oferece diversas vantagens. Proporciona flexibilidade ao permitir o ajuste do fornecimento de nutrientes para satisfazer as necessidades variáveis da cultura ao longo do seu ciclo de crescimento, além disso, a

fertirrigação permite o controle de nutrientes móveis, como o nitrogênio, com base no volume de água fornecido, garantindo a disponibilidade imediata de nutrientes às plantas e assegurando uma distribuição uniforme por toda a área cultivada (Zafari et al., 2019). Além destes benefícios, a fertirrigação também aumenta a eficiência tanto na irrigação como na utilização de nutrientes, resultando na redução de custos (Zafari et al., 2019; Cheng et al., 2022; Wang et al., 2022).

Entre os fertilizantes à base de nitrogênio comumente utilizados na fertirrigação estão a ureia, sulfato de amônio, nitrato de amônio, MAP (fosfato monoamônico), nitrato de potássio, nitrato de cálcio e o nitrato de magnésio (Borges e Coelho, 2009). Os fertilizantes potássicos frequentemente empregados na fertirrigação incluem o cloreto de potássio branco (KCl), amplamente escolhido por sua alta solubilidade em água (Azevedo et al., 2014). Por outro lado, o fósforo, nutriente menos móvel no solo, é tradicionalmente aplicado via fundação (Vitti et al., 1994), devido seus processos físico-químicos (precipitação, adsorção e dessorção) (Souza Junior et al., 2023).

Entre as fontes de fósforo comumente utilizadas na fertirrigação, destacam-se o monofosfato de amônio purificado (MAP) e o ácido fosfórico (Vitti et al., 1994). Dentre esses nutrientes, o nitrogênio é amplamente utilizado na fertirrigação devido ao seu alto potencial de lixiviação e volatilização no solo quando aplicado convencionalmente, permitindo redução potencial de até 30% na fertilização nitrogenada quando aplicada através da água de irrigação. (Cunha et al., 2019).

A cana-de-açúcar, devido ao seu longo ciclo de cultivo, possui demanda por água e nutrientes. Por esta razão, foram propostas técnicas e soluções de gestão que podem levar à economia na utilização de fertilizantes e água, ao mesmo tempo que melhoram indicadores agrícolas importantes, como o rendimento das culturas (Delbaz et al., 2023). Uma dessas soluções essenciais é o uso da fertirrigação durante seu cultivo.

2.6. Aspectos fisiológicos

A cana-de-açúcar é uma cultura economicamente importante utilizada como fonte produtiva e sustentável de matéria-prima para a produção de açúcar e biocombustíveis em todo o mundo (Lopes Souza et al., 2022). É uma planta com metabolismo fotossintético C₄, assim chamada porque forma o primeiro composto orgânico estável com quatro carbonos (Lacerda et al., 2019).

As espécies de plantas C4 diferem das espécies C3 através de um mecanismo de concentração de carbono, onde o CO₂ é inicialmente fixado em uma molécula de quatro carbonos nas células do mesófilo e depois transportado para as células da bainha do feixe (Lee et al., 2023). Ali, a molécula de quatro carbonos é descarboxilada, liberando CO₂ para fixação pela RUBISCO, enzima inicial do ciclo fotossintético C3 (Furbank et al., 2000; Lee et al., 2023).

Porém, o comportamento vegetativo da cana-de-açúcar é dependente de fatores climáticos, como variações de temperatura, disponibilidade hídrica e intensidade luminosa, influenciando seu desenvolvimento fenológico, afetando a produtividade (Silva et al., 2010). A escassez de água é um dos principais estresses abióticos que impactam negativamente o crescimento, o desenvolvimento e a produção da cana-de-açúcar em regiões áridas e semiáridas (Garcia et al., 2021; Yasmin e Chakraborty, 2023). A redução do crescimento das plantas está diretamente ligada à diminuição das trocas gasosas (Yenni et al., 2022), sendo a fotossíntese particularmente sensível ao estresse hídrico (Natarajan et al., 2021). Após a exposição à seca, observa-se declínio nas taxas fotossintéticas e na condutância estomática na cana-de-açúcar (Dinh et al., 2019; Leanasawat et al., 2021).

Uma das respostas imediatas ao estresse hídrico é a redução do potencial hídrico nos tecidos vegetais, resultando no fechamento dos estômatos (Dhansu et al., 2022). Isso, por sua vez, leva a uma diminuição nas taxas de transpiração e fotossíntese. O fechamento estomático é responsável por limitar as trocas gasosas entre a câmara subestomática e a atmosfera, causando diminuição da transpiração e difusão de CO₂ para o interior da folha, essencial para a fotossíntese (Crusciol et al., 2010; Klein et al., 2021).

A água desempenha um papel principal nos processos fisiológicos das plantas. Quando a capacidade de absorção de água diminui, a condutância estomática também diminui, evitando a perda excessiva de água pela planta (Dhansu et al., 2022). Esta ação limita a quantidade de CO₂ que pode entrar pelos estômatos (Dhansu et al., 2022). A seca afeta diversas características fisiológicas da cana-de-açúcar, incluindo conteúdo relativo de água, condutância estomática (*gs*), eficiência fotoquímica e taxa fotossintética (Khonghintaiong et al., 2018).

Conforme Dinh et al. (2017), as fases de perfilhamento e crescimento da cana-de-açúcar destacam-se como as mais críticas em termos de deficiência hídrica, devido à substancial demanda hídrica necessária para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Segundo Silva et al. (2020b), a disponibilidade limitada de água leva ao fechamento dos estômatos da cana-

de-açúcar, resultando na redução do potencial hídrico, do teor de água e da taxa de assimilação de CO₂. Isso, por sua vez, impacta negativamente o perfilhamento e a área foliar da cana-de-açúcar, levando à indução de senescência e à diminuição da taxa de crescimento do colmo e do desenvolvimento geral da cultura.

2.7. Extração e exportação de nutrientes pela cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância econômica para diversos países, especialmente para o Brasil, onde é amplamente cultivada, desempenhando papel fundamental tanto na produção de açúcar e álcool quanto na geração de energia (Zheng et al., 2022). Durante seu processo de crescimento e desenvolvimento, a cana-de-açúcar extrai do solo grande quantidade de nutrientes para atender às suas atividades metabólicas, como biomassa seca e produção de sacarose (Oliveira et al., 2018; Vennila et al., 2021).

A quantidade de nutrientes extraídos do solo é influenciada por vários fatores, incluindo variedade de plantas, condições climáticas e do solo, práticas de manejo, disponibilidade de nutrientes, bem como o ciclo de crescimento da cultura (Ceotto e Castelli, 2002; Benett et al., 2013). A cana-de-açúcar possui grande demanda por nutrientes, principalmente nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio e magnésio.

O nitrogênio é o segundo elemento mais requerido pela cana-de-açúcar, sendo essencial para o crescimento, desenvolvimento vegetativo, produtividade e qualidade da produção (Costa et al., 2019; Stacciarini et al., 2021). A maioria dos estudos mostra que a fertilização com nitrogênio aumenta a produtividade das culturas. Porém, o manejo inadequado do nitrogênio pode levar à lixiviação desse nutriente, o que, por sua vez, pode causar impactos ambientais negativos (Xia et al., 2020). Portanto, equilibrar o uso de fertilizantes na agricultura é essencial para otimizar a produção agrícola e, ao mesmo tempo, mitigar os impactos ambientais.

O potássio é um nutriente essencial para a cana-de-açúcar, sendo fundamental no perfilhamento, crescimento vegetativo, suporte à fixação de nitrogênio, armazenamento de açúcar e na regulação do metabolismo da planta (Jaiswal et al., 2021). Além disso, o potássio participa de vários processos fisiológicos das plantas, incluindo germinação e emergência de sementes, regulação estomática, transporte do floema, equilíbrio cátion-ânion, síntese de proteínas, fotossíntese, transferência de energia, osmorregulação, equilíbrio de nutrientes e resistência ao estresse (Marschner, 2012; Tu et al., 2017).

É importante ressaltar que o potássio é o elemento mais exportado, principalmente pela cana-soca, e tem potencial de lixiviação significativa, principalmente quando aplicado em solos arenosos, conforme destacado por Monteiro et al. (2017).

O fósforo (P) é outro nutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento adequado das plantas. No entanto, a sua lenta mobilidade no solo dificulta a absorção pelas raízes, o que, por sua vez, dificulta o crescimento e o metabolismo das plantas (Tariq et al., 2017; Verma et al., 2021). Estudos anteriores indicaram que o fósforo contribui para o aumento do desenvolvimento radicular e a sua deficiência agrava a escassez de água durante a irrigação (Sardans e Penuelas, 2012). A aplicação de fósforo no solo ajuda a combater essa deficiência, fortalece a capacidade das plantas de lidar com o estresse e leva a ajustes nas atividades morfológicas, fisiológicas e bioquímicas que regulam o desempenho das plantas (Cortina et al., 2013; Tariq et al., 2017; Verma et al., 2021).

Além dos macronutrientes citados anteriormente, a cana-de-açúcar também necessita de cálcio e magnésio. Embora sejam normalmente considerados macronutrientes secundários, estudos demonstraram que tanto o cálcio como o magnésio podem ser absorvidos pelas culturas em quantidades comparáveis ou mesmo maiores que o nitrogênio e o fósforo, respectivamente. A exemplo de Oliveira et al. (2018) que estudando 11 variedades de cana-de-açúcar de alta produtividade, o cálcio foi extraído em média 226 kg ha^{-1} , superando a extração de nitrogênio, que ficou em torno de 179 kg ha^{-1} , e o magnésio foi extraído em média 87 kg ha^{-1} , ultrapassando a extração de fósforo, que foi de aproximadamente 25 kg ha^{-1} .

A cana-de-açúcar tem uma demanda significativa tanto por macronutrientes quanto por micronutrientes. Conforme destacado por Jaiswal et al., (2021), a colheita de 100 toneladas de cana-de-açúcar retira do solo 208, 53 e 280 kg ha^{-1} de NPK, respectivamente, além de consumir 30, 3,4, 1,2 e $0,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de S, Fe, Mn, Cu, respectivamente. Dessa forma, fica evidente que a cultura da cana-de-açúcar extrai uma quantidade superior de potássio em comparação ao nitrogênio. No estudo realizado por Oliveira et al. (2010) sobre variedades de cana-de-açúcar irrigada, foram identificados valores médios de extração e exportação de nutrientes. Os resultados revelaram que a cultura extraiu, em média, 179, 25, 325, 226 e 87 kg ha^{-1} e exportou 92, 15, 188, 187 e 66 kg ha^{-1} de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.

Salviano et al. (2017) avaliando o acúmulo e a exportação de macronutrientes pela cana-de-açúcar encontraram a seguinte ordem decrescente $K > N > Ca > S > P > Mg$ de extração. No que diz respeito aos micronutrientes, Orlando Filho et al. (2001) obtiveram ordem decrescente

de acúmulo: Fe > Mn > Zn. Por outro lado, Benett et al. (2013), em seus estudos com micronutrientes, obtiveram a seguinte ordem decrescente: Fe > Mn > Zn > B, com um acúmulo médio de 1,40, 1,28, 0,76 e 0,44 kg ha¹, respectivamente.

Menezes (2022), analisando a extração e exportação de nutrientes da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua, identificaram, para a cultivar RB041443, a seguinte ordem decrescente de extração e exportação de nutrientes: K > Ca > N > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > Cu.

2.8. Nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar

2.8.1. Adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (cana-soca)

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes mais importantes para o crescimento da planta, absorvido principalmente na forma de nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺) (Shilpha et al., 2023). A maioria desse nutriente é absorvido por fluxo de massa (99%) e interceptação do sistema radicular (1%) (Malavolta et al., 1997).

A cana-soca é particularmente responsiva à adubação nitrogenada, e sua demanda por esse nutriente é maior em comparação à fase da cana-planta (Schultz et al., 2015). No Brasil, as taxas de aplicação de N variam de 80 a 150 kg por hectare para soca de cana-de-açúcar, embora essas taxas possam parecer moderadas individualmente, dadas as extensas áreas de cultivo, a quantidade total de fertilizantes aplicados, principalmente à base de nitrogênio, torna-se significativa (Nunes Junior et al., 2005). De acordo com Silveira (2020), a aplicação do N nas soqueiras é realizada aproximadamente 30 a 40 dias após o corte e visa repor o N exportado com os colmos.

As condições da fase soqueira favorecem a absorção eficiente de nitrogênio pelas plantas devido ao seu estágio avançado de crescimento, resultando em raízes mais desenvolvidas e capazes de absorver nutrientes, inclusive nitrogênio, outrossim, a presença de resíduos culturais no solo após a colheita permite a liberação gradual de nutrientes, disponibilizando-os por um período prolongado (Penatti, 2013).

No entanto, é importante notar que parte do nitrogênio pode ser retido pelos resíduos culturais deixados no solo após a colheita mecanizada (Degaspari et al., 2020). Portanto, considerar a fertirrigação com nitrogênio para soca de cana-de-açúcar é fundamental para garantir a disponibilidade adequada desse nutriente às plantas e maximizar sua absorção (Cesar Vitti et al., 2011; Siqueira et al., 2015).

Diversos estudos demonstram o impacto positivo da adubação nitrogenada no crescimento e na produtividade da cana-soca. Silva e Prado (2021), por exemplo, identificaram melhorias significativas nas variáveis de crescimento, como a altura das plantas, com aplicação de 88 kg ha⁻¹ de N. Da mesma forma, Bastos et al. (2017) constataram aumento da altura dos colmos, na segunda soca, quando aplicaram 120 kg ha⁻¹ de N.

Castro et al. (2019) constataram que as doses de nitrogênio que proporcionaram maior produtividade da cana-de-açúcar foram 122 e 144 kg ha⁻¹ de N no primeiro e segundo ciclo da cana-soca, respectivamente. Nesse sentido, a fertilização com N vem ganhando destaque como uma prática cultural que merece mais investigação no contexto do cultivo da cana-de-açúcar. Porém, é importante destacar que estudos relacionados às doses de N costumam produzir resultados variados, como visto em pesquisas anteriores (Silva e Prado, 2021).

A escolha da fonte de N é importante, considerando os desafios da incorporação de N devido à espessa camada de resíduos da colheita da cana ao longo dos anos (Degaspari et al., 2020). O nitrato de cálcio e o amônio são preferidos devido às menores perdas de amônia em comparação com a ureia. A ureia, embora mais econômica, enfrenta desafios devido à volatilização da amônia quando aplicada na superfície do solo (Boschiero et al., 2020).

A cana-de-açúcar apresenta baixa eficiência de uso de nitrogênio (EUN), com produtividades variando de 0,25 a 0,9 Mg de colmo por kg de N aplicado (Otto et al., 2016; Thorburn et al., 2017). Uma estratégia para melhorar a EUN em soqueiras é a sincronização entre o fornecimento de fertilizante nitrogenado e a demanda nutricional da planta, selecionando a quantidade adequada e o momento preciso de aplicação (Bowles et al., 2018; Castro et al., 2022).

O ajuste da quantidade de nitrogênio com base no momento e método de aplicação do fertilizante tem mostrado resultados promissores no aumento da produtividade da cana-de-açúcar (Otto et al., 2016; Borges et al., 2019). Além disso, identificar a dose ideal de N a ser aplicada na cultura é essencial para garantir o melhor retorno econômico do investimento em fertilizantes e minimizar as perdas de N para o meio ambiente (Castro et al., 2019, 2022).

2.8.2. Interação entre irrigação e nitrogênio na cana-de-açúcar

Segundo Yingying et al. (2015) a água e a fertilização constituem os fatores preponderantes que determinam o crescimento das culturas, exercendo impacto significativo no

rendimento, qualidade e eficiência do uso de água e fertilizantes, sobretudo no cultivo de cana-de-açúcar. A água, enquanto recurso de extrema importância para o desenvolvimento vegetal, é essencial em diversos processos fisiológicos, incluindo o processo fotoquímico da fotossíntese, bem como no transporte e absorção de nutrientes, tornando-se assim um elemento indispensável ao desenvolvimento das plantas (Campos et al., 2021).

Por outro lado, o nitrogênio assume papel fundamental como componente chave na formação de proteínas, aminoácidos, enzimas, vitaminas, clorofila e demais constituintes celulares (Paixão et al., 2020). Todos esses elementos são essenciais para o crescimento, desenvolvimento e diversas alterações fisiológicas e metabólicas nas plantas. Considerando a crescente limitação tanto do N quanto da água nos solos em escala global, os fertilizantes à base de nitrogênio e a prática de irrigação assumem um papel fundamental nos esforços da agricultura moderna em atingir o potencial produtivo das culturas (Araújo et al., 2020).

Para a cultura da cana-de-açúcar, Costa et al. (2019) observaram que, associada à irrigação, a adubação nitrogenada é uma alternativa relevante para aumentar a produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Segundo Dellabiglia et al. (2018) além do aumento da produtividade que exige água adequada, também necessita de abastecimento nutricional, principalmente de N, e essa oferta nutricional tem efeito direto na brotação e no perfilhamento, influenciando a capacidade de produção da cultura em termos de colmo e açúcar.

No Brasil e no mundo já foram realizados diversos estudos sobre os efeitos da interação entre irrigação e adubação nitrogenada no desempenho da cultura da cana-de-açúcar. A exemplo de Mendonça et al. (2020) que estudando o efeito da aplicação de lâminas de irrigação atrelada a doses de nitrogênio sobre a produtividade dos colmos de duas variedades de cana-de-açúcar constataram com $120,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de N combinada com a aplicação da lâmina de irrigação correspondente a 1.266,6 mm ocasionou a obtenção de maior produtividade dos colmos.

Em seu estudo sobre o desenvolvimento da cana-de-açúcar e o rendimento final de álcool e açúcar em função da adubação nitrogenada com diferentes reposições hídricas, utilizando irrigação por gotejamento subsuperficial, Silva et al. (2020c) destacaram que aumento da reposição hídrica combinada com adubação nitrogenada proporciona incrementos de aproximadamente 10% no número de entrenós da cana-de-açúcar e promoveu aumento linear do rendimento bruto de açúcar e de álcool.

Em outra análise, agora sobre biomassa e acúmulo de nitrogênio na parte aérea da cana-de-açúcar, Kölln et al. (2023) verificaram que a fertilização nitrogenada combinada com a água

de irrigação aumentou o acúmulo de biomassa e N na parte aérea da cana-de-açúcar, bem como, os parâmetros biométricos, fisiológicos e de produção da cultura.

Por outro lado, o estudo de Costa et al. (2019) enfatizam a importância da irrigação e da aplicação de doses crescentes de N na produtividade e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Os resultados constataram que a associação desses dois fatores levou a um aumento no rendimento de colmos e na produção de açúcar.

5. REFERÊNCIAS

- Abdelraouf, R. E., Abou-Hussein, S. D., Marzouk, N. M., Elbegawy, M. KH. Effect of pulse drip irrigation technology on the economical parameters of potato production under organic agriculture. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 9, n. 1, p. 601-611, 2013. <https://dx.doi.org/10.4236/as.2013.45036>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. ATLAS IRRIGAÇÃO. Uso da Água na Agricultura Irrigada. Brasília: ANA, p. 38, 2017. <https://www.ana.gov.br>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na região Centro-Sul do Brasil. Brasília: ANA, p. 31, 2017. <http://www.ana.gov.br>
- Aguiar, F. Gotejamento enterrado é novidade na irrigação da cana. – Boletim 200 Agriannual. Boletim 200. 7ª Ed. São Paulo. Agriannual, 2002. 452p. (Boletim IAC, nº 200)
- Ali, S. E., Yuan, Q., Wang, S., Farag, M. A. More than sweet: A phytochemical and pharmacological review of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Food Bioscience*, v. 44, n. 10, p. 101431-101431, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101431>
- Almeida Silva, M., Espinoza Véliz, J. G., Pereira Sartori, M. M., Luiz Santos, H. Glyphosate applied at a hormetic dose improves ripening without impairing sugarcane productivity and ratoon sprouting. *Science of the Total Environment*, v. 806, p. 150503, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150503>
- Almeida, H. J., Pancelli, M. A., Prado, R. M., Cavalcante, V. S., Cruz, F. J. R. Effect of potassium on nutritional status and productivity of peanuts in succession with sugarcane. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* v. 15, n. 1, p. 1-10, 2015. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000001>
- Almeida, W. F., Paz, V. P. S., Jesus, A. P. C., Silva, J. S., Gonçalves, K. S., Oliveira, A. S. Yield of green beans subjected to continuous and pulse drip irrigation with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 7, p. 476-481, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p476-481>
- Alves, L. Q., Franco, P. N., Zanetti, W. A. L., Góes, B. C. Desempenho da produção da cultura de cana-de-açúcar nos principais estados produtores. *Revista Brasileira de Engenharia de*

- Biosistemas, v. 1, n. 2, p. 303-317, 2021. <https://doi.org/10.18011/bioeng2021v15n2p303-317>
- Araújo, R., Alves, J., Casaroli, D., Evangelista, A. W. P. Variation in the sugar yield in response to drying-off of sugarcane before harvest and the occurrence of low air temperatures. *Bragantia*, v. 75, n. 1, p. 118-127, 2016.
- Araújo, V., Swift, J., Alvarez, J. M., Henry, A., Coruzzi, G. M. A balancing act: how plants integrate nitrogen and water signals. *Journal of Experimental Botany*, v. 71, n. 15, p. 4442-4451, 2020. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa054>
- Arshad, W. R., Ehsan, M., Aslam, Z. Expolring ratoon prospective of sugarcane varieites/clones at toba tek singh. *Pakistan Sugar Journal*, v. 34, n. 3, p. 12-15, 2020.
- Azevedo, B. M. de, Fernandes, C. N. V., Amargo, D. C., García, A. C., Viana, T. V. de A., Campêlo, A. R. Fertirrigação potássica do cajueiro com diferentes fontes e formas de diluição do cloreto de potássio. *Irriga*, v. 19, n. 2, p. 325-332, 2014. <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n2p325>
- Babu, D., K. S., Janakiraman, V., Palaniswamy, H., Kasirajan, L., Gomathi, R., Ramkumar, T. R. A short review on sugarcane: its domestication, molecular manipulations and future perspectives. *Genetic Resources and Crop Evolution*, v. 69, n. 8, p. 2623-2643, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01430-6>
- Bastos, A., Teodoro, J., Teixeira, M., da Silva, E., Costa, D., Bernardino, M. Efeitos da adubação nitrogenada e potássica no crescimento da cultura da cana-de-açúcar segunda soca. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 40, n. 3, p. 554-566, 2017. <https://doi.org/10.19084/rca17052>
- Benett, C. G. S., Buzetti, S., Benett, K. S. S., Filho, M. C. M. T., Costa, N. R., Maeda, A. S., Andreotti, M. Acúmulo de nutrientes no colmo de cana-de-açúcar em função de fontes e doses de manganês. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 34, n. 3, p. 1077-1088, 2013. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n3p1077>
- Borges, A. L., Coelho, E. F. Fertirrigação em fruteiras tropicais. In: Silva, D. J., Borges, A. L. *Fertilizantes para fertirrigação. Cruz das Almas – BA, 2009. Cap. 2, p. 20-36.*
- Borges, C. D., Carvalho, J. L. N., Kölln, O. T., Sanches, G. M., Silva, M. J., Castro, S. G. Q., Castro, S. A. Q., Sousa, L. L., Oliveira, J. V. C., Cantarella, H., Vargas, V. P., Tsai, S. M.,

- Franco, H. C. J. Can alternative N-fertilization methods influence GHG emissions and biomass production in sugarcane fields?. *Biomass and Bioenergy*, v. 120, p. 21-27, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.017>.
- Boschiero, B. N., Mariano, E., Torres-Dorante, L. O., Sattolo, T. M. S., Otto, R., Garcia, P. L., Dias, C. T. S., Trivelin, P. C. O. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 117, n. 3, p. 367-382, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10074-w>
- Bowles, T. M., Atallah, S. S., Campbell, E. E., Gaudin, A. C. M., Wieder, W. R., Grandy, A. S. Addressing agricultural nitrogen losses in a changing climate. *Nature Sustainability*, v. 1, n. 8, p. 399-408, 2018.
- Budeguer, F., Enrique, R., Perera, M. F., Racedo, J., Castagnaro, A. P., Noguera, A. S., Welin, B. Genetic transformation of sugarcane, current status and future prospects. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 768609, 2021. <https://doi:10.3389/fpls.2021.768609>
- Bufon, B. V., Maia, F. C. de O., Pereira, R. M. Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: métodos, recomendações e resposta produtiva. In: Paolinelli, A., Dourado Neto, D., Mantovani, E. C. Em Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura, Piracicaba: ESALQ, 2021. Cap. 26, p. 563-591.
- Bui, W., Kinoshita, C. M. Has drip irrigation in Hawaii lived up to expectations? In: *International Drip/Trickle Irrigation Congress, 3., 1895, Fresno. Proceedings.* Fresno: American Society of Agricultural Engineers, 1985. p.84-9.
- Campos, A. J. M., Santos, S. M., Nacarath, I. R. F. F. Water stress in plants: a review. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 15, p. 1-7, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>
- Cahn, M., Robert Hutmacher, R. Subsurface drip irrigation. In Ayars, J.E., Zaccaria, D., Bali, K.M. *Microirrigation for Crop Production Design, Operation and Management*, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2024; cap. 8, p. 257-301.
- Carminati, H. B., Milão, R. de F. D., de Medeiros, J. L., Araújo, O. Q. F. Bioenergy and full carbon dioxide sinking in sugarcane-biorefinery with post-combustion capture and storage: Techno-economic feasibility. *Applied Energy*, v. 254, p. 113633, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113633>

- Castro, S. G. Q., Magalhães, P. S. G., de Castro, S. A. Q., Kölln, O. T., Franco, H. C. J. Optimizing nitrogen fertilizer rates at distintas in-season application moments in sugarcane. *International Journal of Plant Production*, v. 16, n. 1, 137-152, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00175-z>
- Castro, S. G. Q., Neto, J. R., Kölln, O. T., Borges, B. M. M. N., Franco, H. C. J. Decision-making on the optimum timing for nitrogen fertilization on sugarcane ratoon. *Scientia Agricola*, v. 76, n. 3, 237-242, 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0365>
- Ceotto, E., Castelli, F. Radiation-use efficiency in flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.): response to nitrogen supply, climatic variability and sink limitations. *Field Crops Research*, v. 74, n. 2, p. 117-130, 2002.
- Cesar Vitti, A., Franco, C. J., Trivelin, C. O., Ferreira, P. A., Otto, D., Fortes, C., Faroni, E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n. 3, p. 287-293, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000300009>
- Çetin, O., Akalp, E. Efficient Use of water and fertilizers in irrigated agriculture: drip irrigation and fertigation. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, v. 22, n. 2, p. 97-102, 2019. <https://doi.org/10.2478/ahr-2019-0019>
- Cheng, H., Yu, Q., Abdalhi, M. A. M., Li, F., Qi, Z., Zhu, T., Cai, W., Chen, X., Feng, S. RZWQM2 simulated drip fertigation management to improve water and nitrogen use efficiency of maize in a solar greenhouse. *Agriculture*, v. 12, n. 5, p. 672, 2022. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050672>
- Coelho, A. P., Dalri, A. B., Landell, E. P. A., Fischer Filho, J. A., Libardi, L. G. P., Bettiol, J. V. T., Faria, R. T., Palaretti, L. F. Productivity, technological attributes and water use efficiency of sugarcane cultivars under regulated deficit irrigation. *Journal of Agricultural Science*, v. 10, n. 7, p. 174, 2018. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n7p174>
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Quarto Levantamento: Safra 2022/2023. CONAB, Brasília, Brasil, v. 10, n. 4, 2023.

- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Primeiro Levantamento: Safra 2024/2025. CONAB, Brasília, Brasil, v. 12, n. 1, 2024.
- Cortina, J., Vilagrosa, A., Trubat, R. The role of nutrients for improving seedling quality in drylands. *New Forests*, v. 44, n. 5, p. 719-732, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9379-3>
- Costa, A. R. F. C., Rolim, M. M., Simões Neto, D. E., Silva, M. M., Silva, G. F., Pedrosa, E. M. R. Productivity and technological quality sugarcane submitted to different water depths and nitrogen doses. *Irriga*, v. 24, n. 1, p. 38-53, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p38-53>
- Crusciol, C. A. C., Silva, M. A., Rossetto, R., Soratto, R. P. Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar. In: Silva, M. A., Santos, C. M., Arantes, M. T., Pincelli, R. P. Fenologia da Cana-de-Açúcar. Botucatu: FEPAF, 2010. Cap. 1, p. 8-21.
- Cunha, F. N., Teixeira, M. B., Rodrigues, C. R., Moraes, G. S., Silva, I. O. F., Alves, D. K. M. Uniformidade de irrigação por gotejamento sob fertirrigação com fontes de nitrogênio. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 12, n. 7, p. 3118-3128, 2019. <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n7001006>
- Dantas Neto, J., Jorge L. C., Figueredo, C. H. A. F., Azevedo, H. M, Azevedo, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.
- 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 N₂O and NH₃ in sugarcane. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 116, n. 3, p. 329-344, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10045-w>
- Delbaz, R., Ebrahimian, H., Abbasi, F., Ghameshlou, A. N., Liaghat, A., Ranazadeh, D. A global meta-analysis on surface and drip fertigation for annual crops under different fertilization levels. *Agricultural Water Management*, v. 289, p.108504, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108504>

- Dellabiglia, W. J., Castro Gava, G. J., Arlanch, A. B., Boas, R. L. V., Cantarella, H., Rossetto, R. Produtividade de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de N e inoculadas com bactérias diazotróficas. *Irriga*, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2018.
- Dhansu, P., Kumar Raja, A., Vengavasi, K., Kumar, R., Pazhany, A. S., Kumar, A., Kumar, N., Mann, A., Pandey, S. K. Physiological and molecular adaptation of sugarcane under drought vis-a-vis root system traits. In: *Drought-Impacts and Management*, 2022. Cap. 87, p. 300. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.103795>
- Dingre, S. K. Enhancing sugarcane productivity through scientific irrigation water Management in western India. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B- Biological Sciences*, v. 93, n. 2, p. 301-309, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40011-022-01422-7>
- Dinh, T. H., Takaragawa, H., Watanabe, K., Nakabaru, M., Kawamitsu, Y. Leaf Photosynthesis response to change of soil moisture content in sugarcane. *Sugar Tech*, v. 21, n. 6, p. 949-958, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00735-8>
- Dinh, T. H., Watanabe, K., Takaragawa, H., Nakabaru, M., Kawamitsu, Y. Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. *Plant Production Science*, v. 20, n. 4, p. 412-422, 2017. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>
- Diola, V., Santos, F. Fisiologia. In: Santos, F.; Borém, A.; Caldas, C. Eds. *Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool - tecnologia e perspectivas*. Viçosa: UFV, 2010. Cap. 4, p. 24-49. doi.org/10.1071/CP15009
- FAO - Food and Agriculture Organization of The United Nation. FAOSTAT: statistical database. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. <https://doi.org/10.1787/flb0b29c-en>
- FAO - Food and Agriculture Organization of The United Nation. FAOSTAT: statistical database. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Accessed 23 May 2021.
- Feng, X. Y., Pu, J. X., Liu, H. J., Dan, W. A. N. G., Liu, Y. H., Qiao, S. T., Liu, R. H. Effect of fertigation frequency on soil nitrogen distribution and tomato yield under alternate partial

- root-zone drip irrigation. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 22, n. 3, p. 897-907, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.09.002>
- Fu, B., Li, Z., Gao, X., Wu, L., Lan, J., Peng, W. Effects of subsurface drip irrigation on alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth and soil microbial community structures in arid and semi-arid areas of northern China. *Applied Soil Ecology*, v. 159, p. 103859, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103859>
- Furbank, R. T., Hatch, M. D., Jenkins, C. L. D. C4 photosynthesis: mechanism and regulation. In: Leegood, R. C., Sharkey, T. D., Von, C. S. *Photosynthesis: physiology and metabolism*. Netherlands: Academic Publishers, 2000, Cap. 3, p. 435-457.
- Garcia, F. H. S., Rodrigues, M., Pennacchi, J. P., Chagas Mendonça, A. M., Gonçalves, D. A. R., Melo, N. C., Barbosa, J. P. R. A. D. Sugarcane resilience to recurrent water deficit is dependent on the systemic acclimation of leaf physiological traits. *Tropical Plant Biology*, v. 14, n. 4, p. 408-418, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12042-021-09303-5>
- García-Prats, A., Guillem-Picó, S. Adaptation of pressurized irrigation networks to new strategies of irrigation management: Energy implications of low discharge and pulsed irrigation. *Agricultural Water Management*, v. 169, p. 52-60, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.023>
- Giolo, R., Rodrigues, R., Galati, V. C., Barbara, M., Vrech, M. A. O uso de estimulante afeta ou não o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar. *Scientific Electronic Archives*, v. 14, n. 3, p. 46-52, 2021. <https://doi.org/10.36560/14320211210>
- Gunarathna, M. H. J. P., Sakai, K., Nakandakari, T., Momii, K., Onodera, T., Kaneshiro, H., Uehara, H., Wakasugi, K. Optimized subsurface irrigation system: The future of sugarcane irrigation. *Water (Switzerland)*, v. 10, n. 3, p. 334, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10030314>
- Hasner, C., Lima, A. A. Winter, E. Technology advances in sugarcane propagation: A patent citation study. *World Patent Information*, v. 56, n. 2, p. 9-16, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2018.09.001>
- Huang, L., Yang, P., Ren, S., Cui, H. Effects of continuous and pulse irrigation with different nitrogen applications on soil moisture, nitrogen transport and accumulation in root systems. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 11, n. 5, p. 139-149, 2018. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181105.3674>

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html> Acesso em: 22 de novembro de 2023.
- Jaiswal, V. P., Shukla, S. K., Sharma, L., Singh, I., Pathak, A. D., Nagargade, M., Ghosh, A., Gupta, C., Gaur, A., Awasthi, S. K., Tiwari, R., Srivastava, A., Masto, E. Potassium influencing physiological parameters, photosynthesis and sugarcane yield in subtropical india. *Sugar Tech*, v. 23, n. 2, p. 343-359, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00905-z>
- Kane, A. O., Pellerini, V. O. A., Espírito Santo, M. C., Ngom, B. D., García, J. M., Acevedo, A., Erazzú, L. E., Polikarpov, I. Evaluating the potential of culms from sugarcane and energy cane varieties grown in Argentina for second-generation ethanol production. *waste and Biomass Valorization*, v. 13, n. 1, p. 329-343, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01528-5>
- Karishma, S. “Drip Irrigation System”. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, v. 10, n. 6, p. 277, 2021.
- Karmeli, D., Peri, G. Basic principles of pulse irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, v. 100, n. 3, p. 309-319, 1974. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000988>.
- Khan, Q., Qin, Y., Guo, D. J., Zeng, X. P., Chen, J. Y., Huang, Y. Y., Ta, Q. K., Yang, L. T., Liang, Q., Song, X. P., Xing, Y. X., Li, Y. R. Morphological, agronomical, physiological and molecular characterization of a high sugar mutant of sugarcane in comparison to mother variety. *PLoS ONE*, v. 17, n. 3, p.e0264990, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264990>
- Khonghintaisong, J., Songsri, P., Toomsan, B., Jongrunklang, N. Rooting and physiological trait responses to early drought stress of sugarcane cultivars. *Sugar Tech*, v. 20, n. 4, p. 396-406, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0564-0>
- Kirham, M. B., Phillips, R. L., Scow, K. M., Hartemink, A. E. Advances in agronomy. In: Sidhu, R. K., Kumar, R., Rana, P. S., Jat, M. L. Automation in drip irrigation for enhancing

- water use efficiency in cereal systems of South Asia: Status and prospects. Estados Unidos, 2021. Cap. 6, v. 167, p. 247-300.
- Klein, J., Rampim, L., Kestring, D., Guimarães, V. F., Rodrigues, J. D. Influência de protetores físicos coloridos nas trocas gasosas em mudas de canafístula [*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub] seedlings. *Ciência Florestal*, v. 26, n. 3, 2016. <https://doi:10.5902/1980509824208>
- Kölln, O. T., Castro Gava, G. J., Mariano, E., Cantarella, H., Panutti, L. E., Uribe, R. M., Arlanch, A. B., Paludetto, A., Pereira, C. D., Trivelin, P. C. O. Biomass accumulation and growth curve in sugarcane fertigated with nitrogen doses. *Australian Journal of Crop Science*, v. 17, n. 3, 244-253, 2023. <https://doi.org/10.21475/AJCS.23.17.03.P3079>
- Kumar, J. L., Prasad, P. H., Jain, L., Parewa, H., Choudhary, A. Fertigation: A way to Achieve Sustainability. *Indian Journal of Plant and Soil*, v. 7, n. 2, p. 65-72, 2020. <https://doi.org/10.21088/ijps.2348.9677.7120.9>
- Lacerda, S. A. R., de Souza, A. R., dos Santos, T. M., Clemente, J. M., Duarte, A. R., Machado, M. G. Produtividade da cana-de-açúcar em resposta a adubação NPK em diferentes épocas. *Humanidades e Tecnologia em Revista*, v. 18, n. 1, p. 45-51, 2019.
- Leanasawat, N., Kosittrakun, M., Lontom, W., & Songsri, P. Physiological and agronomic traits of certain sugarcane genotypes grown under field conditions as influenced by early drought stress. *Agronomy*, v. 11, n. 11, p. 2319, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112319>
- Lee, M. S., Boyd, R. A., Boateng, K. A., Ort, D. R. Exploring 3D leaf anatomical traits for C4 photosynthesis: chloroplast and plasmodesmata pit field size in maize and sugarcane. *New Phytologist*, v. 239, n. 2, p. 506-517, 2023. <https://doi.org/10.1111/nph.18956>
- Leite, M. R. L. Desempenho agrônômico e digestibilidade ruminal de genótipos de cana-de-açúcar cultivados em regime de sequeiro. 2018. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha – MA. 2018.
- Li, X., Kang, Y. Agricultural utilization and vegetation establishment on saline-sodic soils using a water-salt regulation method for scheduled drip irrigation. *Agricultural Water Management*, v. 231, p. 16-30, n. 11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105995>
- Li, Y., Abegunrin, T. P., Guo, H., Huang, Z., Are, K. S., Wang, H., Gu, M., Wei, L. Variation of dissolved nutrient exports by surface runoff from sugarcane watershed is controlled by

- fertilizer application and ground cover. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 303, p. 107121, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107121>
- Lopes Sobrinho, O. P., Silva, G. S., Pereira, Á. I. S., Sousa, A. B., Castro, W. L., Santos, L. N. S. Sugarcane cultivation (*saccharum officinarum*) and irrigation management. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 12, n; 4, p. 1605-1625, 2019. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n4p1605-1625>
- Lopes Souza, J., Roberto, G., P., Fernando G., Oliveira Junior, L., Lara, F. J., Silva-Mann, R. Heat stress in sugarcane: physiological changes and gene expression. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 3, p. 55-70, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.26260>
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- Manikandan, M., Thiagarajan, G. Study on irrigation and fertigation scheduling for sustainable sugarcane initiative (SSI) through subsurface drip irrigation. *Cutting-edge Research in Agricultural Sciences*, v. 13, p. 55-61, 2021. <https://doi.org/10.9734/bpi/cras/v13/11364d>
- Mansour, E., Abdul-Hamid, M. I., Yasin, M. T., Qabil, N., Attia, A. Identifying drought-tolerant genotypes of barley and their responses to various irrigation levels in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, v. 194, p. 58-67, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.021>
- Marafon, A. C. Análise Quantitativa de Crescimento em Cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012.
- Marin, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. 2014. 262 f. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Quieroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- Marques, P. A., Frizzone, J. A., Teixeira, M. B. O estado da arte da irrigação por gotejamento subsuperficial. *Colloquium Agrarian*, v. 2, n. 1, p. 17-31, 2006. <https://doi:10.5747/ca.2006.v02.n1.a20>
- Malik, K., Capareda, S. C., Kamboj, B. R., Malik, S., Singh, K., Arya, S., Bishnoi, D. K. Biofuels Production: A Review on Sustainable Alternatives to Traditional Fuels and Energy Sources. *Combustíveis*, v. 5, n. 2, p. 157-175, 2024. <https://doi.org/10.3390/fuels5020010>

- Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3 Ed. New York, Academic Press, 2012, 651p.
- Meena, M. R., Appunu, C., Arun Kumar, R., Manimekalai, R., Vasantha, S., Krishnappa, G., Hemaprabha, G. Recent advances in sugarcane genomics, physiology, and phenomics for superior agronomic traits. *Frontiers in Genetics*, v. 13, p. 854936, 2022. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.854936>
- Mendonça, M. F. D., Dantas Neto, J., Silva, P. F. D., Oliveira, E. C. Yield and technological quality of sugarcane under irrigation depths and nitrogen fertilization. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 7, p. 482-489, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n7p482-489>
- Mendonça, M. F. Produtividade e qualidade da cana-de-açúcar sob níveis de adubação nitrogenada e lâminas de irrigação. 2019. 99 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PE, 2019.
- Menezes, S. M. Cultivo de cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação por Gotejamento pulsado e contínuo. 2022. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife - PE. 2022.
- Menezes, S. M., Silva, G. F., Zamora, V. R. Ó., Silva, M. M., Silva, A. C. R. A., Silva, Ê. F. F. Nutritional status of coriander under fertigation depths and pulse and continuous drip irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 6, p. 364-371, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n6p364-371>
- Mohammadi, S., Mirlatif, S. M., Homae, M., Dehghanisanij, H., Hajirad, I. Evaluation of silage maize production under pulsed drip irrigation in a semi-arid region. *Irrigation Science*, v. 42, n. 2, p. 269-283, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00880-9>
- Monteiro, S, A., Mouro, S. B. M., Silva, T. G. F., Carmo, J. F. A., Brandão, E. O. Revista Científica Intelletto. Acúmulo e exportação de macronutrientes pela cana de açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Científica Intelletto*, v. 2, n. 2, p. 16-27, 2017.
- Mozambani, A. E., Pinto, A. S., Segato, S. V., Mattiuz, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V., Pinto, A. S., Jendiroba, E., Nóbrega, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Printend, 2006. Cap. 4, p. 11-18.

- Natarajan, S., Basnayake, J., Lakshmanan, P., Fukai, S. Genotypic variation in intrinsic transpiration efficiency correlates with sugarcane yield under rainfed and irrigated field conditions. *Physiologia Plantarum*, v. 172, n. 2, p. 976-989, 2021. <https://doi.org/10.1111/ppl.13221>
- Nunes Junior, D., Pinto, R. S. A., Kil, R. A. Indicadores de desempenho da agroindústria canavieira: safra 2003-2004. Ribeirão Preto: IDEA, 2005. 195p.
- Oliveira Junior, A. C., Silva dos Santos, L. N., Reis, M. N. O., Vitorino, L. C., Bessa, L. A., Teixeira, M. B., Soares, F. A. L. Effect of mineral and organic nitrogen sources on vegetative development, nutrition, and yield of sugarcane. *Agronomy*, v. 13, n. 6, p. 1627, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061627>
- Oliveira, A. R. Simões, W. L. Manejo e produção de palhada da cana-de-açúcar em um sistema irrigado por gotejamento subsuperficial para geração de bioetanol. *Energia na Agricultura*, v. 35, n. 4, p. 516-530, 2021. <https://doi.org/10.17224/energagric.2020v35n4p516-530>
- Oliveira, E. C. A., Freire, F. J., Oliveira, R. I., Freire, M. B. G., Simões Neto, D. E., Silva, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1343-1352, 2010a. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>.
- Oliveira, M. W., Nascif, C., Silva, V. S. G., Oliveira, T. B. A., Rodrigues, T. C., Gama, K. F. V., Oliveira, G. C. B. Biomass yield, nutritional status and industrial quality of sugarcane as a function of nitrogen and potassium fertilization. *Australian Journal of Crop Science*, v. 12, n. 5, p. 834-840, 2018. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.05.PNE1082>
- Orlando Filho, J., Rosseto, R., Casagrande, A. A. Cana-De-Açúcar. In: Ferreira, M. E. 1º Ed. Micronutriente e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal: POTAFOS, 2001. Cap. 2, p. 355-373.
- Otto, R., Castro, S. A. Q., Mariano, E., Castro, S. G. Q., Franco, H. C. J., Trivelin, P. C. O. Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next?. *Bioenergy Research*, v. 9, n. 4, p. 1272-1289, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9763-x>
- Paixão, C. F. C. D., Vidal, V. M., Gomes, L. F., Lira, L. C. D., Soares, J. A. B., Moraes, G. S., Soares, F. A. L. Plant growth and quality of sweet grape tomato fruits under the effects of

- nitrogen doses and water replenishment. *Research, Society and Development*, v. 9, n.7, p. e917974784, 2020.
- Paolinelli, A., Dourado, N. D., Chartuni, M, E. Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo, p. 642, 2021. <https://doi.org/10.11606/9786587391120>
- Parida, S., Gochhayat, S., Mahalik, G. Varietal susceptibility and major diseases of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in seven villages of bhubaneswar, odisha. *International Journal of Natural Sciences*, v. 10, n. 1, p. 8-12, 2020. <https://www.researchgate.net/publication/342591797>.
- Penatti, C. P (2013). *Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência* (1. Ed., Vol. 1). Editora Itu: Ottoni.
- Pissolato, M. D., Prado, C, L., Silveira, N. M., Caruso, M, E., Ribeiro, R. V., César, F., Zambrosi, B. (2021). Sugarcane regrowth is dependent on root system size: an approach using young plants grown in nutrient solution. *Bragantia*, v. 80, n. 23, p. e4321, 2021. p4321 <https://doi.org/10.1590/1678-4499>
- Rank, P. H.; Vishnu, B. Pulse drip irrigation: a review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, v. 10, n. 1, p. 125-130, 2021. <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i7.3642>
- Ramírez-Mosqueda, M. A., de la Cruz Díaz-Sánchez, M., Gómez-Merino, F. C., Hernández-Rosas, F., Rodríguez-Lagunes, D. A., & Bello-Bello, J. J. Nodal segment size and encapsulation matrix affect sugarcane bud emergence from synthetic seeds. *Sugar Tech*, v. 25, n. 4, p. 827-833, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12355-023-01251-6>
- 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. *Revista Científica Intellecto*, v. 2, n. 2, p. 16-27, 2017.
- Santos, L. C., Coelho, R. D., Barbosa, F. S., Leal, D. P. V., Fraga Júnior, E. F., Barros, T. H. S., Lizcano, J. V., Ribeiro, N. L. Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. *Agricultural Water Management*, v. 221, p. 322-333, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.013>

- Santos, M. A. L., Frizzone, J. A. Additional irrigation on a sugar-cane (*Saccharum* spp) crop harvested in January: A decision analysis model for the southern coast of Alagoas State. *Irriga*, v. 1, n. 3, p. 339-355, 2006. <https://doi.org/10.15809/irriga.2006v11n3p339-355>
- Sardans, J., Peñuelas, J. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. *Plant Physiology*, v. 160, n. 4, p. 1741-1761, 2012. <https://doi.org/10.1104/pp.112.208785>
- Schultz, N., Reis, V. M., Urquiaga, S. (2015). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Agrobiologia Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Documentos 298. www.embrapa.br/agrobiologia.
- Shilpha, J., Song, J., Jeong, B. R. Ammonium phytotoxicity and tolerance: an insight into Ammonium nutrition to improve crop productivity. *Agronomy*, v. 13, n. 6, p. 1447, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061487>
- Silva, A. F. R., Magalhães, N. C., Cunha, P. V. M., Amaral, M. C. S., Koch, K. Influence of COD/SO₄²⁻ ratio on vinasse treatment performance by two-stage anaerobic membrane bioreactor. *Journal of Environmental Management*, v. 259, p. 110034, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110034>.
- Silva, G. P., Prado, R. M. Crescimento da soqueira da cana-de-açúcar em relação à adubação nitrogenada associada ao uso de corretivos. *Acta Tecnológica*, v. 14, n. 2, 47-56, 2021. <https://doi.org/10.35818/acta.v14i2.812>
- Silva, J. P., Maria, N., Nunes Da Silva, R. Noções da Cultura da Cana-de-Açúcar. Santa Maria, UFSM, 105p, 2012.
- Silva, N. F., Cabral da Silva, E., Muraoka, T., Batista Teixeira, M., Soares, F. A. L., Cunha, N. F., Cavalcante, W. S. D. S. Nitrogen utilization from ammonium nitrate and urea fertilizer by irrigated sugarcane in Brazilian Cerrado Oxisol. *Agriculture*, v. 10, n. 8, p. 323, 2020b. <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/8/323#>
- Silva, N. F., Cunha, F. N., Teixeira, M. B., Antônio, F., Soares, L. Crescimento e rendimento da Cana-de-açúcar irrigada submetida a diferentes reposições hídricas e nitrogênio. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 14, n. 1, p. 3792-3802, 2020c. <http://www.inovagri.org.br/>

- Silveira, L. H. Adubação nitrogenada em soqueira da cana-de-açúcar e estimativa de produtividade por análise de imagem multiespectral. 2020. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 2020.
- Siqueira, G. F., Pierre, J. S., El Tahchy, A., Glassop, D., Singh, S., Bonnett, G. D., Rae, A. L. Sugarcane seed composition and changes during artificial ageing. *Crop and Pasture Science*, v. 66, n. 11, p. 1180-1189, 2015. <https://doi.org/10.1071/CP15009>
- Som-Ard, J., Atzberger, C., Izquierdo-Verdiguier, E., Vuolo, F., Immitzer, M. Remote sensing applications in sugarcane cultivation: A review. *Remote Sensing*, v. 13, n. 20, p. 4040, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13204040>
- Souza Junior, F. J. C., Assunção, M. C., Silva, S. T. Avanços da Pesquisa e Inovação em Sistemas Agrícolas: Conjunturas da Ciências Agrárias. In: Gonçalves, C. D., Ribeiro, R. W., Cabral, O. S., Dian, S. V., Anjos, B. B., Paula, H. P., Maciel, S. L., Alves, R. F., Moras, B. W., Xavier, S. A. A. Aprimorando a gestão de nutrientes do solo com microrganismos solubilizadores de fosfato. 2023. Cap. 8, p. 112-119.
- Stacciarini, T. C. V., Neto, A. R., Alves, J. M., Marques, M. G. Supplementary nitrogen fertilization in sugarcane. *Journal of Agricultural Science*, v. 13, n. 7, p. 1, 2021. <https://doi.org/10.5539/jas.v13n7p1>
- Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O. A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Sun, X., Song, D., Chen, W., Zhang, A., Wu, X., Zhang, L., Mingrui, D., Xiong, Q., Liu, C. Phosphorous application improves drought tolerance of phoebe zhennan. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, p. 1561, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01561>
- Tavares, V. N., Silva, I. J. S., Rolin Neto, F. C., Menezes, R. S. C., Araújo, M. S. B. Potencial socioeconômico da substituição da plantação de cana-de-açúcar por eucalipto em áreas de encostas. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 16, n. 7, p. 7004-7023, 2023. <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.7-167>
- Thorburn, P. J., Biggs, J. S., Palmer, J., Meier, E. A., Verburg, K., Skocaj, D. M. Prioritizing crop management to increase nitrogen use efficiency in australian sugarcane crops. *Frontiers in Plant Science*, v. 5. n. 8, p. 1504, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01504>
- Tu, B., Liu, C., Tian, B., Zhang, Q., Liu, X., Herbert, S. J. Reduced abscisic acid content is responsible for enhanced sucrose accumulation by potassium nutrition in vegetable soybean

- seeds. *Journal of Plant Research*, v. 130, n. 3, p. 551-558, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10265-017-0912-x>
- Ungureanu, N., Vladuț, V., Biriș, S. Ștefan. Sustainable valorization of waste and by-products from sugarcane processing. *Sustainability*, v. 14, n. 14, p. 11089, 2022. <https://doi.org/10.3390/su141711089>
- Vaddula, Y., Singh, K. Progression of drip irrigation and fertigation in cotton across the globe and its future perspectives for sustainable agriculture: an overview. *Applied Water Science*, v. 13, n. 9, p. 177, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01986-3>
- Valentin, F., Nortés, P. A., Domínguez, A., Sánchez, J. M., Intrigliolo, D. S., Alarcón, J. J., López-Urrea, R. Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler, superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment. *Irrigation Science*, v. 3, n. 1, p. 105-115, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00657-z>
- Vandenberghe, L. P. S., Valladares-Diestra, K. K., Bittencourt, G. A., Zevallos Torres, L. A., Vieira, S., Karp, S. G., Sydney, E. B., de Carvalho, J. C., Thomaz Socol, V., Socol, C. R. Beyond sugar and ethanol: the future of sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 167, p. 112721, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>
- Vennila, A., Palaniswami, C., Durai, A. A., Shanthi, R. M., Radhika, K. Partitioning of major nutrients and nutrient use efficiency of sugarcane genotypes. *Sugar Tech*, v. 23, n. 4, p. 741-746, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00948-2>
- Verma, K. K., Song, X. P., Verma, C. L., Malviya, M. K., Guo, D. J., Rajput, V. D., Sharma, A., Wei, K. J., Chen, G. L., Solomon, S., Li, Y. R. Predication of photosynthetic leaf gas exchange of sugarcane (*Saccharum* spp) leaves in response to leaf positions to foliar spray of potassium salt of active phosphorus under limited water irrigation. *ACS Omega*, v. 6, n. 3, p. 2396-2409, 2021. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05863>
- Vitti, G. C.; Boaretto, A. E.; Penteadó, S. R. Fertilizantes e Fertirrigação. In: Vitti, G. C.; Boaretto, A. E. (Ed.). *Fertilizantes fluidos*. Piracicaba, p. 262-281, 1994.
- Wang, X. C., Liu, R., Luo, J. N., Zhu, P. F., Wang, Y. S., Pan, X. C., Shu, L. Z. Effects of water and NPK fertigation on watermelon yield, quality, irrigation-water, and nutrient use

- efficiency under alternate partial root-zone drip irrigation. *Agricultural Water Management*, v. 271, p. 107785, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107785>
- Wiesberg, I. L., de Medeiros, J. L., Paes de Mello, R. V., Santos Maia, J. G. S., Bastos, J. B. V., Araújo, O. de Q. F. Bioenergy production from sugarcane bagasse with carbon capture and storage: Surrogate models for techno-economic decisions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 150, p.111486, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111486>.
- Xia, Y., Zhang, M., Tsang, D. C. W., Geng, N., Lu, D., Zhu, L., Igalavithana, A. D., Dissanayake, P. D., Rinklebe, J., Yang, X., & Ok, Y. S. Recent advances in control technologies for non-point source pollution with nitrogen and phosphorous from agricultural runoff: current practices and future prospects. *Applied Biological Chemistry*, v. 63, n. 1, p. 1-3, 2020. Springer. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-0493-6>
- Xiao, Y., Sun, C., Wang, D., Li, H., Guo, W. Analysis of Hotspots in Subsurface Drip Irrigation Research Using CiteSpace. *Agriculture*, v. 13, n. 7, p. 1463, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071463>
- Yasmin, H., Chakraborty, T. The impact of abiotic stresses on plant growth and development. *International Journal of Advanced Research*, v. 11, n. 5, p. 249-257, 2023. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/16875>
- Yenni, Ibrahim, M. H., Nulit, R., Sakimin, S. Z. Influence of drought stress on growth, biochemical changes and leaf gas exchange of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) in Indonesia. *Agriculture and Food*, v. 7, n. 1, p. 37-60, 2022. <https://doi.org/10.3934/AGRFOOD.2022003>
- Yingying, X., Fucang, Z., Lifeng, W., Junliang, F., Yan, Z., Jing, L., Yingying, X. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under, drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and, fertilizer use efficiency. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, v. 31, n. 1, p. 110, 2015. <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2015.z1.014>
- Zafari, J. K., Mohammadi, N. K. A review on drip fertigation on field crops. *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 8, n. 11, p. 722-29, 2019.
- Zamora, V. R. O., da Silva, M. M., da Silva, G. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., & de Menezes, S. M. Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of

coriander. *Horticultura Brasileira*, v. 37, n. 1, p. 22-28, 2019. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620190103>

Zhang, J., Guan, K., Peng, B., Pan, M., Zhou, W., Jiang, C., Kimm, H., Franz, T. E., Grant, R. F., Yang, Y., Rudnick, D. R., Heeren, D. M., Suyker, A. E., Bauerle, W. L., Miner, G. L. Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand. *Nature Communications*, v. 12, n. 1, p. 5549, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25254-7>

Zheng, Y., Santos Luciano, A. C., Dong, J., Yuan, W. High-resolution map of sugarcane cultivation in Brazil using a phenology-based method. *Earth System Science Data*, v. 14, n. 4, p. 2065-2080, 2022. <https://doi.org/10.5194/essd1420652022>

CAPÍTULO II

DOSES DE NITROGÊNIO E IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO SOBRE A EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELA CANA-DE-AÇÚCAR

DOSES DE NITROGÊNIO E IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO SOBRE A EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELA CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO: Compreender as necessidades nutricionais e promover o uso eficiente da água é essencial para manejar a cana-de-açúcar de forma adequada. Nesse contexto, torna-se fundamental explorar técnicas que visem a otimização desses recursos, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e eficazes. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das doses de nitrogênio, aplicadas via fertirrigação por gotejamento subsuperficial pulsado e contínuo, sobre a extração e a exportação de nutrientes pela cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido em campo na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC) durante o período de dezembro de 2021 a outubro de 2022. O arranjo experimental adotado foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial de (5 x 2), com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em cinco doses de nitrogênio (80, 120, 160, 240 e 320 kg ha⁻¹) aplicadas via fertirrigação e duas formas de aplicação da irrigação: pulsada e contínua. Aos 310 dias após o corte, a cana-de-açúcar foi colhida, e 10 plantas por parcela foram separadas em colmos e parte aérea. Posteriormente, foi determinada a produção de biomassa seca da parte aérea e dos colmos, bem como, a extração e a exportação de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, ferro, manganês, cobre e zinco. A irrigação pulsada proporcionou maior produção de biomassa seca da parte aérea e dos colmos, assim como favoreceu a maior extração e exportação de nutrientes pela cultura. A aplicação adequada de nitrogênio e o uso de sistemas de irrigação eficientes foram essenciais para maximizar a eficiência nutricional da cana-de-açúcar. A ordem decrescente de extração e exportação de nutrientes pela cana-de-açúcar, cultivar RB041443, tanto para o manejo pulsado quanto para o manejo contínuo, foi: K > N > Ca > P > S > Mg > Fe > Zn > Mn > Cu.

PALAVRAS-CHAVE: Acúmulo de nutrientes, fertirrigação, manejo da irrigação, *Saccharum* spp.

NITROGEN DOSES AND PULSED AND CONTINUOUS DRIP IRRIGATION EFFECTS ON THE NUTRIENT EXTRACTION AND EXPORT BY SUGARCANE

ABSTRACT: Understanding the nutritional needs and promoting efficient water use is essential for properly managing sugarcane. In this context, it becomes crucial to explore techniques aimed at optimizing these resources, contributing to more sustainable and effective agricultural practices. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of nitrogen doses, applied through subsurface drip fertigation using both pulsed and continuous methods, on the extraction and export of nutrients by sugarcane. The experiment was conducted in the field at the Carpina Sugarcane Experimental Station (EECAC) from December 2021 to October 2022. The experimental design adopted was a randomized block design in a (5 x 2) factorial scheme with four replications. The treatments consisted of five nitrogen doses (80, 120, 160, 240, and 320 kg ha⁻¹) applied through fertigation and two irrigation application methods: pulsed and continuous. At 310 days after cutting, the sugarcane was harvested, and 10 plants per plot were separated into stalks and aerial parts. Subsequently, the dry biomass production of the aerial parts and stalks was determined, as well as the extraction and export of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sulfur, iron, manganese, copper, and zinc. Pulsed irrigation resulted in greater dry biomass production of the aerial parts and stalks, as well as enhanced the extraction and export of nutrients by the crop. The proper application of nitrogen and the use of efficient irrigation systems were essential for maximizing the nutritional efficiency of sugarcane. The decreasing order of nutrient extraction and export by sugarcane, cultivar RB041443, for both pulsed and continuous management was: K > N > Ca > P > S > Mg > Fe > Zn > Mn > Cu.

KEYWORDS: Nutrients accumulation, fertigation, irrigation management, *Saccharum* spp.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma commodities cultivada em diferentes regiões do mundo, principalmente por sua capacidade de armazenar elevada concentração de açúcar nos entrenós do caule (Urgesa e Keyata, 2021). No âmbito industrial, essa planta é fundamental na produção de açúcar, etanol, bioenergia e outros produtos derivados do processo (Zhao et al., 2022; Desalegn et al., 2023). Cultivada em 121 países, é a principal fonte de açúcar do mundo. O Brasil é o principal produtor, com uma área de 8,6 milhões de hectares, produzindo cerca de 685 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com produtividade média de 79 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2024).

Na região Nordeste do Brasil, onde o índice pluviométrico é baixo, a irrigação é essencial para atender à necessidade hídrica da cana-de-açúcar, potencializando a produção da cultura (Dias e Sentelhas, 2019; Lima et al., 2020). Segundo Karadavut et al. (2023), a irrigação consiste no fornecimento de água ao solo visando o desenvolvimento, crescimento e produção de plantas que não podem ser adequadamente supridas por recursos naturais. Em condições de sequeiro, a produtividade média da cana-de-açúcar é de 58,01 Mg ha⁻¹, mas ao adotar práticas de irrigação, os rendimentos podem variar de 100 a 150 Mg ha⁻¹ (Morais et al., 2022), acompanhado de um consumo de água 1300 mm por ano.

Combinado à irrigação, a adubação nitrogenada também surge como uma alternativa para aumentar tanto a produtividade quanto a qualidade da cana-de-açúcar (Costa et al., 2019). Dada a alta produção de biomassa dessa cultura, há uma demanda significativa por água e nitrogênio (N), especialmente quando se visa alcançar maiores rendimentos (Costa et al., 2022). O N é segundo elemento mais requerido pela cana-de-açúcar, sendo essencial para seu crescimento, desenvolvimento vegetativo, rendimento e qualidade da produção (Dinh et al., 2019; Simões et al., 2023).

Para atender à crescente demanda do mercado, o setor sucroalcooleiro precisa introduzir técnicas e tecnologias que elevem o rendimento da cultura (Quintam et al., 2023). Nesse contexto, a irrigação por pulso surge como uma técnica auxiliar do manejo da irrigação, visando contribuir para aprimorar a eficiência hídrica nos sistemas agrícolas (Menezes et al., 2024).

A irrigação por pulsos envolve o fracionamento da lâmina diária, onde permite ciclos de irrigação intercalados com períodos de repouso, repetindo-se até que toda a quantidade necessária seja entregue à cultura (Almeida et al., 2018). Essa técnica facilita

a redistribuição da umidade do solo antes do próximo ciclo, promovendo uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e nutricionais (Almeida et al., 2015; Mohammadi et al., 2024). A utilização dessa técnica tem sido reconhecida por seus benefícios em diversas culturas agrícolas, como batata (Bakeer et al., 2009), coentro (Menezes et al., 2020), feijão caupi (Souza et al., 2024), amendoim (Cruz et al., 2021) e cana-de-açúcar (Menezes et al., 2024).

Assim, tendo em vista a falta de estudos específicos sobre a irrigação pulsada e contínua atrelada a nutrição mineral na cultura da cana-de-açúcar, esta pesquisa não só avança o entendimento acadêmico, mas também apresenta potenciais benefícios para os setores agrícola e industrial, fomentando melhorias significativas na eficiência da produção de cana-de-açúcar. Nesse contexto, objetiva-se com o presente trabalho avaliar o efeito das doses de nitrogênio, aplicadas via fertirrigação por gotejamento subsuperficial pulsado e contínuo, sobre a extração e a exportação de nutrientes pela cana-de-açúcar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em uma unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), a Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC) (Figura 1), durante o terceiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar (terceira folha), localizada no município de Carpina-PE ($7^{\circ} 51'24''\text{S}$, $35^{\circ}14'16''\text{W}$), com uma altitude de 180 m, região da Zona da Mata do estado. O experimento foi realizado no período compreendido entre dezembro de 2021 e outubro de 2022.

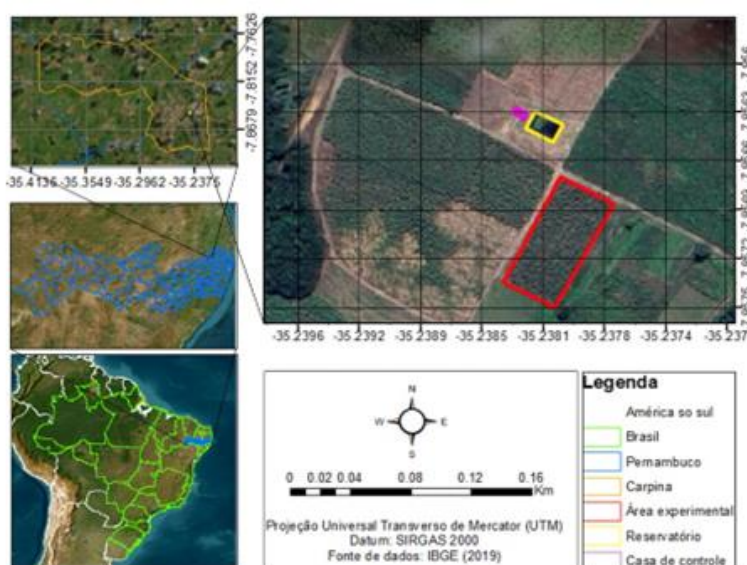


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

Fonte: autora (2024)

O clima da região é classificado como tropical úmido (As), conforme a classificação de Köppen (Alvares et al., 2014). Essa região possui uma estação chuvosa que ocorre de maio a julho, com temperaturas máximas e mínimas atingindo 29,1 e 21,8 °C, respectivamente. A precipitação média anual é de 1.174 mm, com o pico de chuvas concentrando-se principalmente durante o outono e o inverno, com uma média de 199,6 mm no mês de junho, sendo considerado o mais chuvoso.

Histórico da área, preparo e implantação do experimento

O solo da área experimental é classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrófico abrupto (EMBRAPA, 2018), textura franco arenoso. A caracterização química

e física da área experimental nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-60 m, bem como as características químicas da água utilizada para irrigação estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química e física do solo da área de estudo e análise química da água utilizada para irrigação, Carpina 2024.

Características químicas do solo																	
Camada	pH	Cu	Fe	Mn	Zn	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	m	V	M.O
m	H ₂ O	-----mg dm ⁻³ -----					----- cmol _c dm ⁻³ -----						----- % -----				
0-0,20	6,10	0,0	66,8	9,2	1,0	6,0	2,3	1,2	0,5	0,17	0,0	5,1	4,17	9,27	0,0	44,8	2,6
0,20-0,40	6,26	0,0	67,6	13,1	1,2	13,0	2,4	1,3	0,7	0,20	0,0	3,5	4,6	8,1	0,0	56,8	2,6
0,40-0,60	6,34	0,0	73,1	3,2	0,5	4,0	2,0	2,2	0,3	0,12	0,0	3,2	4,6	7,8	0,0	60,0	1,7
Características físicas do solo																	
Camada	Areia			Silte		Argila		Textura	Ds	Dp	PT	θ _{CC}	θ _{PMP}				
m								-	----- kg m ³ -----		%	----- m ³ m ³ -----					
0-0,20	70,90			12,00		17,10		Franco Arenosa	1,36	2,63	48,17	0,150		0,100			
0,20-0,40	71,00			9,90		19,10		Franco Arenosa	1,31	2,56	48,79	0,180		0,120			
0,40-0,60	66,00			7,70		26,30		Franco Argilo Arenosa	1,42	2,74	48,32	0,189		0,093			
Características Químicas da Água de Irrigação																	
pH	CE	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Sulfatos	Alcalinidade	Cloretos	RAS	Classificação ¹							
-	dSm ⁻¹	-----mg. L ⁻¹ -----								(mmo. L ¹) ^{0,5}	-						
6,50	0,227	14,0	16,03	12,64	60,0	24,82	140,0	96,11	2,71	C2S1							

Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; P: Fósforo; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Na: Sódio; Al: Alumínio; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; m: Saturação por alumínio; V: Saturação por bases; M.O: Matéria Orgânica; Ds: Densidade do Solo; Dp: Densidade de Partículas; PT: Porosidade Total; pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; θ_{cc} e θ_{PMP}: Respectivamente, Umidade Volumétrica do Solo na Capacidade de Campo e no Ponto de Murcha Permanente; RAS: Razão de Adsorção de Sódio.

O preparo do solo foi efetuado 60 dias antes da instalação do experimento e compreendeu o uso de um subsolador, para descompactar as camadas mais profundas do solo, seguido de gradagem para destorroar, destruição de restos de culturas, incorporação do calcário e sulcagem, para abertura dos sulcos de plantio. Antes do plantio, procedeu-se à adição de calcário dolomítico aplicando-se uma dose de $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, para corrigir a acidez do solo, elevar o pH e neutralizar a presença de alumínio trocável. O plantio da cana-de-açúcar, correspondente à primeira folha, foi realizado manualmente no ano de 2019. Foram abertos sulcos com cerca de 25 cm de profundidade para plantio dos rebolos, tendo-se o material vegetal sido proveniente da EECAC-UFRPE.

A fertilização mineral para a cana planta foi estabelecida com base na análise química do solo, aderindo às recomendações conforme as necessidades nutricionais da cultura, conforme orientado por Cavalcanti et al. (2008). A adubação fosfatada e potássica na primeira folha (cana-planta) foi fornecida de forma convencional no plantio. A adubação nitrogenada foi realizada de forma parcelada, aplicando-se 50% da dose recomendada no plantio e os 50% restantes foram fornecidos via fertirrigação a cada quinze dias, durante a aplicação dos tratamentos

Para a primeira soca, a adubação com nitrogênio foi realizada conforme as recomendações de Aguiar et al. (2014). Foram aplicados 100 kg ha^{-1} de sulfato de amônia de forma convencional, juntamente com 50 kg ha^{-1} de ureia via fertirrigação. Quanto ao fósforo e ao potássio, as quantidades foram baseadas nas orientações de Ribeiro et al. (1999), com doses de P_2O_5 de 40 kg ha^{-1} e 140 kg ha^{-1} de K_2O , respectivamente. O P_2O_5 foi aplicado integralmente de maneira convencional aos 55 dias após o corte (DAC), utilizando-se como fonte o superfosfato triplo, enquanto o K_2O foi aplicado na dose de 80 kg ha^{-1} de forma convencional e 60 kg ha^{-1} via fertirrigação, utilizando-se como fonte o cloreto de potássio.

Quanto ao segundo ciclo da cana-soca, iniciado em dezembro de 2021, o manejo nutricional considerou a análise química do solo. Para assegurar uma eficiente distribuição de nutrientes ao longo do ciclo, a adubação com nitrogênio seguiu-se a curva de acúmulo e exportação de nutrientes estabelecida por Oliveira et al. (2011), no qual se aplicou doses de 178, 267, 356, 535 e 712 kg ha^{-1} de N, via fertirrigação utilizando como fonte a ureia.

O fósforo e o potássio foram aplicados de acordo com recomendação de Ribeiro et al. (1999). Aos 58 DAC o P_2O_5 foi aplicado todo de forma convencional na dose de 142 kg ha^{-1} , utilizando como fonte o superfosfato triplo, enquanto o K_2O foi aplicado 168

kg ha⁻¹ via fertirrigação, utilizando como fonte o cloreto de potássio branco. O nitrogênio e o potássio, aplicados via fertirrigação, foram disponibilizados entre os meses de março a setembro, a cada quinze dias. Os totais de fertilizantes correspondentes a cada mês encontram-se detalhados na Figura 2.

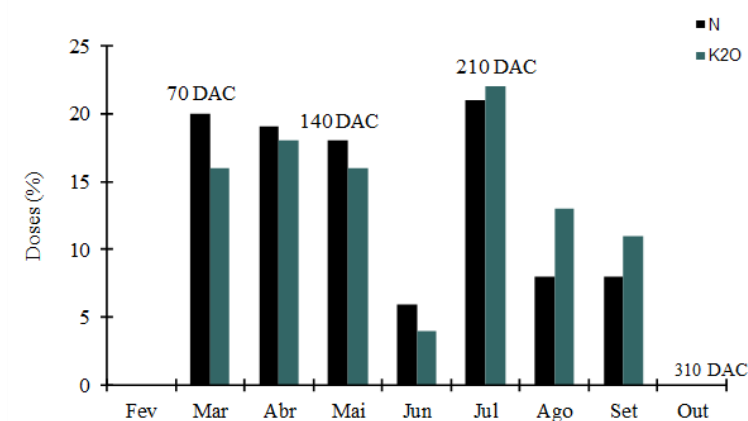


Figura 2. Parcelamento mensal da aplicação, via fertirrigação, de N e K₂O na cultura da cana-de-açúcar.

Fonte: autora (2024).

Foi aplicado, também, uma suplementação nutricional por meio do fertilizante mineral misto denominado KSC Mix, que apresenta garantias de S (11%), Mg (9%), B (0,5%), Cu (0,05), Fe (2,5%), Mn (2%), Mo (0,2%) e Zn (1,5%). Foram realizadas duas aplicações do produto, via foliar, aos 121 e 137 DAC, na dose de 2,5 kg ha⁻¹.

Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos

O experimento foi conduzido sob um delineamento experimental em blocos casualizados, adotando um esquema fatorial 5 x 2. No primeiro fator, foram consideradas cinco doses de nitrogênio (80; 120; 160; 240 e 320 kg ha⁻¹ de N), aplicadas via fertirrigação, e o segundo fator contemplou dois tipos de aplicação da irrigação: pulsada e contínua; com quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais. O experimento foi conduzido durante o ciclo referente à segunda soca, que corresponde à terceira folha da cana-de-açúcar.

As fertirrigações com N e K₂O, iniciaram-se aos 70 DAC, mediante a utilização de uma bomba dosadora do modelo Dosador Minidos 10 (10% da vazão), marca Hydro System. Nos tratamentos com irrigação pulsada, foram empregados quatro pulsos de irrigação, com um intervalo de repouso de 40 minutos entre duas de aplicações. A duração

de cada pulso foi determinada após o cálculo diário da quantidade de água necessária para a cultura.

Na área, cada parcela experimental foi formada por quatro sulcos de plantio combinado de 1,40 m + 0,60 m, medindo 7 m de comprimento. As quatro linhas de plantas centrais foram consideradas a área útil da parcela onde as avaliações foram conduzidas, desprezando-se 1 m das extremidades de cada linha, totalizando 20 m² de área útil (Figura 3).

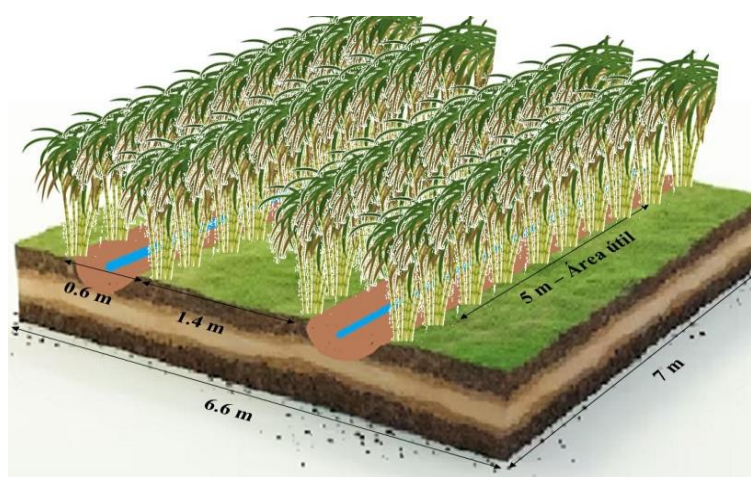


Figura 3. Área útil de cada parcela experimental.

Fonte: autora (2024).

A cultivar utilizada no experimento foi a RB041443, selecionada pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, que faz parte da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA). Essa variedade apresenta como características desenvolvimento rápido, alta produtividade agrícola, maturação precoce, baixa taxa de florescimento, um longo período útil de industrialização (PUI), alto teor de sacarose e resistência às principais doenças que afetam o canavial, bem como resistência a nematoides (Oliveira et al., 2021).

Características do Sistema de irrigação

O sistema de irrigação adotado foi o gotejamento subsuperficial, composto por fitas gotejadoras (DN 16 mm) equipadas com emissores in-line autocompensantes e antidrenantes. Esses emissores estavam espaçados a cada 0,50 m, apresentando saída

cilíndrica do tipo PC/AS com vazão de 1 L h^{-1} , e alocados no solo a $0,20\text{ m}$ de profundidade. O sistema era composto, por uma motobomba centrífuga ($3,0\text{ cv}$), um sistema de filtragem e retro lavagem, composto por dois filtros de areia e um sistema de injeção da fertirrigação composto por um manômetro e filtro, bico injetor e uma bomba dosadora de fertilizante (10% da vazão). Além disso, incluía 10 registros de espera para o controle do fluxo de água individualmente.

A determinação do tempo de irrigação para cada tratamento foi obtida com base na lâmina líquida (LL), espaçamento entre emissores e linhas, vazão do emissor e a eficiência de aplicação (equação 1). Essa eficiência foi determinada por meio de um teste de uniformidade de distribuição do sistema (CUD) (equação 2), realizado consoante a metodologia apresentada por Keller e Karmeli (1974), cujo valor obtido foi de 98% .

$$TI = \frac{LL \cdot E1 \cdot E2}{ef \cdot q} \quad (1)$$

Em que:

TI - Tempo de irrigação (horas),

LL - Lâmina líquida (mm),

E1 - Espaçamento entre emissores (m),

E2 - Espaçamento entre linhas (m),

ef - Eficiência do sistema de irrigação,

q - Vazão do emissor (L/h).

$$CUD = \frac{q_{1/4}}{q_{\text{Total}}} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

CUD - Coeficiente de uniformidade de distribuição (%);

$q_{1/4}$ - média de $1/4$ das vazões que apresentaram os menores valores;

q_{total} - média de todas as vazões.

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi calculada diariamente por meio do produto da ETo obtida pelo Tanque Classe “A” e o coeficiente de cultivo da cana-de-
açúcar, conforme recomendado por Doorenbos e Pruitt, 1977 (equação 3).

$$ETc = (ECA \times Kp \times Kc) - P * Kl \quad (3)$$

Em que:

ETc - Evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;

ECA- Evaporação do tanque classe A, mm dia⁻¹;

Kp - Coeficiente do tanque classe A, adimensional e,

Kc - Coeficiente de cultivo, adimensional,

P - Precipitação efetiva (mm),

Kl - Coeficiente de ajuste para a irrigação localizada.

Os valores de Kp foram obtidos a partir de dados de velocidade do vento, umidade relativa do ar e evaporação do tanque Classe ‘A’, instalado nas proximidades da área experimental, conforme a metodologia descrita por Doorenbos & Pruitt, (1977).

Os dados relativos ao coeficiente de cultura (Kc) utilizados seguiram as recomendações de Doorenbos e Kassan (1994), com base nos diferentes estágios de desenvolvimento da cultura (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.

Estádios de desenvolvimento		
Cobertura vegetal (%)	Dias	Kc
0 a 25	0 – 30	0,40
	30 – 45	0,50
	45 – 60	0,60
25 a 50	60 – 80	0,75
50 a 75	100 – 125	0,95
75 a 100	125 – 180	1,10
Máxima demanda	180 – 270	1,20
	270 – 300	1,30
Maturação	300 – 330	1,0
	330 – 360	0,60

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994).

Durante o período experimental, foi realizado o monitoramento da variação dos dados de precipitação (P), evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração da cultura (ETc) e a lâmina bruta (LB) (Figura 4). Nesse período, a precipitação efetiva acumulada foi de 1.129 mm por ano⁻¹. A ETo acumulada ao longo do ciclo foi de 1.139 mm, com uma média de 4,0 mm dia⁻¹. Já a evapotranspiração da cultura (ETc) acumulou 1.039 mm, com uma média de 3,0 mm dia⁻¹, e a lâmina bruta aplicada foi de 166 mm.

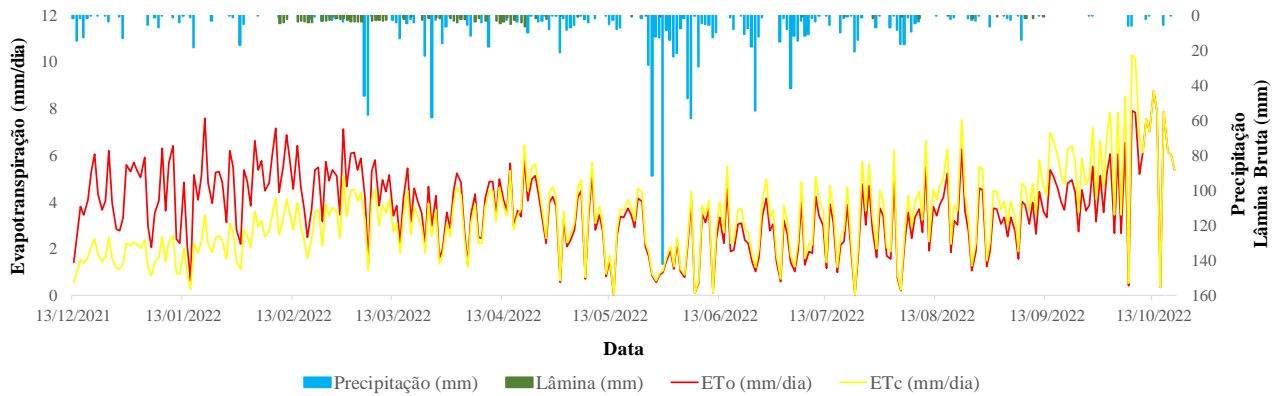


Figura 4. Dados de precipitação, evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração da cultura (ETc), e lâmina bruta aplicada na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2021/2022.

Com o intuito de induzir estresse hídrico na cana-de-açúcar, visando aumentar a concentração de sacarose nos colmos, promover a maturação e elevar a concentração de açúcar, a irrigação foi suspensa aos 270 dias após o corte (DAC). A colheita da cana-de-açúcar foi realizada aos 310 DAC.

Durante a colheita, na área útil da parcela foram coletadas 10 plantas, essas plantas foram separadas em colmo e parte aérea (folhas + ponteiros). Posteriormente, efetuou-se a pesagem do material para a determinação da biomassa verde fresca dos colmos e da parte aérea (em Mg ha^{-1}). Em seguida, as amostras foram trituradas por intermédio de uma forrageira industrial para assegurar a homogeneização do material.

Após a trituração, uma subamostra representativa de cada parcela foi retirada, pesada, acondicionada em sacos de papel kraft e colocada em estufa de circulação forçada de ar a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingir o peso constante. A partir do peso seco de cada amostra, foi realizada a extrapolação para determinar a produção de biomassa seca dos colmos (BSC, Mg ha^{-1}) e da parte aérea (BSPA, Mg ha^{-1}).

Para a análise da concentração de nutrientes na cana-de-açúcar, as amostras foram processadas em um moinho do tipo Willey, seguido do processo de extração (digestão ácida) de nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn).

A extração do nitrogênio foi realizada através da digestão da matéria seca por via úmida, em sistema aberto usando bloco digestor como fonte de calor e uma mistura de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para digerir a matéria seca. Para os demais nutrientes (P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn) a digestão foi realizada em sistema usando aberto com uso do

micro-ondas e ácido nítrico (HNO₃), conforme metodologia preconizada por (Silva, 2009).

A determinação da concentração de nitrogênio total foi realizada por meio do método de arraste de vapor (Kjeldahl); o potássio foi analisado utilizando o método de fotometria de chamas; o fósforo foi quantificado por meio do método colorimétrico molibdovanadato; o enxofre foi avaliado através do método turbidimétrico do sulfato de bário; e os elementos cálcio, magnésio, ferro, cobre, manganês e zinco foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, seguindo os procedimentos metodológicos sugeridos por Bezerra Neto e Barreto (2011).

A obtenção do acúmulo de nutrientes no colmo e na parte aérea da cana-de-açúcar foi realizada multiplicando-se a concentração de cada nutriente pela biomassa seca correspondente. A extração total de nutrientes resultou da soma do acúmulo nos colmos e na parte aérea da cultura (kg ha⁻¹). A exportação de nutrientes foi determinada pela quantidade acumulada nos colmos da cultura, (kg ha⁻¹).

Os resultados foram submetidos à verificação de normalidade e homoscedasticidade e, em seguida, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Quando foram identificados efeitos significativos, procedeu-se à análise de regressão polinomial a 5% de probabilidade para doses de nitrogênio. Para o tipo de aplicação de irrigação, pulsado e contínuo, aplicou-se o teste de média de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A decisão sobre o modelo de regressão baseou-se na qualidade de ajuste dos dados, considerando a não significância do desvio de regressão, o coeficiente de determinação (R^2) de maior valor, a significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p \leq 0,05$) e a resposta biológica de cada variável em relação aos tratamentos avaliados. Para essa análise, empregou-se o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da análise de variância (Tabela 3), observa-se que houve efeito significativo ($p < 0,05$) da interação entre os tipos de aplicação da irrigação (pulsado e contínuo) e as doses de N (80, 160, 180, 240, 320 kg ha⁻¹) sobre a extração do manganês (Mn). As extrações e exportações de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e enxofre (S), assim como, os micronutrientes, ferro (Fe) e zinco (Zn) foram

significativamente influenciadas de forma isolada, pelos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

Tabela 3. Análise de variância para a extração e exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), e para a produção de biomassa seca da parte aérea (BSPA) e biomassa seca do colmo (BSC).

Extração de Nutrientes e Biomassa Seca (parte aérea e colmo)							
FV	GL	Quadrado Médio					
		Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Tipos de Aplicação (T)	1	7533,04**	1389,88**	24344,35*	2494,18*	37,97	341,94*
Dose de nitrogênio (DN)	4	1115,49*	526,30*	1929,69 ^{ns}	439,19 ^{ns}	39,56*	138,43 ^{ns}
T x DN	4	875,77 ^{ns}	117,55 ^{ns}	9548,11 ^{ns}	980,30 ^{ns}	30,77 ^{ns}	188,25 ^{ns}
Blocos	3	568,67 ^{ns}	97,59 ^{ns}	9849,20 ^{ns}	141,64 ^{ns}	9,92 ^{ns}	166,92 ^{ns}
Resíduo	27	342,87	159,1	4758,3	382,94	12,07	77,07
CV	%	8,41	21,93	18,26	14,92	9,56	16,28
FV	GL	Micronutrientes				Biomassa Seca	
		Fe	Mn	Cu	Zn	BSPA	BSC
Tipos de Aplicação (T)	1	0,16874*	0,03113 ^{ns}	0,00007 ^{ns}	0,053876*	2,09**	74,25*
Doses de nitrogênio (DN)	4	0,06725 ^{ns}	0,02307 ^{ns}	0,000992 ^{ns}	0,00776 ^{ns}	0,69*	179,69*
T x DN	4	0,25447 ^{ns}	0,07219*	0,00120 ^{ns}	0,02335 ^{ns}	0,17 ^{ns}	101,52 ^{ns}
Blocos	3	0,05323 ^{ns}	0,01774 ^{ns}	0,00071 ^{ns}	0,00751 ^{ns}	0,29 ^{ns}	11,56 ^{ns}
Resíduos	27	0,03855	0,025969	0,00059 ^{ns}	0,00941	0,56	17,12
CV	%	23,16	29,65	25,82	13,50	14,17	17,10
Exportação Nutrientes							
FV	GL	Quadrado Médio					
		Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Tipos de Aplicação (T)	1	3151,29**	499,00*	24256,9**	2294,7*	90,54*	349,17*
Dose de nitrogênio (DN)	4	811,49*	267,57*	4377,25 ^{ns}	402,59 ^{ns}	38,45 ^{ns}	316,04*
T x DN	4	458,82 ^{ns}	233,18 ^{ns}	5008,98 ^{ns}	772,45 ^{ns}	40,06 ^{ns}	41,47 ^{ns}
Blocos	3	1004,05*	107,01 ^{ns}	5883,39 ^{ns}	69,29 ^{ns}	52,43 ^{ns}	136,48 ^{ns}
Resíduo	27	253,06	87,60	2206,28	364,084	20,88	80,81
CV	%	14,63	18,34	15,45	17,85	17,09	19,06
FV	GL	Micronutrientes					
		Fe	Mn	Cu	Zn		
Tipos de Aplicação (T)	1	0,100701*	0,077176**	0,000081 ^{ns}	0,034928*		
Dose de nitrogênio (DN)	4	0,364659**	0,016994 ^{ns}	0,000391 ^{ns}	0,017215 ^{ns}		
T x DN	4	0,021833 ^{ns}	0,013572 ^{ns}	0,001058 ^{ns}	0,016088 ^{ns}		
Blocos	3	0,021833 ^{ns}	0,005192 ^{ns}	0,0000439 ^{ns}	0,017464 ^{ns}		
Resíduo	27	0,052918	0,0067	0,000430	0,0076		
CV	%	21,9	23,06	28,09	14,95		

^{ns}: não significativo; * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

A exportação de Mn também apresentou variações independentes, assim como a produção de biomassa seca dos colmos (BSC) e biomassa seca da parte aérea (BSPA), a qual foi afetada de forma isolada pelo tipo de aplicação da irrigação. Por sua vez, o fator isolado doses de nitrogênio também exerceu uma significativa influência nas extrações e exportações de nitrogênio (N), fósforo (P), magnésio (Mg), e nas exportações de enxofre (S) e ferro (Fe) e na BSC e BSPA.

Ao analisar a produção de BSPA (Figura 5A), verifica-se que a dose de 268,3 kg ha⁻¹ de N proporcionou uma produção de 4,0 Mg ha⁻¹, representando incremento de 33,3% em relação à dose de 80 kg ha⁻¹ de N, que obteve 3,0 Mg ha⁻¹. Quanto à produção de BSC (Figura 5B), o valor máximo produzido foi de 32,8 Mg ha⁻¹, obtido na dose de 223,5 kg ha⁻¹ de N, refletindo aumento de 22,8% em relação à menor dose aplicada (80 – 26,7 Mg ha⁻¹).

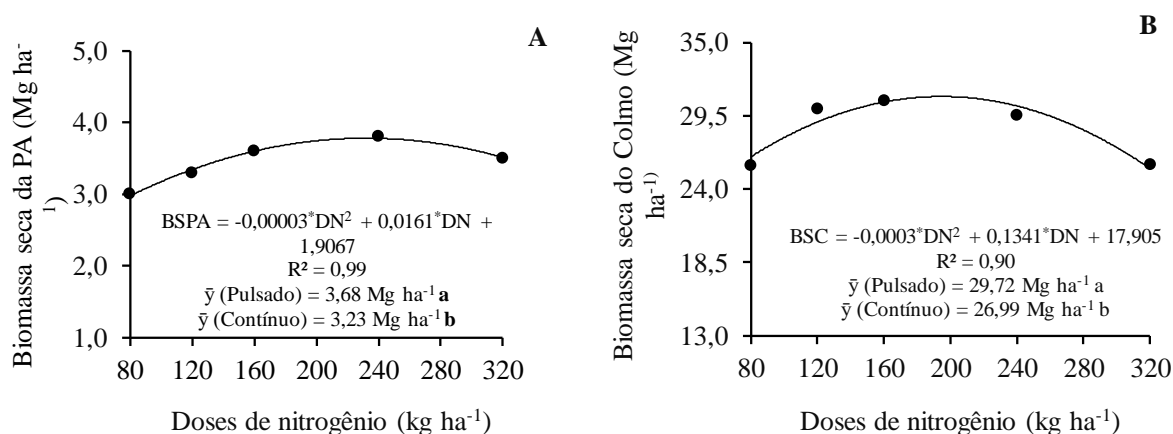


Figura 5. Produção de biomassa seca da parte aérea (BSPA) (A) e biomassa seca dos colmos (BSC) (B) em função das doses de nitrogênio e dos tipos de aplicação da irrigação (pulsado e contínuo).

* - Significativo a $p \leq 0,05$, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) para os tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

O aumento das doses de nitrogênio incrementou a produção de biomassa seca da parte aérea e dos colmos. Porém, os resultados obtidos no presente estudo, apesar do aumento na produção de biomassa seca em função das doses de N foi inferior em comparação a outros estudos, a exemplos de Oliveira et al. (2010) que estudando a produção de biomassa de cana-de-açúcar, obtiveram uma produção de MSPA e MSC de 7,5 e 55 Mg ha⁻¹, com dose correspondente de 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, para a

cultivar SP79-1011. Santana et al. (2020) obtiveram valores de 2,5 e 55 Mg ha⁻¹ para BSPA e BSC para a cultivar RB92579, com uso de 90 kg ha⁻¹ de N.

Sob cultivo irrigado, na cana-de-açúcar (cultivar RB041443), Menezes (2022) obteve para BSPA e BSC produção de 5,8 e 53,4 Mg ha⁻¹ respectivamente. Os autores destacaram ainda, que as discrepâncias na produção de BSPA e BSC entre as diferentes cultivares podem estar associadas às condições climáticas específicas de cada região e às características genéticas distintas de cada variedade. Wanderley et al. (2021), afirmam que além das características genéticas, a disponibilidade de água e de nutrientes e ciclo produtivo também influenciam na produção de biomassa.

No que diz respeito aos tipos de aplicação, a irrigação pulsada proporcionou o aumento da produção de MSPA e BSC (Figura 5A e B), com incrementos de 13,9 e 10,1%, respectivamente, quando comparado com a irrigação aplicada de forma contínua. Uma explicação para esse fato reside na manutenção da umidade ao longo do dia, uma característica inerente à irrigação pulsada, que contribuiu para o incremento na produção de biomassa seca da cana-de-açúcar. Resultados semelhantes foram obtidos por Menezes (2022) para a cana-de-açúcar, cultivar RB041443, no qual a irrigação pulsada, também proporcionou um aumento na produção de BSPA e BSC, com produção de 5,8 e 54,5 Mg ha⁻¹, respectivamente.

A extração máxima de nitrogênio pela cana-de-açúcar (Figura 6A) foi de 232,2 kg ha⁻¹, obtida na dose de 198,6 kg ha⁻¹ de N, evidenciando incremento de 12,2% em comparação com a menor dose de N testada (80 – 206,9 kg ha⁻¹). Quanto à exportação de N (Figura 6B), a maior quantidade exportada foi de 118,8 kg ha⁻¹ de N, obtida com a dose correspondente a 191,4 kg ha⁻¹ de N, representando aumento de 82,1% em relação à dose de 80 kg ha⁻¹ de N, que resultou em 105,1 kg ha⁻¹ de N exportados.

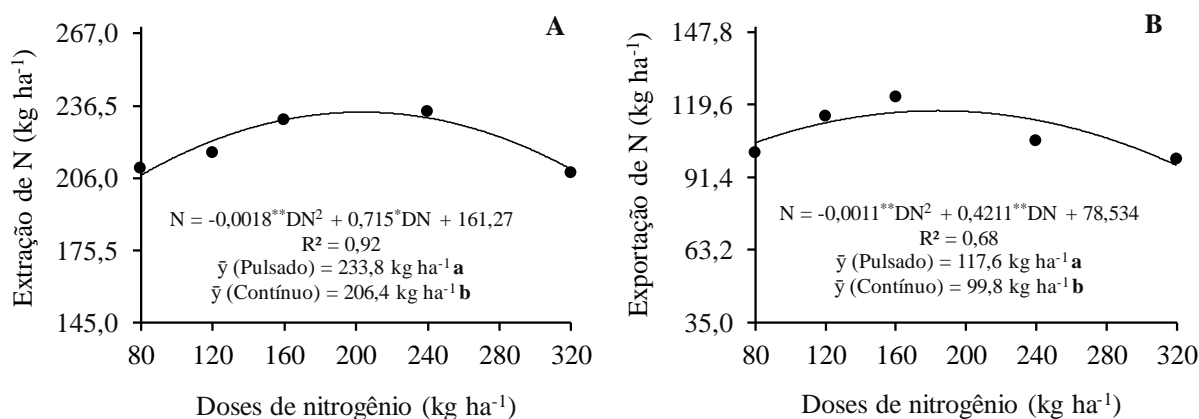


Figura 6. Extração e exportação de nitrogênio (A e B) na cultura da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

** - Significativo a $p \leq 0,01$, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) para os tipos de aplicação de irrigação (pulsada e contínua).

O N é um nutriente essencial para a cana-de-açúcar, sendo necessário para seu crescimento e desenvolvimento. Devido à sua capacidade de produzir uma grande quantidade de biomassa, a cana-de-açúcar extrai e acumula uma quantidade expressiva de nutrientes do solo (Santos et al., 2020), em especial o N. Assim, o entendimento sobre os processos de extração e exportação torna-se fundamental para a aplicação equilibrada de nutrientes, uma vez que isso determina a quantidade necessária para atender às exigências nutricionais da cana-de-açúcar.

Nesse contexto, Oliveira et al. (2011), no seu estudo sobre extração e exportação de N na cana-de-açúcar, cultivar RB92579, encontraram valores de extração e exportação de N de 260 e 167,4 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, utilizando 80 kg ha⁻¹ de N. Lira et al. (2019), obtiveram valores de extração e exportação de 171 e 122 kg ha⁻¹, respectivamente para cultivar RB867511, empregando-se 70 kg de ha⁻¹ de N. Silva et al. (2020) para cultivar IACSP95–5000, obtiveram valores de acúmulo de N no colmo e no ponteiro de 451,98 e 394,52 kg ha⁻¹, nas doses correspondentes a 138,25 e 126,0 kg ha⁻¹ de N respectivamente.

O aumento na quantidade de N aplicado via fertirrigação resultou em um aumento na extração e exportação de N pela cana-de-açúcar. No entanto, à medida que se eleva a concentração de um determinado nutriente no solo (nitrogênio), a absorção desse nutriente pela planta diminui, devido às limitações fisiológicas da planta. Neste estudo, observou-se que a cana-de-açúcar irrigada apresentou um aumento na extração e exportação de N até a dose de 198,6 e 191,4 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Acima dessas doses, houve um declínio no N extraído e exportado (Figura 6A e B). A lei dos incrementos decrescentes alerta sobre que, ao adicionar doses crescentes de um nutriente, o maior incremento em produção é obtido com a primeira dose. No entanto, com aplicações sucessivas do nutriente, os incrementos de produção e a eficiência do uso de nutrientes são cada vez menores (Malavolta et al., 1997).

Em relação ao efeito causado pelos tipos de aplicação da irrigação (6A e B), observa-se que a irrigação pulsada favoreceu a obtenção da maior extração e exportação de N pela cana-de-açúcar, refletindo incrementos percentuais de 13,2 e 17,8%, respectivamente, quando comparado com a irrigação aplicada de forma contínua. A técnica de irrigação pulsada, que envolve o fracionamento da quantidade diária de água

aplicada, permitiu uma distribuição mais uniforme da umidade do solo ao longo do ciclo da cultura. Esse fracionamento da lâmina contribuiu para a manutenção da umidade na região das raízes, o que, por sua vez, beneficiou os processos de absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar.

Segundo Rank e Vishnu et al. (2021), o aumento na distribuição da umidade do solo e no conteúdo de umidade da zona da raiz após a aplicação dos pulsos resulta em um aumento no volume de água e nutrientes disponíveis nessa região. Isso se reflete em uma maior acessibilidade dos nutrientes para as plantas, fornecendo condições mais favoráveis para seu desenvolvimento.

A maior extração de fósforo (Figura 7A), foi encontrada na dose 192,9 kg ha⁻¹ de N, cujo valor obtido foi 65,4 kg ha⁻¹, com incremento de 27,2% sobre a menor dose (80 kg ha⁻¹ de N – 51,4 kg ha⁻¹) e 37,3% em relação à maior dose de N (320 kg ha⁻¹ de N – 47,6 kg ha⁻¹). Quanto a quantidade de fósforo exportado pela cultura (Figura 7B), a dose correspondente a 187,2 kg ha⁻¹ de N, promoveu a maior exportação (57,3 kg ha⁻¹), representando aumentos percentuais de 19,1% e 32,6%, em relação à menor e maior dose de N (80 e 320 kg ha⁻¹ de N – 48,1 e 43,2 kg ha⁻¹), respectivamente.

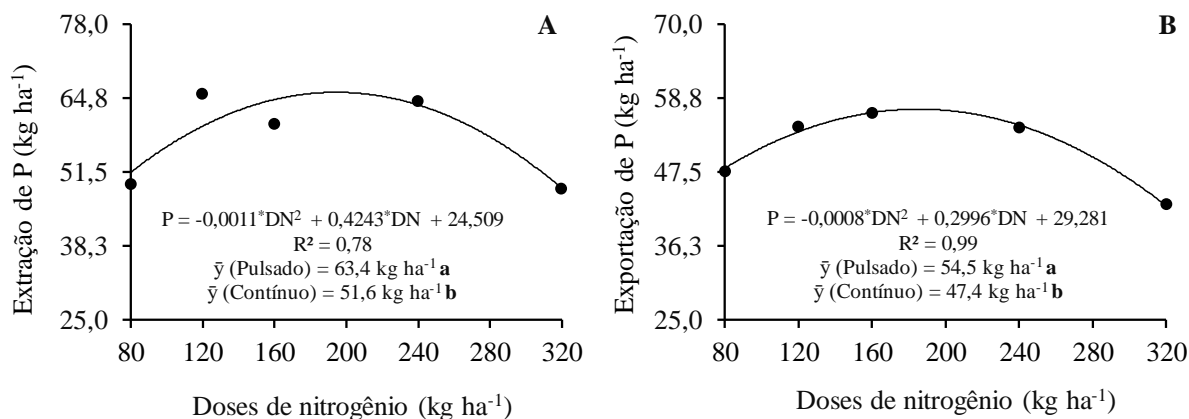


Figura 7. Extração e exportação de fósforo (A e B) na cultura da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

* - Significativo a $p \leq 0,05$, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) para os tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

Embora o fósforo seja absorvido em quantidades menores pela cultura da cana-de-açúcar, em comparação N e K, sua importância para cultura decorre de sua participação direta e indireta em diversos processos metabólicos, influenciando desde o crescimento das raízes, a formação de perfilhos, e a produção de colmos, até a melhoria

das características industriais da cana-de-açúcar (Kingston, 2014; Jaarsveld et al., 2022). Segundo Bhatt (2020), a disponibilidade de fósforo para as plantas, é condicionada por vários fatores, incluindo a classe de textura e estrutura do solo, o pH do solo, a condutividade elétrica e o teor de umidade disponível.

A extração e exportação de fósforo pela cana-de-açúcar foi influenciada pelas diferentes doses de N (Figura 7A e B), nas quais o aumento na dose de N promoveu maior extração e exportação de nutriente. Segundo Rosado et al. (2017), o aumento na extração de P com maiores doses de N se deve à maior produção de matéria seca, a qual demanda maiores quantidades de P para promover o aumento da produção. Além disso, há um sinergismo existente entre N e P que contribuiu para o aumento da extração de P com as maiores doses de N (Rietra et al., 2017). Segundo Awaad et al. (2016), a aplicação de N no solo como fonte de ureia, além de aumentar a disponibilidade do nutriente, reduz levemente o pH e aumenta a disponibilidade de P no solo.

Costa et al. (2016) encontraram um acúmulo de P de 3,55 e 60,94 kg ha⁻¹ na folha e no colmo da cana-de-açúcar, com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Vale et al. (2017), estudando o acúmulo de nutrientes na cana-de-açúcar, segunda soqueira, variedade SP 83-2847, obtiveram acúmulo de P nas folhas e nos colmos de 2,14 e 10,26 kg ha⁻¹, com as doses de 117 e 124,83 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Sob cultivo irrigado, Menezes (2022) obteve para cana-de-açúcar, cultivar RB041443, valores de extração e exportação de 53,27 e 48,1 kg ha⁻¹, respectivamente.

Em relação ao tipo de aplicação de irrigação (Figura 7A e B), verificou-se que a irrigação pulsada incrementou em 22,8 e 15% de P extraído (Figura 7A) e exportado (Figura 7B), respectivamente, em relação à irrigação aplicada de forma contínua. Essa diferença significativa é atribuída à manutenção do teor de umidade no solo ao longo do dia proporcionada pela técnica pulsada, favorecendo a absorção de nutrientes como o fósforo.

Corroborando com esses resultados, Assouline et al. (2006) afirmam que a disponibilidade e absorção de fósforo são beneficiadas pela elevada frequência de irrigação. Isso ressalta a importância não apenas da quantidade de água fornecida, mas também da regularidade e frequência nos ciclos de irrigação para otimizar a absorção de nutrientes pelas plantas, especialmente no caso do fósforo. Menezes (2022), em seu estudo sobre extração e exportação de nutrientes pela cana-de-açúcar (RB041443) sob lâminas de irrigação pulsada e contínua, verificou-se que a irrigação pulsada promoveu um

incremento de 72,2 e 75,9% no conteúdo de P extraído e exportado, em relação à irrigação contínua.

Por intermédio da Figura 8, observam-se os quantitativos extraídos e exportados de K (A e B) e Ca (C e D) em função dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

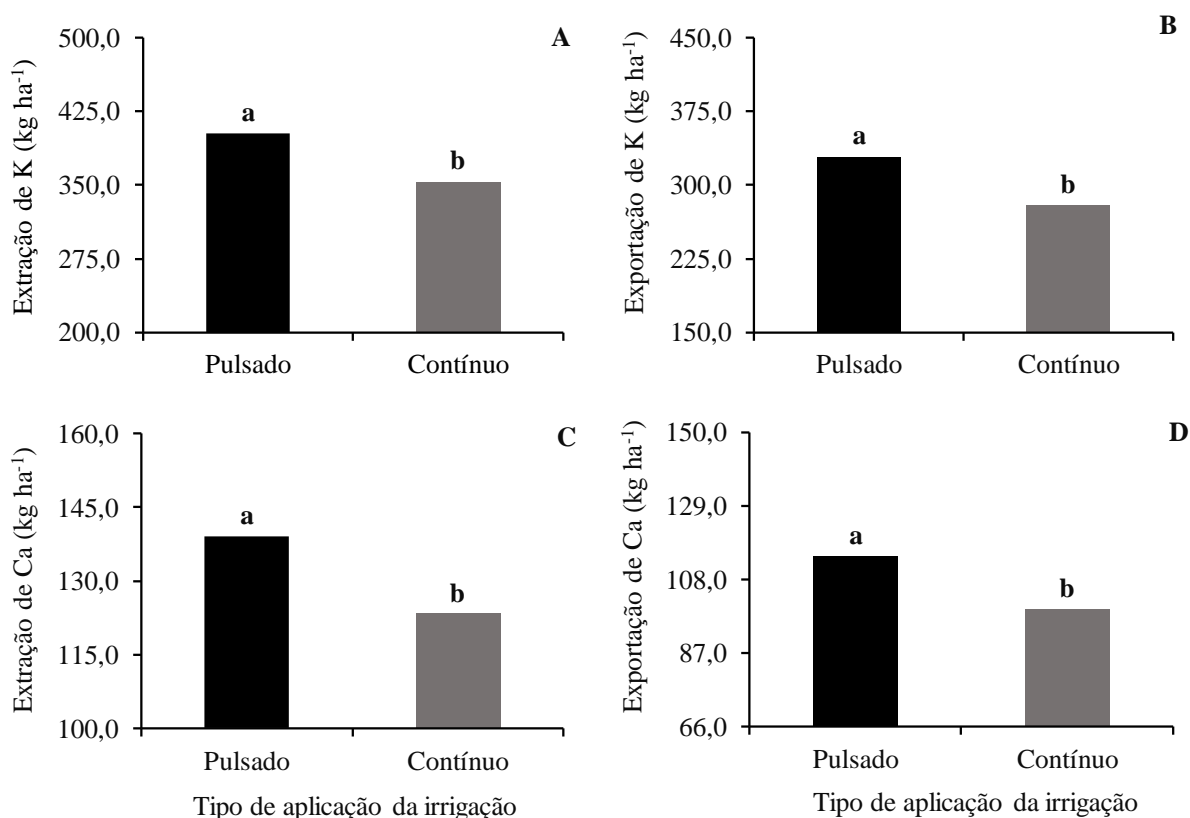


Figura 8. Extração e exportação de potássio (A e B), e cálcio (C e D) na cultura da cana-de-açúcar em função dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) para os tipos de aplicação de irrigação (pulsada e contínua).

Em relação ao K (Figura 8), constatou-se que a irrigação aplicada por pulso proporcionou a maior extração (A) e exportação (B) do nutriente pela cultura, com valores de 402,4 e 328,6 kg ha⁻¹, refletindo-se em incrementos de 13,9 e 17,6% respectivamente, quando comparado com a irrigação contínua. O potássio é o principal elemento absorvido pela cana-de-açúcar em termos de quantidade. Portanto, a adoção da técnica de irrigação por pulsos, ao manter a umidade do solo ao longo do dia, proporciona um ambiente favorável para a absorção eficiente de nutrientes, especialmente o potássio.

Assim como no presente estudo, a irrigação de maneira pulsada também, favoreceu o acúmulo e exportação de K na cultura cana-de-açúcar (Menezes, 2022). O autor obteve extração e exportação de K de 418,6 e 521,7 kg ha⁻¹, respectivamente. A irrigação por pulsos também beneficiou o acúmulo de K nas plantas de coentro (Menezes et al., 2020), alface (Pereira et al., 2022) e feijão caupi (Souza et al., 2024).

Quanto ao Ca (Figura 8C e D), a irrigação pulsada proporcionou aumento tanto na extração quanto na exportação, em comparação à irrigação contínua, registrando-se incrementos de 12,8% e 15,1%, respectivamente.

Segundo Salviano et al. (2017) o Ca é um nutriente acumulado nas plantas de cana-de-açúcar mais que o N, isso indica que sua absorção é mais favorecida pela umidade do solo. No estudo presente, a irrigação pulsada, que manteve a umidade do solo por períodos prolongados durante o dia, beneficiou a absorção de Ca pela cana-de-açúcar. Além disso, a baixa mobilidade do Ca contribuiu para uma maior disponibilidade desse nutriente na solução do solo.

Resultados semelhantes foram encontrados por Menezes (2022), na cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento pulsado, no qual obteve valores de 279,9 e 248,2 kg ha⁻¹ para Ca extraído e exportado, respectivamente. Os autores relacionaram esses resultados à manutenção da umidade do solo sob condição de irrigação pulsada, que favoreceu a mineralização da matéria orgânica do solo e a absorção de Ca pela cana-de-açúcar.

A máxima extração de Mg foi de 38,3 kg ha⁻¹, estimada na dose de 244,2 kg ha⁻¹ de N (Figura 9A), apresentando um incremento de 16,4% sobre a menor dose (80 kg ha⁻¹ de N), cuja extração foi de 32,9 kg ha⁻¹. Em relação à exportação de magnésio (Figura 9B), constatou-se que a irrigação aplicada na forma de pulso proporcionou a maior exportação do nutriente pela cultura (28,2 kg ha⁻¹), refletindo-se um incremento de 11,9% quando comparado com a aplicação de forma contínua (25,2 kg ha⁻¹).

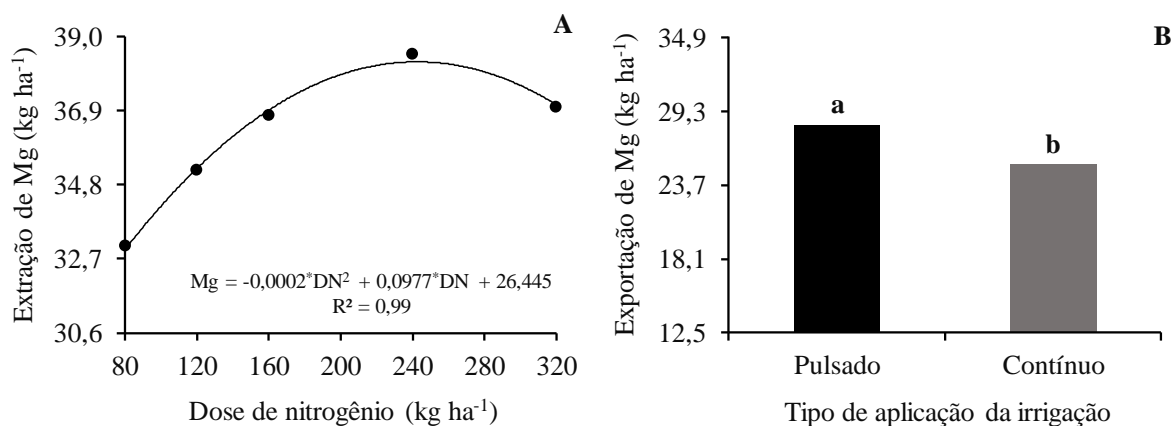


Figura 9. Extração e exportação de magnésio (A e B), na cultura da cana-de-açúcar em função do efeito isolado das doses de nitrogênio e tipos de irrigação (pulsada e contínua).

* - Significativo a $p \leq 0,05$, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) para os tipos de aplicação de irrigação (pulsada e contínua).

Esses resultados corroboraram com os encontrados por Oliveira et al. (2011) na cultura da cana-de-açúcar (RB92579), que obtiveram valores de extração e exportação de Mg de 121,89 e 99 kg ha⁻¹, respectivamente, utilizando 80 kg ha⁻¹ de N. Já nos estudos de, Lira et al. (2019) e Menezes (2022) foram obtidos valores de extração e exportação de Mg de 89 e 65, e 118,1 e 97,2 kg ha⁻¹, utilizando 70 e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, para as cultivares RB92579 e RB041443.

Conforme observado anteriormente em relação aos outros nutrientes, a irrigação pulsada também beneficiou a exportação de Mg. A distribuição de água em pulsos ajudou a manter a umidade do solo ao longo do dia, que por sua vez favoreceu a absorção do Mg pelas plantas. Estudando a cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, sob gotejamento pulsado e contínuo, Menezes (2022) obtiveram maior extração e exportação de Mg com a aplicação da irrigação pulsada, com valores de 117,1 e 98,9 kg ha⁻¹, respectivamente.

Quanto ao S, a irrigação pulsada incrementou em 11,3 e 13,3% no quantitativo de S extraído (Figura 10A) e exportado (Figura 10B), respectivamente, em comparação com a irrigação contínua.

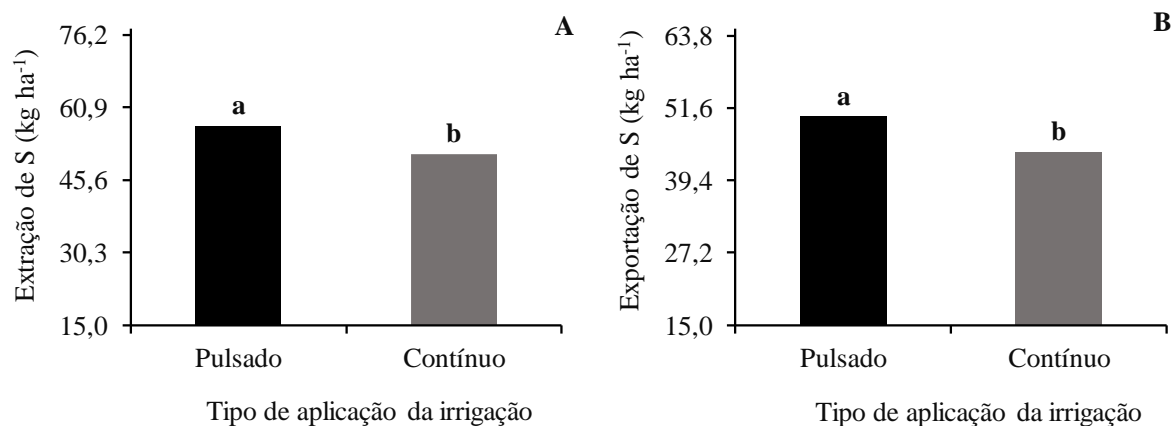


Figura 10. Extração e exportação de enxofre (A e B), na cultura da cana-de-açúcar em função do efeito isolado dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,01$) para os tipos de aplicação de irrigação (pulsada e contínua).

Andrade (2021) obtiveram valores de exportação de S de $27,5 \text{ kg ha}^{-1}$, quando as plantas de cana-de-açúcar (RB041443) foram irrigadas por pulso. Menezes (2022) sob cultivo irrigado por pulso, obtiveram valores de extração e exportação de S, de $51,0$ e $32,8 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente, para cana-de-açúcar. Ainda conforme os autores, devido à alta mobilidade no solo, o excesso de água proporcionado pela irrigação contínua (lâminas superiores a 88% ETC) pode ter contribuído para a lixiviação do S. No entanto, quando a água foi aplicada de maneira pulsada manteve a umidade do solo mais uniforme ao longo do dia, favorecendo uma melhor absorção de S pelas plantas de cana-de-açúcar. A irrigação pulsada também favoreceu o acúmulo de S em outras culturas, como na cultura do pimentão (Assouline et al., 2006) e do coentro (Menezes et al., 2020), quando comparado com a irrigação contínua.

Em relação à extração de Fe (Figura 11A), constatou-se que a irrigação aplicada na forma de pulso proporcionou maior extração do nutriente pela cana-de-açúcar ($0,912 \text{ kg ha}^{-1}$), propiciando acréscimo de 16,6% em relação à irrigação aplicada de forma contínua ($0,782 \text{ kg ha}^{-1}$). Quanto à exportação do Fe em função das doses de N (Figura 11B), o valor máximo encontrado foi de $0,82 \text{ kg ha}^{-1}$, obtido na dose de 160 kg ha^{-1} de N, refletindo-se em incremento de 8,4% em relação à menor dose de N ($80 - 0,756 \text{ kg ha}^{-1}$) e 45,3% na maior dose aplicada ($320 - 0,564 \text{ kg ha}^{-1}$). A irrigação pulsada incrementou 15,4% a exportação de Fe das plantas de cana-de-açúcar (Figura 11B).

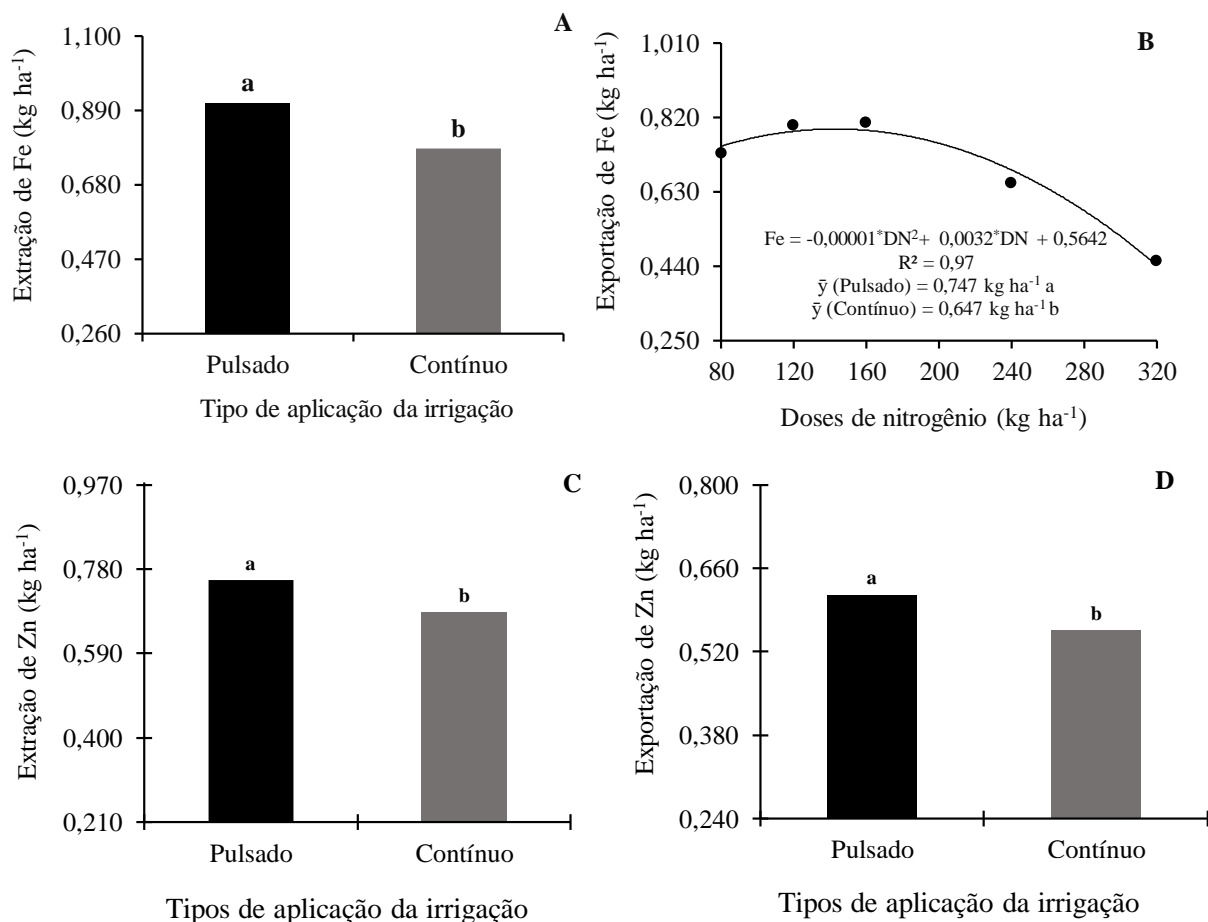


Figura 11. Extração de Fe na cana-de-açúcar em função dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) (A) e exportação em função das doses de nitrogênio aplicadas (B) e extração e exportação de Zn (C e D) função dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

* - Significativo a $p \leq 0,05$, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) para os tipos de aplicação de irrigação (pulsada e contínua).

A irrigação pulsada proporcionou aumento do acúmulo de Fe na cana-de-açúcar, devido à manutenção da umidade do solo ocasionada pelo fracionamento da lâmina d'água ao longo do dia. A constância da umidade durante o ciclo da cultura favoreceu a mineralização da matéria orgânica e o transporte desse nutriente para as raízes das plantas, resultando em um incremento na sua disponibilidade. Menezes (2022), observaram que a técnica da irrigação por pulso também favoreceu o acúmulo de Fe pela cultura da cana-de-açúcar, com aumento de 46,3% na extração e de 40,4% na exportação de nutriente em relação à irrigação aplicada de forma contínua.

Vale et al. (2017), estudando acúmulo de Fe na cana-de-açúcar (soqueira) sob efeito da adubação nitrogenada, obtiveram acúmulo máximo de 0,227 kg ha⁻¹ de Fe na

com a aplicação da dose de 137,4 kg ha⁻¹ de N. Silva et al. (2018), durante o ciclo de cana planta, primeira e segunda soca, obtiveram extrações médias de Fe de 4,20; 3,43; 3,14 kg ha⁻¹, respectivamente. Estudando o estado nutricional da cana-de-açúcar irrigada, Morais et al. (2022) obtiveram valores de extração e exportação de Fe para cana-de-açúcar, de 5,9 e 4,47 kg ha⁻¹ utilizando 70 kg ha⁻¹ de N.

Quanto ao Zn, observa-se que a irrigação aplicada de maneira pulsada incrementou a extração (Figura 11C) e exportação (Figura 11D) em 10,7 e 10,5%, respectivamente, quando comparada com a irrigação aplicada de forma contínua.

Assim como no presente estudo, Andrade (2021) e Menezes (2022), na cultura cana-de-açúcar, também obtiveram resposta positiva para o acúmulo e exportação de Zn quando as plantas foram submetidas a irrigação por pulso. Segundo Zamora et al. (2021), o fracionamento da lâmina de irrigação permite manter a água e os nutrientes próximos à zona radicular da cultura, reduzindo o risco de deslocamento abaixo da zona radicular. Isso favorece uma maior solubilização dos nutrientes, resultando em maior disponibilidade na solução do solo, o que, por sua vez, reflete em uma maior absorção do mesmo.

Por intermédio do desdobramento dos fatores, verificou-se que houve diferença significativa das doses de nitrogênio dentro dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) sobre a extração de Mn na cultura da cana-de-açúcar (Figura 12A). Para irrigação pulsada, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o linear crescente, cuja máxima extração obtida foi de 0,753 kg ha⁻¹ encontrada na lâmina de 320 kg ha⁻¹ de N, havendo acréscimo de 0,0014% no Mn extraído para cada aumento unitário da dose de nitrogênio aplicada. Por outro lado, na irrigação contínua, os dados se ajustaram um modelo quadrático decrescente, no qual a quantidade mínima e máxima extraída de Mn foi 0,468 e 0,594 kg ha⁻¹, obtida nas doses de, 225 e 80 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

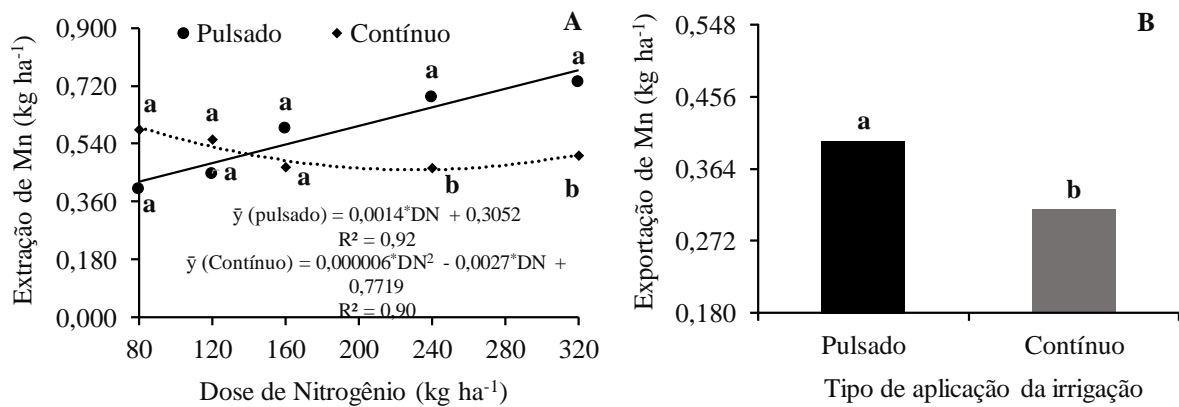


Figura 12. Desdobramento da interação entre os fatores doses de nitrogênio versus tipos de aplicação da irrigação sobre a extração (A) e a exportação de manganês (B) pela cana-de-açúcar.

* - Significativo a $p \leq 0,05$, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) para os tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

As doses de N exerceram influência significativa na absorção de Mn pelas plantas de cana-de-açúcar. Segundo Pereira et al. (2022), esse resultado pode ser explicado pela redução do pH do solo causada pela aplicação de ureia, favorecendo uma maior disponibilidade de Mn pelas raízes da cultura. Verifica-se por meio do desdobramento dos tipos de aplicação da fertirrigação (pulsada e contínua) dentro de cada uma das doses de nitrogênio aplicadas (Figura 12A), que houve diferença significativa entre a irrigação pulsada e contínua nas doses de 240 e 320 kg ha⁻¹ de N. A irrigação pulsada incrementou a extração de Mn em 47,4% (com a dose de 240 kg ha⁻¹ de N) e em 44,9% (com a dose de 320 kg ha⁻¹ de N), quando comparada com a irrigação aplicada de forma contínua.

Quanto o conteúdo de Mn exportado (Figura 12B), verifica-se que houve diferença significativa de forma isolada para o fator tipo de aplicação da irrigação. A maior exportação do nutriente (0,400 kg ha⁻¹) foi obtida com aplicação da irrigação pulsada, tendo-se verificado incremento de 28,2% em relação à exportação obtida com a aplicação da irrigação contínua (0,312 kg ha⁻¹).

Assim como constatado para os micronutrientes Fe e Zn, a absorção do Mn pela cana-de-açúcar também foi favorecida pela irrigação pulsada. Isso se deve à manutenção da umidade do solo ao longo do dia, facilitando a mineralização da matéria orgânica e prolonga a proximidade do nutriente com o sistema radicular da planta. Nesse sentido, Andrade (2021), em seu estudo sobre extração e exportação de Mn na cultura da cana-de-açúcar, utilizando irrigação pulsada, observou um aumento significativo de 41,7 e 48,2%

na extração e exportação de manganês quando as plantas foram irrigadas por pulsos. Menezes (2022) na cana-de-açúcar, cultivar RB041443, sob gotejamento pulsado, obtiveram valores de extração e exportação de Mn, de 3,9 e 3,5 kg ha⁻¹, respectivamente.

Segundo Abdelraoufe et al. (2019), a irrigação por pulso proporciona uma melhor disponibilidade de água na camada superficial do solo durante o dia. Isso ocorre devido à redução do movimento vertical da água no solo, reduzindo as taxas de percolação hídrica e menos perdas de nutrientes por lixiviação. Essa condição favorece a absorção de nutrientes pelas plantas, incluindo o manganês.

A ordem decrescente de extração e de exportação pela cana-de-açúcar (RB041443) tanto para o manejo pulsado quanto para manejo contínuo, foi de K > N > Ca > P > S > Mg > Fe > Zn > Mn > Cu. Em estudo conduzido por Menezes (2022) com a mesma variedade, sob lâminas de irrigação pulsada, a ordem decrescente de nutrientes para extração e exportação foi: K > Ca > N > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > Cu. Andrade (2021), também utilizando a cultivar RB041443 sob manejo pulsado, obteve a seguinte ordem decrescente: N > K > Ca > Mg > S > P > Fe > Zn > Mn > Cu. Já Lira et al. (2019), analisando os efeitos da salinidade na nutrição mineral da cana-de-açúcar (cultivar BRR92579), revelaram a seguinte ordem decrescente de macronutrientes: K > Ca > N > Mg > S. Vale et al. (2017), ao investigarem os efeitos da adubação nitrogenada na cana-de-açúcar (cultivar SP 83-2847), identificaram a sequência ordem de acumulação de nutrientes nas folhas verdes: K > N > S > Ca > Mg > P > Fe > Mn > Zn > Cu, e no colmo: N > P > Mn > B.

4. CONCLUSÃO

A irrigação pulsada proporcionou maior produção de biomassa seca da parte aérea e dos colmos, assim como favoreceu maior extração e exportação de nutrientes pela cultura.

As doses de 268,3 e 223,5 kg ha⁻¹ de N, aplicadas via fertirrigação contribuíram para o incremento da produção de biomassa seca da parte aérea e dos colmos. Da mesma forma, as doses entre 192,9 e 244,2 e entre 160 e 191,4 kg ha⁻¹ de N, exceto para manganês, foram as que favoreceram, respectivamente, maior extração e exportação de nutrientes, pela cana-de-açúcar, cultivar RB041443.

A ordem decrescente de extração e exportação pela cana-de-açúcar (RB041443), tanto para o manejo pulsado quanto para o manejo contínuo, foi de $K > N > Ca > P > S > Mg > Fe > Zn > Mn > Cu$.

5. REFERÊNCIAS

- Abdelraouf, R. E., Azab, A., Tarabye, H. H. H., Refaie, K. M. Effect of pulse drip irrigation and organic mulching by rice straw on yield, water productivity and quality of orange under sandy soils conditions. *Plant Archives*, v.19, n. 2, p. 2613-2621, 2019.
- Aguiar, A. T. E., Gonçalves, C., Paterniani, M. E. A. G. Z., Tucci, M. L. S. A., Castro, C. E. F. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas - Boletim 200. 7ª Ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2014. 452p. (Boletim IAC, nº 200).
- Almeida, H. J., Pancelli, M. A., Prado, R. M., Cavalcante, V. S., Cruz, F. J. R. Effect of potassium on nutritional status and productivity of peanuts in succession with sugar cane. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 15, n. 1, p. 1-10, 2015. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000001>
- Almeida, W. F., Paz, V. P. S., Jesus, A. P. C., Silva, J. S., Gonçalves, K. S., Oliveira, A. S. Yield of green beans subjected to continuous and pulse drip irrigation with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 7, p. 476-481, 2018. <https://10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p476-481>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., Sparovek, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. *Meteorologische zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- Andrade, W. J. M. Efeito do gotejamento contínuo e pulsado e lâminas de irrigação sobre aspectos fisiológicos, acúmulo e exportação de nutrientes na cana-de-açúcar. 2021. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife - PE. 2021.
- Andrade, W. J. M., Silva, G. F., Menezes, S. M., Silva, M. M., Silva, A. O., Lopes, I. A. P., Sousa, R. R. Características fisiológicas e rendimento da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação. *Observatório de La Economía Latino-americana*, v. 22, n. 1, p. 4387-4415, 2024. <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-232>
- Assouline, S., Möller, M., Cohen, S., Ben-Hur, M., Grava, A., Narkis, K., Silber, A. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 5, p.1556-1568, 2006. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0365>

- Awaad, M. S., Badr, R. A., Badr, M. A., Abd-elrahman, A. H. Effects of different nitrogen and potassium sources on lettuce (*Lactuca sativa* L.) yield in a sandy soil. Eurasian Journal of Soil Science, v. 5, n. 4, p. 299-306, 2016. <https://doi.org/10.18393/ejss.2016.4.299-306>
- Bakeer, G. A. A., El-Ebabi, F. G., El-Saidi, M. T., Abdelghany, A. R. E. Effect of pulse drip irrigation on yield and water use efficiency of potato crop under organic agriculture in sandy soils. Misr Journal of Agricultural Engineering, v. 26, n. 2, p. 736-765, 2009. <https://doi.org/10.21608/mjae.2009.109488>
- Bezerra Neto, E., Barreto, L. P. Análises químicas e bioquímicas em plantas. 1 ed. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011. 267p.
- Bhatt, R. Resources Management for Sustainable Sugarcane Production. In Resources Use Efficiency in Agriculture; Kumar, S., Meena, S. R., Jhariya, K. M., Eds.; Springer: Singapore, v. 10, n. 6, p. 650–685, 2020
- Bhatt, R., Singh, P., Ali, O. M., Abdel Latef, A. A. H., Laing, A. M., Hossain, A. Yield and quality of ratoon sugarcane are improved by applying potassium under irrigation to potassium deficient soils. Agronomy, v. 11, n. 7, p. 1381, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071381>
- Cavalcanti, F. L. A., Santos, J. C. P., Pereira, J. R., Leite, J. P., Silva, M. C. L., Freire, F. J., Silva, D. J., Sousa, A. R., Messias, A. S., Faria, C. M. B., Burgos, N., Lima Júnior, M. A., Gomes, R. V., Cavalcanti, A. C., Lima, J. F. V. F. Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. 2ª aproximação. 3 ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco IPA, 2008. 212p.
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Quarto Levantamento: Safra 2022/2023. CONAB, Brasília, Brasil, v. 10, n. 4, 2023.
- Costa, A. R. F. C., Costa, M. S., Rolim, M. M., Silva, G. F., Simões Neto, D. E., Silva, M. M. Water depths and nitrogen rates on sugarcane growth and dry biomass accumulation. Bioscience Journal, v. 38, p. e38042, 2022. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-59658>
- Costa, A. R. F. C., Rolim, M. M., Silva, E. M. B., Simões Neto, D. E., Pedrosa, E. R. M., Silva, E. F. F. Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane

- cultivated under different types of water management and doses of nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*, v. 10, n. 3, p. 362-369, 2016. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.03.p7205>
- Costa, A. R. F. C., Rolim, M. M., Simões Neto, D. E., Silva, M. M., Silva, G. F., Régis Pedrosa, E. M. Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *Irriga*, v. 24, n. 1, p. 38-53, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p38-53>
- Cruz, R. I. F., Silva, G. F., Silva, M. M., Silva, A. H. S., Santos Júnior, J. A., Silva, E. F. F. S. Productivity of irrigated peanut plants under pulse and continuous dripping irrigation with brackish water. *Revista Caatinga*, v. 34, n. 1, p. 208-218, 2021. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n121rc>
- Desalegn, B., Kebede, E., Legesse, H., Fite, T. Sugarcane productivity and sugar yield improvement: Selecting variety, nitrogen fertilizer rate, and bioregulator as a first-line treatment. *Heliyon*, v. 9, n. 4, p. e15520, 2023.
- Dias, H. B., Sentelhas, P. C. Dimensioning the impact of irrigation on sugarcane yield in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, n. 1, p. 29-37, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0619-x>
- Dinh, T. H., Takaragawa, H., Watanabe, K., Nakabaru, M., Kawamitsu, Y. Leaf photosynthesis response to change of soil moisture content in sugarcane. *Sugar Tech*, v. 21, n. 6, p. 949-958, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00735-8>
- Doorenbos, J. Y., Pruitt, W. O. Crop water requirements. *FAO Estudio de Riego y Drenaje, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, n. 24, Roma, n. 24, 1977. 144p.*
- Doorenbos, J., Kassan, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. *Campina Grande: UFPB, (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33), 1994. 306p.*
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.*
- Ferreira, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>

- Jaarsveld, V. C. M., Zharare, G. E., Smit, M. A., Du Preez, C. C. Availability of Residual and Applied Inorganic Phosphorus for Sugarcane Uptake and Growth in a Post-Mined Reconstituted Soil. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, v. 10, n. 11, p. 112-127, 2022. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.1011007>
- Karadavut, S., Erdogan, S., Dayan, V. Investigation of agricultural sustainability with irrigation and economic factors. *Black Sea Journal of Agriculture*, v. 6, n. 4, p. 394-401, 2023. doi: 10.47115/bsagriculture.1300422
- Keller, J., Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, v. 17, p. 678-684, 1974.
- Kingston, G. "Mineral nutrition of sugarcane," in *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*, eds P. H. Moore and F. C. Botha (Oxford: John Wiley e Sons), 85–120, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch5>
- Lima, B. R. D., Oliveira, E. P., Donato Júnior, E. P., Bebé, F. V. Uso e qualidade de água subterrânea utilizada por agricultores familiares no Território Sertão Produtivo, Estado da Bahia, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 7, n. 16, p. 679-689, 2020. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071615](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071615)
- Lira, R. M., Silva, E. F. F., Silva, G. F., Souza, D. H. S., Pedrosa, E. M. R., Gordin, L. C. Content, extraction and export of nutrients in sugarcane under salinity and leaching fraction. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 6, p. 432-438, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p432-438>
- Malavolta, E., Vitti, G. C., Oliveira, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- Menezes, S. M. Cultivo de cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação por Gotejamento pulsado e contínuo. 2022. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife - PE. 2022.
- Menezes, S. M., Silva, G. F., Silva, M. M., Morais, J. E. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Rolim, M. M. Continuous and pulse fertigation on dry matter production and nutrient accumulation in coriander. *DYNA*, v. 87, n. 212, p. 18-25, 2020. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78569>

- Menezes, S. M., Silva, G. F., Silva, M. M., Morais, J. E. F., Vasconcelos, M. C., Souza, C. S., Rolim, M. M. Pulsed drip irrigation reduces sugarcane water consumption and improves growth, productivity, sugar and ethanol yields. *BioEnergy Research*, v. 17, p. 1-12, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10729-4>
- Mohammadi, S., Mirlatifi, S. M., Homaei, M., Dehghanisanij, H., Hajirad, I. Evaluation of silage maize production under pulsed drip irrigation in a semi-arid region. *Irrigation Science*, v. 42, p. 269-283, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00880-9>
- Morais, J. E. F., Silva, E. F. F., Andrade, L. G. L., Menezes, S. M., Cutrim, E. O., Dantas, D. C., Silva, G. F., Rolim, M. M. Nutritional status, Na⁺ and Cl⁻ concentrations, and yield of sugarcane irrigated with brackish waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 11, p. 863-874, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n11p863-874>
- Oliveira, E. C. A., Oliveira, R. I., Andrade, B. M. T., Freire, F. J., Júnior, M. A. L., Machado, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.
- Oliveira, F. M., Aspiazú, I., Kondo, M. K. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. *Revista Trópica*, v. 5, n. 1, p. 56-67, 2011. <https://doi.org/10.0000/rtcab.v5i1.305>
- Oliveira, O. H. D., Pinto, M. C., Barboza, J. B., Simões Neto, D. E., Dutra Filho, J. D. A., Souto, L. S., Souza, A. D. S. Produção de biomassa de cana-de-açúcar em fase de estabelecimento. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 7, n. 17, p. 1379-1389, 2020. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071722](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071722)
- Oliveira, R. A., Hoffmann, H. P., Barbosa, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. Orgs. Curitiba: UFPR/RIDESA, 2021. 79p.
- Pereira, L. D. S., Saad, J. C. C., Cardoso, A. I. I., Castro, V. A. D., Lima, C. J. G. D. S., da Silva, E. M. Nutrient content and accumulation in mini lettuce as a function of fertigation management strategies. *Horticultura Brasileira*, v. 40, n. 4, p. 403-410, 2023. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20220408>

- Quintam, C. P. R., Assunção, G. M. Panorama do Agronegócio Exportador Brasileiro. RECIMA21. Revista Científica Multidisciplinar, v. 4, n. 7, p. e473642-e473642, 2023. <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i7.3642>
- Rank, P. H., Vishnu, B. Pulse drip irrigation: a review. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, v. 10, n. 1, p. 125-130, 2021. <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i7.3642>
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., Alvarez, V. H. V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. 359p.
- Rietra, R. P., Heinen, M., Dimkpa, C. O., Bindraban, P. S. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. Communications in soil science and plant analysis, v. 48, n. 16, p. 1895-1920, 2017. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>
- Rosado, T. L., Gontijo, I., Passos, R. R., de Almeida, M. S. Nutrient extraction by mombaga grass submitted to sources and doses of nitrogen. Idesia, v. 35, n. 1, p. 63-72, 2017. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292017005000009>
- 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. Revista Científica Intelletto, v. 2, n. 2, p. 16-27, 2017.
- Santana, A. C. A., Oliveira, E. C. A., Silva, V. S. G., Santos, R. L., Silva, M. A., Freire, F. J. Critical nitrogen dilution curves and productivity assessments for plant cane. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 24, n. 4, p. 244-251, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p244-251>
- Santos, V. R., Costa, L. C., Rocha, A. M. S., Santos, C. G., Santos, M. A. L., Rabêlo, F. H. S., Mello Prado, R. Biomass accumulation, extraction and nutrient use efficiency by cover crops. Research, Society and Development, v. 9, n. 10, p. e9, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9433>
- Silva, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- Silva, F. N., Silva, C. E., Muraoka, T., Batista, T. M., Soares, F. A. L., Nobre Cunha, F., Cavalcante, W. S. D. S. Nitrogen utilization from ammonium nitrate and urea fertilizer

- by irrigated sugarcane in Brazilian Cerrado Oxisol. *Agriculture*, v. 10, n. 8, p. 323, 2020. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080323>
- Silva, V. S. G., Oliveira, M. W., Ferreira, V. M., Oliveira, T. B. A., Brito Santana, M., Galvão, E. R. Stalk yield and nutrients accumulation of sugarcane varieties in three crop cycles. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 41, n. 2, p. 415-423, 2018. <https://doi.org/10.19084/RCA17051>
- Simões, W. L., Oliveira, C. P. M., Salviano, A. M., Oliveira, A. R., Silva, J. S., Teixeira Filho, M. C. M., Barbosa, I. Impactos da fertirrigação nitrogenada e potássica no rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, v.16, n. 43, p. 897-909, 2023. DOI: 10.55905/rdelosv16.n43-025
- Souza, C. S., Silva, G. F., Costa, V. G., Silva M. M., Silva, V. B., Menezes, S. M., Costa, A. F., Diniz, A. A. Continuous and pulse fertigation on the accumulation and export of nutrients by cowpea. *Revista Caatinga*, v. 37, p. 11818, 2024. <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3711818rc>
- Urgesa, G. D., Keyata, E. O. Effect of harvesting ages on yield and yield components of sugar cane varieties cultivated at finchaa sugar factory, oromia, Ethiopia. *International Journal of Food Science*, v. 2021, n. 1, p. 1-6, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2702095>
- Vale, D., Prado, R. M., Moraes, J. R. S. C., Cruz, F. J. R. Nitrogen fertilizer effect in production, nutrient accumulation and nitrogen efficiency use of second ratoon sugarcane harvested without straw burning. *Australian Journal of Crop Science*, v. 11, n. 5, p. 616-623, 2017. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.05.p483>
- Wanderley, L. R. S., Oliveira, E. C. A., Freire, F. J., Simões Neto, D. E., Santos, R. L. Nutritional requirement by irrigated brazilian sugarcane varieties. *Sugar Tech*, v. 23, n. 4, p. 762-775, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00921-z>
- Zamora, V. R. O., da Silva, M. M., Santos Júnior, J. A., da Silva, G. F., Menezes, D., de Almeida, C. D. G. C. Assessing the productivity of coriander under different irrigation depths and fertilizers applied with continuous and pulsed drip systems. *Water Supply*, v. 21, n. 5, p. 2099-2108, 2021. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.008>
- Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Silva, G. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Menezes, S. M. Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of

coriander. *Horticultura Brasileira*, v. 37, n. 1, p. 22-28, 2019.
<https://doi.org/10.1590/s0102053620190103>

Zhao, Y., Liu, J., Huang, H., Zan, F., Zhao, P., Zhao, J., Wu, C. Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) contributed to high sucrose content in China based on an analysis of newly developed varieties. *Agriculture*, v. 12, n. 11, p. 1789, 2022.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12111789>

CAPÍTULO III

DOSES DE NITROGÊNIO E IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO SOBRE AS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR

DOSES DE NITROGÊNIO E IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO SOBRE AS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO: A água e o nitrogênio são dois recursos que mais influenciam no crescimento e no desenvolvimento das culturas, e o nitrogênio quando fornecido via fertirrigação, é utilizado mais eficientemente pelas plantas. Neste sentido, a técnica da irrigação pulsada apresenta-se como uma estratégia capaz de contribuir para o manejo eficiente da água e do nitrogênio, resultando na otimização do cultivo agrícola. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da aplicação de doses de nitrogênio, aplicadas via fertirrigação pulsada e contínua, sobre as trocas gasosas na cultura da cana-de-açúcar. Para isso, um experimento de campo foi instalado na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC) durante o período de dezembro de 2021 a outubro de 2022. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 2, com quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos por cinco doses de nitrogênio (80, 120, 160, 240 e 320 kg ha⁻¹) e dois tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua). Foram mensuradas, aos 240 e 300 DAC, a fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração, concentração interna de CO₂, temperatura foliar, eficiência intrínseca do uso da água, eficiência instantânea de uso da água e a eficiência instantânea de carboxilação. A irrigação pulsada atrelada a dose de 189,4 kg ha⁻¹ de N proporcionou maior fotossíntese líquida às plantas de cana-de-açúcar. Da mesma forma a irrigação por gotejamento pulsado aumentou a transpiração, condutância estomática, eficiência instantânea do uso da água, concentração interna de CO₂, eficiência intrínseca do uso da água e a eficiência instantânea de carboxilação. Doses de nitrogênio entre 150 e 191,4 kg ha⁻¹ otimizaram as respostas fisiológicas da cultura, enquanto doses excessivas (>168,4 kg ha⁻¹ N) reduziram a eficiência de carboxilação e a eficiência do uso da água.

PALAVRAS-CHAVE: Fotossíntese, nutrição, *Saccharum officinarum*, trocas gasosas.

NITROGEN DOSES AND PULSED AND CONTINUOUS DRIP IRRIGATION ON THE PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF SUGARCANE

ABSTRACT: Water and nitrogen are two of the most influential resources on crop growth and development, and when nitrogen is supplied through fertigation, it is utilized more efficiently by plants. In this context, the technique of pulsed irrigation emerges as a strategy capable of contributing to the efficient management of water and nitrogen, resulting in the optimization of agricultural cultivation. Thus, the objective of this study was to evaluate the influence of nitrogen doses, applied through pulsed and continuous fertigation, on gas exchange in sugarcane cultivation. For this purpose, a field experiment was conducted at the Carpina Sugarcane Experimental Station (EECAC) from December 2021 to October 2022. The experimental design was a randomized block design in a 5 x 2 factorial arrangement with four replications. The treatments consisted of five nitrogen doses (80, 120, 160, 240, and 320 kg ha⁻¹) and two types of irrigation application (pulsed and continuous). At 240 and 300 DAC (days after planting), the following parameters were measured: net photosynthesis, stomatal conductance, transpiration, internal CO₂ concentration, leaf temperature, intrinsic water use efficiency, instantaneous water use efficiency, and instantaneous carboxylation efficiency. Pulsed irrigation combined with a nitrogen dose of 189.4 kg ha⁻¹ resulted in higher net photosynthesis in sugarcane plants. Similarly, pulsed drip irrigation increased transpiration, stomatal conductance, instantaneous water use efficiency, internal CO₂ concentration, intrinsic water use efficiency, and instantaneous carboxylation efficiency. Nitrogen doses between 150 and 191.4 kg ha⁻¹ optimized the physiological responses of the crop, while excessive doses (>168.4 kg ha⁻¹ N) reduced carboxylation efficiency and water use efficiency.

KEYWORDS: Photosynthesis, nutrition, *Saccharum officinarum*, gas exchange.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) possui grande importância em regiões tropicais e subtropicais ao redor do mundo, especialmente na produção de açúcar e etanol (Kölln et al., 2023). A crescente demanda por produtos derivados da cana-de-açúcar enfatiza a necessidade de aprimorar as práticas agrícolas, visando otimizar a produtividade e eficiência do cultivo (Amorim et al., 2021; Sulaiman et al., 2023).

O manejo nutricional da cultura é um dos fatores responsáveis pelas características produtivas da mesma (Pereira et al., 2020). Segundo Rodrigues et al. (2021), o nitrogênio é um dos principais nutrientes essenciais para o crescimento, desenvolvimento e atividades fisiológicas e metabólicas das plantas. Outra prática que desempenha um papel significativo na disponibilidade e distribuição de nutrientes no solo, exercendo influência direta sobre as respostas fisiológicas das plantas é a irrigação (Mushtaq et al., 2021). De acordo com Dias e Sentelhas (2019) a irrigação é essencial para suprir as necessidades hídricas da cana-de-açúcar, potencializando a produção agrícola em diversas regiões do país. Entretanto, o manejo dessa prática requer ajustes para atender às demandas específicas de cada cultura (Resende et al., 2021).

O manejo racional e combinado da irrigação e da adubação, são ferramentas importantes para reduzir os efeitos da escassez hídrica e, conseqüentemente, aumentar o potencial de produção dos canaviais (Uribe et al., 2016; Mendonça et al., 2020). Segundo Hoang (2023) para que haja incrementos na produtividade da cana-de-açúcar, a planta requer um suprimento adequado de água e nutriente, em especial o nitrogênio.

Aprimorar a eficiência no manejo da irrigação e adubação é fundamental para impulsionar o rendimento e a sustentabilidade nos sistemas agrícolas (Bashir et al., 2022). Nesse contexto, destaca-se a irrigação por pulsos, projetada para oferecer suporte ao gerenciamento hídrico. Sob essa perspectiva, a irrigação por gotejamento pulsado emerge como uma solução proeminente, apresentando impactos positivos em diversos aspectos, como economia de água e energia, e manutenção da umidade do solo (Eid et al., 2013), aumento na produtividade (Zamora et al., 2019) e eficiência na absorção de nutrientes (Pereira et al., 2023), entre outros.

Essa técnica consiste em uma sucessão de ciclos, nos quais cada ciclo compreende duas fases distintas: a fase de irrigação, na qual o solo é umedecido, seguida pela fase de repouso, que possibilita a redistribuição do teor de água no solo antes do início do próximo ciclo de irrigação (Elnesr e Alazba, 2015; Rank e Vishnu, 2021).

No contexto da cultura da cana-de-açúcar, a irrigação por pulsos pode se configurar como uma estratégia promissora para enfrentar os desafios relacionados à escassez de água, ao mesmo tempo, em que maximiza a absorção de nutrientes e otimiza os processos fisiológicos. Nesse sentido, Andrade et al. (2024), estudando as características fisiológicas da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento subsuperficial pulsado, constataram melhorias nas respostas fisiológicas da cana-de-açúcar quando utilizaram o manejo pulsado.

Estudo sobre o cultivo de diferentes culturas irrigadas por gotejamento pulsado têm apresentado resultados promissores, contribuindo para avanços em eficiência hídrica, produtividade e absorção de nutrientes (El-Mogy et al., 2012; Abdelraouf et al., 2013; Zamora et al., 2021; Menezes et al., 2020, Souza et al., 2024). No entanto, é importante destacar que, no que diz respeito à cultura da cana-de-açúcar, há uma escassez de pesquisas relacionadas à irrigação pulsada, especialmente quando associada ao efeito da aplicação de nitrogênio sobre as respostas fisiológicas da cultura. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da aplicação de doses de nitrogênio, aplicadas via fertirrigação pulsada e contínua, sobre as trocas gasosas na cultura da cana-de-açúcar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), durante o terceiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar (Figura 1), localizada no município de Carpina-PE ($7^{\circ} 51' 24''\text{S}$, $35^{\circ} 14' 16''\text{W}$), com uma altitude de 180 m, região da Zona da Mata de Pernambuco, no período entre dezembro de 2021 a outubro de 2022.

O clima da região é classificado como tropical úmido (As), conforme a classificação de Köppen (Alvares et al., 2014). Essa região possui uma estação chuvosa que ocorre de maio a julho. A precipitação média anual é de 1.174 mm, com o pico de chuvas concentrando-se durante o outono e o inverno, com uma média de 199,6 mm no mês de junho, sendo considerado o mais chuvoso.

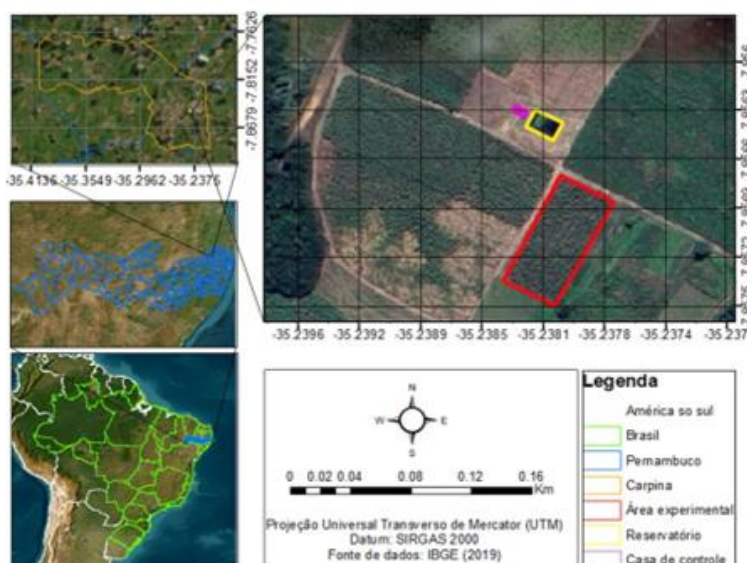


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

Fonte: autora (2024).

Histórico da área, preparo e implantação do experimento

O solo da área de estudo é classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrófico abrupto (EMBRAPA, 2018), textura franco arenoso. A caracterização química e física da área experimental nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40, 0,40-60 m, bem como as características químicas da água utilizada para irrigação estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Análise química e física do solo da área do estudo e análise química da água utilizada para irrigação, Carpina 2024.

		Características químicas do solo																
Camada	pH	Cu	Fe	Mn	Zn	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	M	V	M.O	
m	H ₂ O	-----mg dm ⁻³ -----					----- cmol _c dm ⁻³ -----						----- % -----					
0-0,20	6,10	0,0	66,8	9,2	1,0	6,0	2,3	1,2	0,5	0,17	0,0	5,1	4,17	9,27	0,0	44,8	2,6	
0,20-0,40	6,26	0,0	67,6	13,1	1,2	13,0	2,4	1,3	0,7	0,20	0,0	3,5	4,6	8,1	0,0	56,8	2,6	
0,40-0,60	6,34	0,0	73,1	3,2	0,5	4,0	2,0	2,2	0,3	0,12	0,0	3,2	4,6	7,8	0,0	60,0	1,7	
		Características físicas do solo																
Camada		Areia	Silte	Argila	Textura	Ds	Dp	PT	θ _{CC}	θ _{PMP}								
m					-	----- kg m ³ -----		%	----- m ³ m ³ -----									
0-0,20		70,90	12,00	17,10	Franco Arenosa	1,36	2,63	48,17	0,150	0,100								
0,20-0,40		71,00	9,90	19,10	Franco Arenosa	1,31	2,56	48,79	0,180	0,120								
0,40-0,60		66,00	7,70	26,30	Franco Argilo Arenosa	1,42	2,74	48,32	0,189	0,093								
		Características químicas da água de irrigação																
pH	CE	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Sulfatos	Alcalinidade	Cloretos	RAS	Classificação								
-	dSm ⁻¹	-----mg. L ⁻¹ -----								(mmo. L ¹) ^{0,5}	-							
6,50	0,227	14,0	16,03	12,64	60,0	24,82	140,0	96,11	2,71	C2S1								

Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; P: Fósforo; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Na: Sódio; Al: Alumínio; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; m: Saturação por alumínio; V: Saturação por bases; M.O: Matéria Orgânica; Ds: Densidade do Solo; Dp: Densidade de Partículas; PT: Porosidade Total; pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; θ_{cc} e θ_{PMP}: Respectivamente, Umidade Volumétrica do Solo na Capacidade de Campo e no Ponto de Murcha Permanente; RAS: Razão de Adsorção de Sódio.

O preparo do solo foi realizado 60 dias antes da instalação do experimento, envolvendo o uso de um subsolador para descompactar as camadas mais profundas do solo, seguido de gradagem para destorroar, destruição de restos de culturas, incorporação do calcário e sulcagem, para abertura dos sulcos de plantio. Antes do plantio, procedeu-se à aplicação de $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico, visando corrigir a acidez do solo, elevar o pH e neutralizar a presença de alumínio trocável. O plantio da cana-de-açúcar, correspondente à primeira folha, foi realizado de forma manual no ano de 2019. Foram abertos sulcos com cerca de 25 cm de profundidade para plantio dos rebolos, material vegetal proveniente da EECAC-UFRPE.

A fertilização mineral para a cana planta foi estabelecida com base na análise química do solo, aderindo às recomendações conforme as necessidades nutricionais da cultura, conforme Cavalcanti et al. (2008). A adubação fosfatada e potássica na primeira folha (cana-planta) foi fornecida de forma convencional no plantio. A adubação nitrogenada foi realizada de forma parcelada, aplicando-se 50% da dose recomendada no plantio e os 50% restantes foram fornecidos via fertirrigação a cada quinze dias, durante a aplicação dos tratamentos.

Para a primeira soca, a adubação com nitrogênio (N) foi realizada conforme as recomendações de Aguiar et al. (2014). Foram aplicados 100 kg ha^{-1} de sulfato de amônia de forma convencional, juntamente com 50 kg ha^{-1} de ureia via fertirrigação. Quanto ao fósforo e ao potássio, as quantidades foram baseadas nas orientações de Ribeiro et al. (1999), com doses de P_2O_5 de 40 kg ha^{-1} e 140 kg ha^{-1} de K_2O , respectivamente. O P_2O_5 foi aplicado integralmente de maneira convencional aos 55 dias após o corte (DAC), utilizando-se como fonte o superfosfato triplo, enquanto o K_2O foi aplicado na dose de 80 kg ha^{-1} de forma convencional e 60 kg ha^{-1} via fertirrigação, utilizando-se como fonte o cloreto de potássio.

Quanto ao segundo ciclo da cana-soca, iniciado em dezembro de 2021, o manejo nutricional levou em consideração a análise química do solo. Para assegurar uma eficiente distribuição de nutrientes ao longo do ciclo, a adubação com nitrogênio seguiu-se a curva de acúmulo e exportação de nutrientes estabelecida por Oliveira et al. (2011), no qual se aplicou as doses de 178, 267, 356, 535 e 712 kg ha^{-1} de N, via fertirrigação utilizando como fonte a ureia.

O fósforo e o potássio foram aplicados de acordo com recomendação de Ribeiro et al. (1999). Aos 58 DAC o P_2O_5 foi aplicado todo de forma convencional na dose de 142 kg ha^{-1} , utilizando como fonte o superfosfato triplo, enquanto o K_2O foi aplicado 168

kg ha⁻¹ via fertirrigação, utilizando como fonte o cloreto de potássio branco. O nitrogênio e o potássio aplicados via fertirrigação, foram disponibilizados entre os meses de março a setembro, a cada quinze dias. Os totais de fertilizantes correspondentes a cada mês encontram-se detalhados na Figura 2.

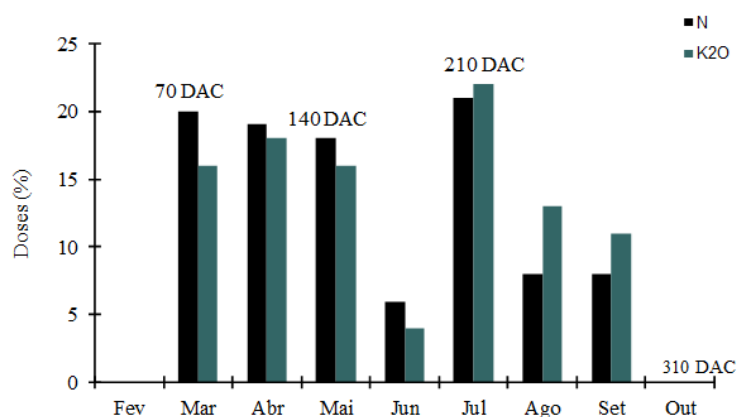


Figura 2. Parcelamento mensal da aplicação, via fertirrigação, de N e K₂O na cultura da cana-de-açúcar.

Fonte: autora (2024).

Foi aplicado, também, uma suplementação nutricional por meio do fertilizante mineral misto denominado KSC Mix, que apresenta garantias de S (11%), Mg (9%), B (0,5%), Cu (0,05), Fe (2,5%), Mn (2%), Mo (0,2%) e Zn (1,5%). Foram realizadas duas aplicações do produto, via foliar, aos 121 e 137 DAC, na dose de 2,5 kg ha⁻¹.

Delineamento experimental e aplicações dos tratamentos

O experimento foi conduzido utilizando-se delineamento experimental em blocos casualizados, adotando-se um esquema fatorial 5 x 2. No primeiro fator, foram consideradas cinco doses de nitrogênio (80; 120; 160; 240 e 320 kg ha⁻¹), aplicadas via fertirrigação e o segundo fator contemplou dois tipos de aplicação da irrigação (irrigação pulsada e contínua), com quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais.

As fertirrigações com ureia e potássio, iniciaram-se aos 70 DAC, mediante a utilização de uma bomba dosadora do modelo Dosador Minidos 10 (10% da vazão), marca Hydro System. Nos tratamentos com irrigação pulsada, foram empregados quatro pulsos de irrigação, com um intervalo de repouso de 40 minutos entre duas de aplicações.

A duração de cada pulso foi determinada após o cálculo diário da quantidade de água necessária para a cultura.

Na área, cada parcela experimental foi formada por quatro sulcos de plantio combinado de 1,40 m + 0,60 m, medindo 7 m de comprimento. As quatro linhas de plantas centrais foram consideradas área útil da parcela onde as avaliações foram conduzidas, desprezando-se 1 m das extremidades de cada linha, totalizando 20 m² de área útil.

A variedade utilizada no experimento foi a RB041443, selecionada pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, que faz parte da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA). Essa variedade apresenta como características desenvolvimento rápido, alta produtividade agrícola, maturação precoce, baixa taxa de florescimento, um longo período útil de industrialização (PUI), alto teor de sacarose e resistência às principais doenças que afetam o canavial, bem como resistência a nematoides (Oliveira et al., 2021).

Características do Sistema de irrigação

O sistema de irrigação adotado foi o gotejamento subsuperficial, composto por fitas gotejadoras (DN 16 mm) equipadas com emissores in-line autocompensantes e antidrenantes. Esses emissores estavam espaçados a cada 0,50 m, apresentando saída cilíndrica do tipo PC/AS com vazão de 1L h⁻¹, e alocados no solo a 0,20 m de profundidade. O sistema era composto, por uma motobomba centrífuga (3,0 cv), um sistema de filtragem e retro lavagem, composto por dois filtros de areia e um sistema de injeção da fertirrigação composto por um manômetro e filtro, bico injetor e uma bomba dosadora de fertilizante. Além disso, incluía 10 registros de espera para o controle do fluxo de água individualmente.

A determinação do tempo de irrigação para cada tratamento foi obtida com base na lâmina líquida (LL), espaçamento entre emissores e linhas, vazão do emissor e a eficiência de aplicação (equação 1). Essa eficiência foi determinada por meio de um teste de uniformidade de distribuição do sistema (CUD) (equação 2), realizado conforme a metodologia apresentada por Keller e Karmeli (1974), cujo valor obtido foi de 98%.

$$TI = \frac{LL * E1 * E2}{ef * q} \quad (1)$$

Em que:

TI - Tempo de irrigação (horas),

LL - Lâmina líquida (mm),

E1 - Espaçamento entre emissores (m),

E2 - Espaçamento entre linhas (m),

ef - Eficiência do sistema de irrigação,

q - Vazão do emissor (L/h).

$$CUD = \frac{q_{1/4}}{q_{Total}} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

CUD - Coeficiente de uniformidade de distribuição (%);

$q_{1/4}$ - média de $1/4$ das vazões que apresentaram os menores valores;

q_{total} - média de todas as vazões.

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi calculada diariamente por meio do produto da ETo obtida pelo Tanque Classe “A” e o coeficiente de cultivo da cana-de-
açúcar, conforme recomendado por Doorenbos e Pruitt, 1977 (equação 3).

$$ETc = ((ECA \times Kp \times Kc) - P) * Kl \quad (3)$$

Em que:

ETc - Evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;

ECA- Evaporação do tanque classe A, mm dia⁻¹;

Kp - Coeficiente do tanque classe A, adimensional e,

Kc - Coeficiente de cultivo, adimensional,

P - Precipitação efetiva (mm),

Kl - Coeficiente de ajuste para a irrigação localizada.

Os valores de Kp foram obtidos a partir de dados de velocidade do vento, umidade relativa do ar e evaporação do tanque Classe A, instalado nas proximidades da área experimental, conforme a metodologia descrita por Doorenbos e Pruitt, (1977).

Os dados relativos ao coeficiente de cultura (K_c) utilizados seguiram as recomendações de Doorenbos e Kassam (1994), com base nos diferentes estágios de desenvolvimento da cultura (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes de cultura (K_c) para cana-de-açúcar nos diferentes estágios de desenvolvimento da cultura.

Estádios de desenvolvimento		
Cobertura vegetal (%)	Dias	K_c
0 a 25	0 – 30	0,40
	30 – 45	0,50
	45 – 60	0,60
25 a 50	60 – 80	0,75
50 a 75	100 – 125	0,95
75 a 100	125 – 180	1,10
Máxima demanda	180 – 270	1,20
	270 – 300	1,30
Maturação	300 – 330	1,0
	330 – 360	0,60

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994).

Durante o período experimental, foi realizado o monitoramento da variação dos dados de precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c) e a lâmina bruta (LB) (Figura 4). Nesse período, a precipitação efetiva acumulada foi de 1.129 mm por ano⁻¹. A ET_o acumulada ao longo do ciclo foi de 1.139 mm, com uma média de 4,0 mm dia⁻¹. Já a evapotranspiração da cultura (ET_c) acumulou 1.039 mm, com uma média de 3,0 mm dia⁻¹, e a lâmina bruta aplicada foi de 166 mm.

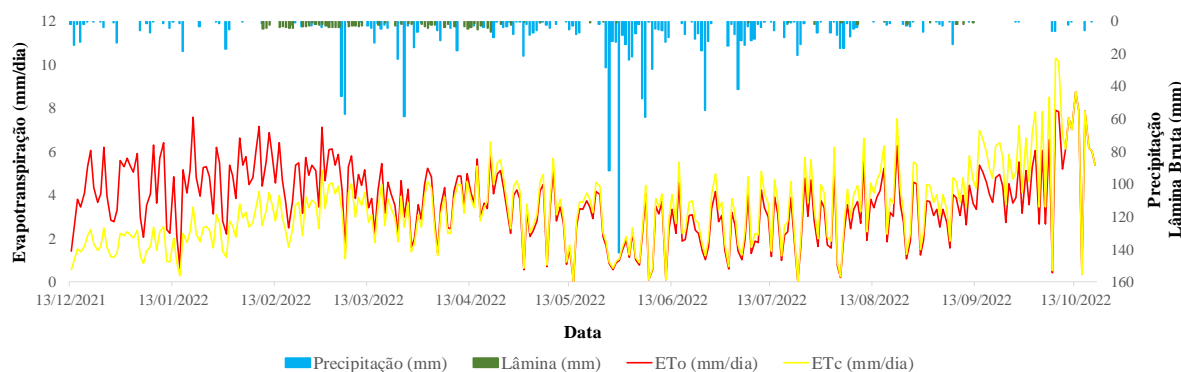


Figura 3. Dados de precipitação, evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c) e lâmina bruta aplicada na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2021/2022.

Com o intuito de induzir estresse hídrico na cana-de-açúcar, visando aumentar a concentração de sacarose nos colmos, promover a maturação e elevar a concentração de açúcar a irrigação foi suspensa aos 270 dias após o corte (DAC). A colheita da cana-de-açúcar foi realizada aos 310 DAC.

Aos 240 e 300 DAC, procederam-se às avaliações das trocas gasosas na cultura da cana-de-açúcar. Foram avaliados parâmetros como a condutância estomática (g_s), em $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a fotossíntese líquida (A), em $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a transpiração (E), em $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a concentração interna de CO_2 (C_i) em $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$, a temperatura foliar (T_f) em $^\circ\text{C}$, a eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), em $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, obtida pela relação entre a fotossíntese líquida e a condutância estomática, eficiência instantânea de uso da água (A/E), em $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ obtida pela relação entre a fotossíntese líquida e a transpiração, e a eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i), em $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, calculada a partir da fotossíntese líquida com concentração interna de CO_2 .

As leituras foram realizadas no período entre as 11 e 13h, um período caracterizado por intensa radiação solar e elevada demanda de evapotranspiração. O sistema utilizado foi aberto, com a câmara foliar ajustada para uma densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos de $1800 \pm 2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Foram selecionadas duas plantas por parcela, escolhidas na área útil de cada parcela, e as leituras foram realizadas no terço médio da folha +3. Identificada como a terceira folha da haste ou barbeta da bainha, denominada folha TVD, considerada fisiologicamente ativa e não sombreada, conforme definido por Malavolta et al. (1997). Para as medições, utilizou-se um Analisador Portátil de Gás Infravermelho (Infra-Red Gas Analyzer – IRGA), modelo Li 6400 XT (LI-COR).

Após a obtenção dos dados, foram realizados testes de normalidade e homoscedasticidade. Em seguida, submetidos uma análise de variância (ANOVA) através do teste F e quando constatados feitos significativos, as doses de nitrogênio (80, 120, 180, 240 e 320 kg ha^{-1}) foram comparadas por meio de uma análise de regressão. Em relação aos diferentes tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua), estes foram comparados através do teste de médias de scott-knott a 0,05 de probabilidade.

A escolha dos modelos de regressão fundamentou-se no efeito não significativo do desvio de regressão, na significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p < 0,05$), no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) e na interpretação biológica consistente para cada variável em relação aos tratamentos. Todas as análises foram conduzidas utilizando o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verifica-se, por intermédio da Tabela 3, que houve efeito significativo da interação entre os tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) e as doses de nitrogênio (80, 120, 180, 240 e 320 kg ha⁻¹) sobre a fotossíntese líquida (A) aos 240 DAC. As variáveis, fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), a transpiração (E), assim como, a eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) e eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) foram influenciadas significativamente, de forma isolada, pelo tipo de aplicação de irrigação nas duas épocas de avaliações, aos 240 e 300 DAC, e a eficiência instantânea do uso da água (A/E) e a concentração interna de CO₂ (C_i) apenas aos 300 DAC.

Já o fator isolado dose de nitrogênio exerceu influência significativa na fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s) e eficiência instantânea do uso da água (A/E) tanto aos 240 quanto aos 300 DAC. Para a transpiração, a influência foi observada apenas aos 300 DAC. No que diz respeito à eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) e eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i), as doses de nitrogênio aplicadas exerceram efeito significativo apenas aos 240 DAC. A temperatura foliar (T_f) e a concentração interna de CO₂ (C_i) da cana-de-açúcar não sofreram influência significativa pelos fatores estudados durante as duas épocas de leituras.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para os parâmetros fisiológicos fotossíntese líquida (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática (*gs*), concentração interna de CO₂ (*Ci*), eficiência instantânea do uso da água (*A/E*), eficiência intrínseca do uso da água (*A/g_s*), eficiência instantânea de carboxilação (*A/Ci*), e temperatura foliar (*Tf*) da cana-de-açúcar, aos 240 e 300 DAC, em função da aplicação de doses de nitrogênio, via fertirrigação pulsada e contínua.

Parâmetros fisiológicos aos 240 DAC									
Quadrado Médio									
FV	GL	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>gs</i>	<i>Ci</i>	<i>A/E</i>	<i>A/g_s</i>	<i>A/Ci</i>	<i>Tf</i> (°C)
Tipos de aplicação (T)	1	143,76**	2,683*	0,00162*	742,06 ^{ns}	0,047 ^{ns}	2124,83*	0,0166**	0,000 ^{ns}
Doses de nitrogênio (DN)	4	40,13**	1,124 ^{ns}	0,00141*	6988,72 ^{ns}	1,684**	4442,23**	0,0134**	0,066 ^{ns}
DN x T	4	24,70*	0,469 ^{ns}	0,00027 ^{ns}	3387,28 ^{ns}	0,158 ^{ns}	45,10 ^{ns}	0,0031 ^{ns}	0,466 ^{ns}
Blocos	3	7,87 ^{ns}	0,460 ^{ns}	0,00021 ^{ns}	2412,35 ^{ns}	0,433 ^{ns}	328,57 ^{ns}	0,0012 ^{ns}	25,931 ^{ns}
Resíduo	27	8,50	0,639	0,00037	1882,38	0,282	341,24	0,041	1,383
CV	%	29,32	26,68	29,99	33,48	16,34	12,66	41,79	3,14

Parâmetros fisiológicos aos 300 DAC									
Quadrado Médio									
FV	GL	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>gs</i>	<i>Ci</i>	<i>A/E</i>	<i>A/g_s</i>	<i>A/Ci</i>	<i>Tf</i> (°C)
Tipos de aplicação (T)	1	73,30*	2,730**	0,0117**	5440,88**	2,131**	1165,16*	0,067*	1,958 ^{ns}
Doses de nitrogênio (DN)	4	63,19**	0,514*	0,0045**	659,07 ^{ns}	0,660**	465,02 ^{ns}	0,019 ^{ns}	0,798 ^{ns}
DN x T	4	5,05 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	329,16 ^{ns}	0,268 ^{ns}	103,78 ^{ns}	0,007 ^{ns}	1,126 ^{ns}
Blocos	3	49,19*	0,166 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	695,18 ^{ns}	2,063**	415,75 ^{ns}	0,024 ^{ns}	10,669 ^{ns}
Resíduo	27	12,80	0,170	0,0007	630,13	0,304	237,78	0,012	1,093
CV	%	20,19	11,11	20,81	32,28	11,24	8,98	42,02	2,87

Por intermédio da análise do desdobramento dos fatores, verificou-se que houve diferença significativa das doses de N dentro dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) na variável condutância estomática aos 240 DAC (Figura 4A) e do efeito isolado das doses de nitrogênio aos 300 DAC (Figura 4B).

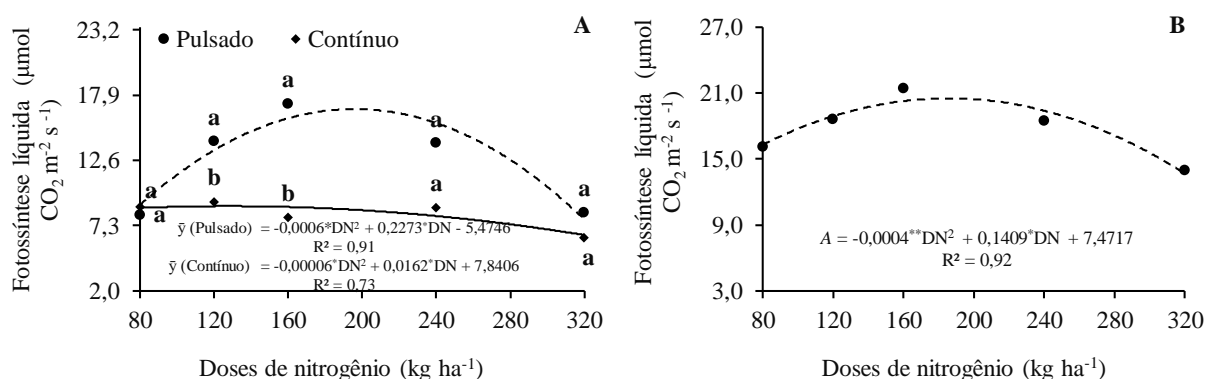


Figura 4. Efeito do desdobramento dos fatores doses de nitrogênio e tipos de aplicação da irrigação, aos 240 DAC (A), e efeito isolado das doses de nitrogênio aos 300 DAC (B), sobre a fotossíntese líquida da cana-de-açúcar.

** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) entre os tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

Sob irrigação pulsada, aos 240 DAC, o valor máximo da A ($16,05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foi obtido na dose de $189,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, representando aumento de $82,38\%$ em relação à menor dose aplicada (80 kg ha^{-1} de N), o qual foi de $8,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Em contrapartida, quando as plantas foram submetidas à irrigação contínua, a dose de 135 kg ha^{-1} de N proporcionou maior valor da A ($8,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), evidenciando um incremento percentual de $2,29$ e $30,8\%$, em relação às doses de 80 e 320 kg ha^{-1} de N, respectivamente (Figura 4A).

A resposta das trocas gasosas à adubação nitrogenada se faz essencial para melhor compreensão do processo de produção de biomassa nas plantas e para estabelecer as doses de N que proporcionem a máxima eficiência biológica da planta. Em ambas as épocas de leitura, a A aumentou com o incremento das doses de N. Segundo Abrantes et al. (2019), esse aumento é atribuído à ação do nitrogênio na composição das moléculas de clorofila, onde estão os centros ativos responsáveis pela fotossíntese. Por outro lado, Gai et al. (2017) sugerem que nas menores doses de N, provavelmente ocorreu uma diminuição do potencial de turgescência dos tecidos foliares, causando fechamento dos estômatos,

aumento da resistência à difusão do CO₂ e, conseqüentemente, uma diminuição na taxa fotossintética.

Verifica-se, por meio do desdobramento dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) dentro de cada uma das doses de N aplicadas (Figura 4A), que houve diferença significativa entre a irrigação pulsada e contínua nas doses de 120 e 160 kg ha⁻¹ de N, com incrementos percentuais de 53,4 e 117% na fotossintética líquida das plantas irrigadas na forma de pulso, em relação à irrigação contínua.

Em relação ao efeito da irrigação pulsada, essa melhoria na *A* da cana-de-açúcar foi viabilizada pela manutenção consistente da umidade no solo ao longo do dia, alcançada por meio da aplicação fracionada da lâmina, o que contribuiu de maneira significativa para manter o processo fotossintético da cultura. Em estudo recente, Menezes et al. (2024), na cultura da cana-de-açúcar, constataram que a irrigação pulsada favoreceu a manutenção da fotossíntese líquida, obtendo valores de 17,3 e 17,9 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ aos 180 e 315 DAC. Outrossim, Andrade et al. (2024) para cultivar RB041443 (cana-planta) sob gotejamento pulsado, encontraram valores de fotossíntese líquida de 19,48 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ aos 330 DAC.

Na segunda época de leitura, aos 300 DAC (Figura 4B), a dose estimada de 176,1 kg ha⁻¹ de N proporcionou uma *A* de 19,8 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, refletindo incremento de 22,9% em relação à dose de 80 kg ha⁻¹ de N, cujo valor obtido foi de 16,1 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹. Corroborando com esses resultados, Dinh et al. (2017) obtiveram para cana-de-açúcar, cultivar comercial NiF8, fotossíntese líquida de 27,9, 30,9 e 31,5 μmol m⁻² s⁻¹, com as doses de 90, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, aos 120 dias após o plantio, respectivamente. Castro-Nava et al. (2020), para cana-de-açúcar (segunda soca), os quais obtiveram valores de *A* de 17,5 e 15,5 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, utilizando 90 e 180 kg ha⁻¹ de N, aos 220 DAP, respectivamente. Os autores ressaltaram que a aplicação de fertilizantes nitrogenados impactou a fotossíntese da cana-de-açúcar, mas esse impacto dependeu das doses utilizadas e do momento em que a medição da fotossíntese foi realizada.

Por meio da Figura 5, pode-se observar o efeito das diferentes doses de nitrogênio sobre a transpiração (*E*) das plantas de cana-de-açúcar aos 240 DAC.

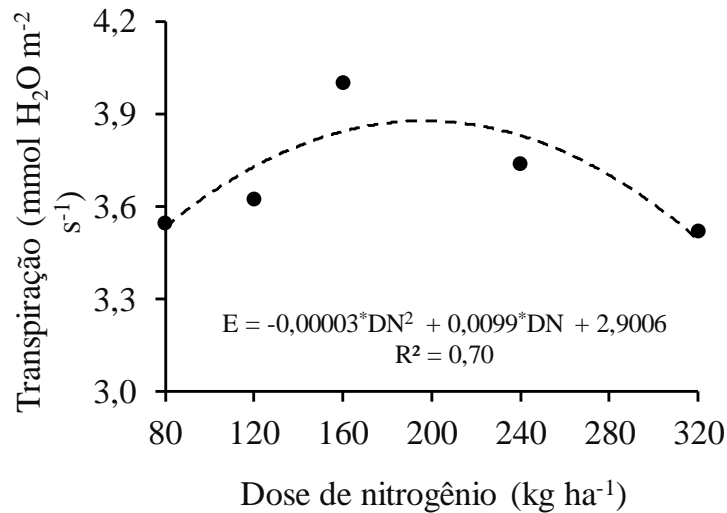


Figura 5. Transpiração da cultura da cana-de-açúcar, aos 240 DAC, em função das doses de nitrogênio aplicadas.

* - Significativo a $p \leq 0,05$, respectivamente, pelo teste F.

A taxa de transpiração foliar (E) refere-se à quantidade de água transpirada por unidade de área foliar em um determinado período (Ma et al. 2022). Como apresentado na Figura 5 a maior taxa de E foi obtida na dose correspondente a 165 kg ha⁻¹ de N, cujo valor encontrado foi de 3,7 mmol H₂O m⁻² s⁻¹, representando um aumento de 5,7% em comparação com a menor dose (80 kg ha⁻¹ N – 3,5 mmol H₂O m⁻² s⁻¹). Segundo Taiz et al. (2017), o nitrogênio é nutriente necessário durante a formação dos cloroplastos, síntese proteica e membranas dos tilacóides, tendo papel primordial na transpiração.

Assim como observado na fotossíntese líquida, as doses de N promoveram aumento na E . O aumento observado na transpiração foliar até o ponto máximo da dose de nitrogênio ocorreu em função da maior atividade enzimática, aumentando a absorção de água pelas raízes e a abertura estomática e, conseqüentemente, resultando em uma maior capacidade fotossintética (Yin et al., 2009; Lopes et al., 2020).

Resultados próximos aos obtidos na presente pesquisa, foram encontrados por Izquierdo-Hernández et al. (2016) que estudando a resposta fisiológica da cana-de-açúcar sob diferentes doses de N, obtiveram valores de transpiração de 6,1, 6,3 e 5,3 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ nas doses de 0, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, aos 150 DAP. Lira et al. (2018), constataram transpiração para a cana-de-açúcar de 6,3 e 3,0 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ aos 140 e 320 DAP, respectivamente. Corroboram, ainda, com Andrade et al. (2024) os quais

encontraram valores de 4,31 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ aos 330 DAP na cana-de-açúcar (RB041443), utilizando 150 kg ha⁻¹ de N.

A adubação nitrogenada promoveu aumentos na condutância estomática (*gs*) aos 240 e 320 DAC (Figura 6A e B). Aos 240 DAC, a máxima *gs* foi obtida na dose correspondente 150 kg ha⁻¹ de N, cujo valor obtido foi de 0,063 mol H₂O m⁻²s⁻¹, representando ganhos de 16,6% à menor dose aplicada, o qual o valor foi 0,054 mol H₂O m⁻² s⁻¹. Quanto a leitura realizada aos 300 DAC (Figura 6B), o valor máximo de *gs* foi obtido na dose de 150 kg ha⁻¹ de N, atingindo 0,132 mol H₂O m⁻²s⁻¹, com incrementos de 12,8% em relação às doses de 80 kg ha⁻¹ de N, que registraram valores de 0,117 mol H₂O m⁻²s⁻¹.

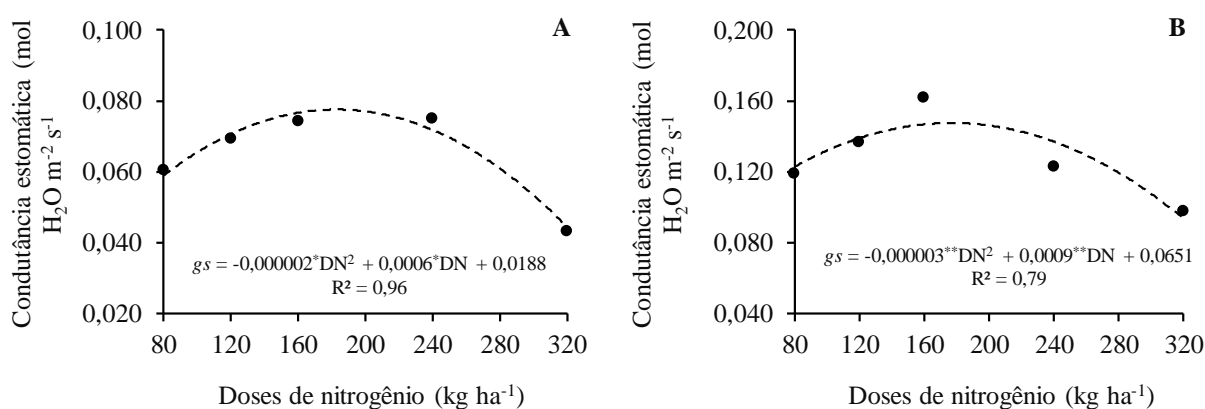


Figura 6. Condutância estomática (*gs*) da cultura da cana-de-açúcar aos 240 (A) e 300 (B) DAC em função das doses de nitrogênio aplicadas.

** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F.

No presente estudo, doses abaixo de 150 kg ha⁻¹ de N, aplicada via fertirrigação induziu a abertura dos estômatos de forma eficiente, o que proporcionou aumento da fotossíntese nas plantas da cana-de-açúcar. O aumento na *gs*, pode ser atribuído ao efeito positivo do nitrogênio nas plantas, sendo um componente essencial na síntese de pigmentos e enzimas fotossintéticas, pois nitrogênio melhora a regulação estomática e o ponto de saturação luminosa (Wang et al., 2016; Figueiredo et al., 2023) explicando assim os aumentos observados na *gs* neste estudo. Além disso, Cechin et al. (2019), afirmaram que aumento na *gs* implica em uma maior disponibilidade de CO₂ na cavidade subestomática, mas também resulta em uma maior perda de vapor d'água pelos estômatos.

Por outro lado, Britto e Kronzucker (2002) esclarecem que a diminuição na *gs* devido ao aumento da disponibilidade de nitrogênio pode ser resultado de diversos

fatores, incluindo a redução da concentração foliar de potássio. Que segundo o autor, é um elemento vital para o funcionamento normal dos estômatos e pode ser afetado devido à competição com cátions K^+ e Na^+ presentes no solo.

Castro-Nava et al. (2020) estudando os efeitos da aplicação das doses de nitrogênio na cana-de-açúcar obtiveram valor de $0,23 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ com a aplicação de 180 kg ha^{-1} de N. Menezes et al. (2024) tiveram valores de condutância estomática para cana-de-açúcar, cultivar RB041443, de $0,20$ e $0,27 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, aos 180 e 315 DAC. Os autores explicam que o maior valor encontrado para g_s obtido aos 315 DAC pode ter relação com o maior desempenho fotossintético dessa cultivar ao longo do ciclo produtivo. Estudando a cultura da cana-de-açúcar (RB041443) sob irrigação por gotejamento subsuperficial, Andrade et al. (2024) encontraram valor de g_s de $0,108 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 330 DAC.

Quanto à A/E aos 240 DAC (Figura 7A), o maior valor obtido foi $4,09 \text{ } \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, quando fertirrigação com a dose de 185 kg ha^{-1} de N. Esse resultado proporcionou incrementos de $15,5$ e $28,6\%$ em relação à menor (80 kg ha^{-1} N) e a maior dose (320 kg ha^{-1} N) aplicada, respectivamente. Conforme a leitura realizada aos 300 DAC (Figura 7B), o valor máximo encontrado de A/E foi de $5,09 \text{ } \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, estimado na dose correspondente a 185 kg ha^{-1} de N, apresentando incremento percentual de $9,4\%$ em relação às plantas que receberam 80 kg ha^{-1} de N, o qual foi de $4,65 \text{ } \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$.

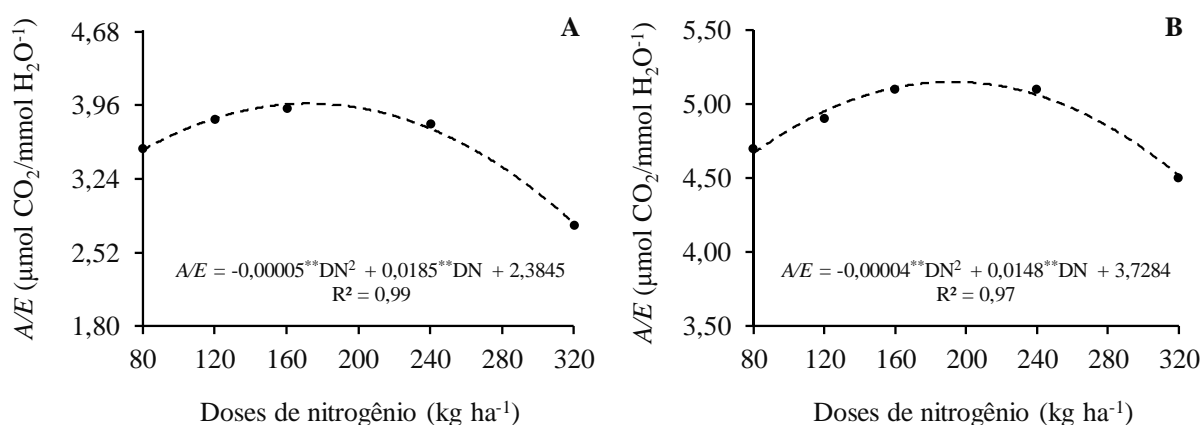


Figura 7. Eficiência instantânea do uso da água (A/E), aos 240 (A) e 300 DAC (B) na cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio aplicadas.

** - Significativo a $p \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F.

O aumento da eficiência instantânea do uso da água (A/E) sob adubação nitrogenada, que segundo Lima et al. (2019); Wanderley et al. (2022) reflete o papel do nitrogênio no metabolismo vegetal por meio de seu papel estrutural na síntese de aminoácidos, proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos, vitaminas e clorofila, compostos orgânicos essenciais para a sobrevivência das plantas. Este parâmetro é determinado pela relação entre a taxa de fotossíntese e a taxa de transpiração (A/E), na qual os valores medidos relacionam-se à quantidade de carbono que a planta recebe para cada unidade de água que perde (Jaimez et al., 2005; Silva et al., 2023).

Segundo Taiz et al. (2017) o fornecimento adequado de N favorece maiores taxas fotossintéticas nas plantas devido ao aumento do pigmento fotossintetizante, garantindo que a água seja utilizada de forma mais eficiente para processos fisiológicos. Nesse contexto, Dinh et al. (2017), estudando a aplicação de diferentes doses de nitrogênio sobre as características fisiológicas da cana-de-açúcar, obtiveram valores de A/E de 6,4; 6,5; 7,1 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ para as doses de 90, 180 e 270 kg ha^{-1} de N, respectivamente, aos 120 DAP. Leanasawat et al. (2021), encontraram valores de 8,56 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ na cana-de-açúcar aos 180 DAP. Já Menezes et al. (2024), para a cultivar RB041443, irrigada com diferentes lâminas de reposição hídrica, na região da zona da Mata de Pernambuco, encontraram valores máximos de A/E de 5,7 e 3,4 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, aos 180 e 315 DAC, em condições de 77 e 79% da ETc, respectivamente.

Segundo Larcher (2000), a relação entre absorção de CO_2 e consumo de H_2O é melhor quando os estômatos estão parcialmente fechados, levando a uma redução em ambos os processos de difusão e maiores valores de A/E . Essa condição favorece uma utilização mais eficiente da água durante o processo fotossintético.

Em relação à eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), verifica-se, por meio da Figura 8A, que aos 240 DAC o valor máximo obtido para a variável foi de 165,1 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, estimado na dose de 168,4 kg ha^{-1} de N, revelando um aumento percentual de 14,6% em relação à dose de 80 kg ha^{-1} de N (144 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$).

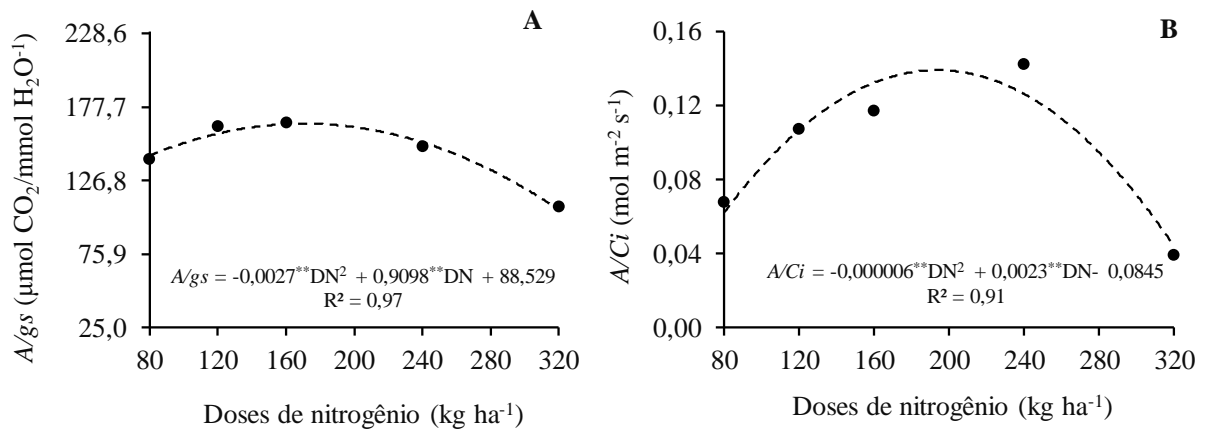


Figura 8. Eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) (A) e eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) (B) da cana-de-açúcar, aos 240 DAC, em função das doses de nitrogênio aplicadas.

** - Significativo a $p \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F.

A eficiência intrínseca do uso da água aumentou até a dose de 168 kg ha⁻¹ de N, reduzindo nas maiores doses. Segundo Talebnejad e Sepakhah (2016), a ocorrência desse efeito pode estar associada ao efeito positivo do N sobre a abertura estomática, como observado no gs, favorecendo a difusão do CO₂ nas células do mesófilo foliar, facilitando consequentemente a perda de água pela transpiração, reduzindo a eficiência do uso da água. Menezes et al. (2024), avaliando o desempenho fisiológico da cana-de-açúcar, submetidas a cinco regimes hídricos (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc), obtiveram valor máximo de A/g_s de 88,6 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, aos 180 DAC, na reposição hídrica de 90% da ETc, respectivamente. Silva et al. (2023) para a cana-de-açúcar (RB041443), obtiveram 80 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ de A/g_s , aos 150 DAC.

Com relação à eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) (Figura 8B), constatou-se que aos 240 DAC, o maior valor foi de 0,135 mol m⁻² s⁻¹, obtido na dose correspondente a 191,6 kg ha⁻¹ de N, apresentando um incremento de 121,3% sobre a dose 80 kg ha⁻¹ de N, o qual o valor correspondente foi de 0,061 mol m⁻² s⁻¹.

Assim como a A/g_s , a A/C_i aumentou com o incremento de N, entretanto, altas doses de N reduziram a A/C_i , o que, segundo Lorenzoni et al. (2018), é possivelmente explicado pelo aumento da atividade da oxigenase pela Rubisco à custa da carboxilação, levando a uma menor taxa de assimilação de carbono, mesmo com alta disponibilidade de nitrogênio. Silva et al. (2023) para cana-de-açúcar (RB041443), verificaram que, aos 180 DAP, a A/C_i foi de 0,10 mol m⁻² s⁻¹. Gonçalves et al. (2017) obtiveram valor para

A/C_i de 0,18 mol m⁻² s⁻¹ aos 241 DAC, para cana-de-açúcar. Menezes et al. (2024) encontraram 0,21 mol m⁻² s⁻¹ de A/C_i , aos 315 DAC para cultivar RB041443.

Por intermédio da Tabela 4 pôde-se observar que houve diferença significativa entre os tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) para os parâmetros fisiológicos fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO₂ (C_i) e temperatura foliar (T_f), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) da cultura da cana-de-açúcar, aos 240 e 300 dias após ao corte (DAC).

Tabela 4. Teste de média para as variáveis, fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO₂ (C_i) e temperatura foliar (T_f), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) na cultura da cana-de-açúcar submetidas à irrigação por gotejamento pulsado e contínuo.

Tipo de aplicação da irrigação	Média dos parâmetros fisiológicos aos 240 DAC							
	A	E	g_s	C_i	T_f	A/E	A/g_s	A/C_i
Pulsado	11,84 a	3,25 a	0,071 a	125,28 a	37,45 a	3,53 a	153,15 a	0,114 a
Contínuo	8,05 b	2,73 b	0,058 b	133,90 a	37,45 a	3,60 a	138,57 b	0,073 b
	Média dos parâmetros fisiológicos aos 310 DAC							
	A	E	g_s	C_i	T_f	A/E	A/g_s	A/C_i
Pulsado	19,07 a	3,97 a	0,145 a	89,92 a	36,65 a	5,13 a	176,89 a	0,309 a
Contínuo	16,36 b	3,45 b	0,111 b	66,60 b	36,20 a	4,67 b	166,10 b	0,227 b

Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Scott Knott para os tipos de irrigação, pulsada e contínua.

Na leitura realizada aos 240 DAC, os maiores valores para os parâmetros fisiológicos foram obtidos com aplicação da irrigação pulsada, evidenciando incrementos de 47,0; 19,0; 22,4; 10,5; 56,1%, para A , E , g_s , A/g_s , A/C_i , respectivamente. Quanto a segunda leitura, aos 300 DAC, a irrigação pulsada também proporcionou maiores de valores, sendo constatados incrementos de 16,5; 15,0; 30,6; 9,8; 35,0; 6,4; 36,1% para as variáveis A , E , g_s , A/E , C_i , A/g_s , A/C_i , respectivamente, quando comparada com a irrigação aplicada de forma contínua (Tabela 4).

A irrigação por pulso é usada em diferentes regiões do mundo, principalmente pela sua capacidade de reduzir as perdas e melhorar a eficiência do uso da água. Nesse contexto, no presente estudo, a manutenção da umidade do solo ao longo do dia favoreceu

as respostas fisiológica das plantas. De acordo com Menezes et al. (2024), a manutenção da umidade do solo por mais tempo ao longo do dia, pode favorecer as atividades fotossintéticas das plantas, as fases de molhamento e repouso na distribuição de água, contribuir de forma mais significativa para a sinalização do controle estomático pelas plantas e beneficiar os processos metabólicos.

4. CONCLUSÃO

A irrigação pulsada atrelada a dose de 189,4 kg ha⁻¹ de N proporcionou maior fotossíntese líquida às plantas de cana-de-açúcar.

Doses de nitrogênio entre 150 e 190 kg ha⁻¹ otimizaram as respostas fisiológicas da cultura, enquanto doses maiores que 168,4 kg ha⁻¹ de N reduziram a eficiência de carboxilação e a eficiência do uso da água.

A irrigação pulsada, contribuiu para aumentar a fotossíntese líquida, a transpiração, a condutância estomática, a concentração interna de CO₂, a eficiência instantânea do uso da água, a eficiência intrínseca do uso da água e a eficiência instantânea de carboxilação.

5. REFERÊNCIAS

- Abdelraouf, R. E., Abou-Hussein, S. D., Marzouk, N. M., Elbegawy, M. K. H. Effect of pulse drip irrigation technology on the economical parameters of potato production under organic agriculture. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 9, p. 601-611, 2013. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2013.45036>
- Abrantes, E. G., Rocha, J. L. A., Paiva, K. F., Rocha, R. H. C., Silva, P. A., Gondim, A. R. O. G., Santos, E. N., Marcelino, R. M. O. S. Gas exchange and nitrogen compartmentalization of eggplant under nitrogen and silicon doses. *Journal of Experimental Agriculture International*, v. 38, n. 2, p. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v38i230295>
- Aguiar, A. T. E., Gonçalves, C., Paterniani, M. E. A. G. Z., Tucci, M. L. S. A., Castro, C. E. F. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas - Boletim 200. 7ª Ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2014. 452p. (Boletim IAC, nº 200).
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., Sparovek, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- Amorim, F. R., Queiroz, T. R., Oliveira, S. C., Lourenzani, W. L. Cultivation practices of sugarcane: An analysis of the competitiveness of sugarcane suppliers in Brazil. *Sugar Tech*, v. 23, n. 3, p. 476-483, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00935-7>
- Andrade, W. J. M., Silva, G. F., Menezes, S. M., Silva, M. M., Silva, A. O., Lopes, I. A. P., Sousa, R. R. Características fisiológicas e rendimento da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação. *Observatório de La Economía Latino-Americana*, v. 22, n. 1, p. 4387-4415, 2024. <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-232>
- Bashir, M., Bhat, M. A., Sharma, S., Rana, N., Fayaz, S., Iqbal, S., Patyal, D. Efficient nutrient management in field crops for food and environmental safety. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, v. 23, n. 39, p. 58-67, 2022. DOI: 10.56557/PCBMB/2022/v23i39-408030
- Britto D. T., Kronzucker H. J. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal Plant Physiol*, v. 159, n. 6, p. 567-584, 2002. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-0774>

- Castro-Nava, S., Herrera-Sepúlveda, M. R., García-Girón, J. O. S. E. Photosynthetic response to nitrogen fertilization in sugarcane under rainfed and high-temperature conditions. *Revista Caatinga*, v. 33, n. 4, p. 1140-1149, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n429rc>
- Cavalcanti, F. L. A., Santos, J. C. P., Pereira, J. R., Leite, J. P., Silva, M. C. L., Freire, F. J., Silva, D. J., Sousa, A. R., Messias, A. S., Faria, C. M. B., Burgos, N., Lima Júnior, M. A., Gomes, R. V., Cavalcanti, A. C., Lima, J. F. V. F. *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. 2ª aproximação. 3 ed.* Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco IPA, 2008. 212 p.
- Cechin, I., Valquilha, E. M. Nitrogen effect on gas exchange characteristics, dry matter production and nitrate accumulation of *Amaranthus cruentus* L. *Brazilian Journal of Botany*, v. 42, n. 3, p. 373-381, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40415-019-00542-1>
- Dias, H. B., Sentelhas, P. C. Dimensioning the impact of irrigation on sugarcane yield in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, n. 1, p. 29-37, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0619-x>
- Dinh, T. H., Watanabe, K., Takaragawa, H., Nakabaru, M., Kawamitsu, Y. Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. *Plant Production Science*, v. 20, n. 4, p. 412-422, 2017. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>
- Doorenbos, J. Y., Pruitt, W. O. *Crop water requirements. FAO Estudio de Riego y Drenaje, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, n. 24, 1977. 144p.*
- Doorenbos, J., Kassan, A. H. *Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33), 1994. 306p.*
- Eid, A. R., Bakry, B. A., Taha, M. H. Effect of pulse drip irrigation and mulching systems on yield, quality traits and irrigation water use efficiency of soybean under sandy soil conditions. *Agricultural Sciences*, v. 4, n. 5, p. 249-261, 2013, <https://doi.org/10.4236/as.2013.45036>
- El-Mogy M., Abuarab M., Abdullatif, A. Response of Green Bean to Pulse Surface Drip Irrigation. *Journal of Horticultural Science e Ornamental Plants*, v. 4, n. 3, p. 329-334, 2012. DOI: 10.5829/idosi.jhsop.2012.4.3.263

- Elnesr, M. N., Alazba, A. A. The effects of three techniques that change the wetting patterns over subsurface drip-irrigated potatoes. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 13, n. 3, p.1204-1204, 2015. <https://doi.org/10.5424/sjar/2015133-7102>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5.ed. Brasília, 2018. 355p.
- Ferreira, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*. v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Figueiredo, F. R., Fátima, R. T. D., Nóbrega, J. S., Silva, T. I. D., Ferreira, J. T., Ribeiro, J. E. D. S., Dias, T. J. Morphophysiology and gas exchange of pomegranate under salt stress and foliar application of nitrogen. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 27, n. 12, p. 958-965, 2023. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n12p958-965>
- Gai, Z., Zhang, J., Li, C. Effects of starter nitrogen fertilizer on soybean root activity, leaf photosynthesis and grain yield. *PloS One*, v. 12, n. 4, p. e0174841, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174841>
- Gonçalves, I. Z., Barbosa, E. A. A., Santos, L. N. S., Nazário, A. A., Feitosa, D. R. C., Tuta, N. F., Matsura, E. E. Nutritional balance and production of sugarcane irrigated with treated wastewater through subsurface drip. *Irrigation Science*, v. 37, p. 207-217, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00620-y>
- Hoang, D. T. Effects of Nitrogen Applications on Transpiration, Physiological, and Growth Characteristics of Sugarcane (*Saccharum spp.*). *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, v. 6, n. 2, p. 1778-1786, 2023. <https://doi.org/10.31817/vjas.2023.6.2.03>
- Izquierdo-Hernández, J., Salgado-García, S., C Lagunes-Espinoza, L. D., Palma-López, D. J., Ortiz-Laurel, H., Cordova-Sánchez, S., Castelán-Estrada, M. Nutritional and physiological response of sugarcane varieties to nitrogen fertilization in a haplic cambisol. *Sugar Tech*, v. 18, n. 5, p. 493-499, 2016. DOI 10.1007/s12355-015-0416-8
- Jaimez, R. E., Rada, F., García-Núñez, C., Azócar, A. Seasonal variations in leaf gas exchange of plantain cv. Hartón (*Musa AAB*) under different soil water conditions in

- a humid tropical region. *Scientia Horticulturae*, v. 104, n. 1, p. 79-89, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.07.002>
- Keller, J., Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, v. 17, n. 4, p. 678-684, 1974.
- Kölln, O. T., Castro Gava, G. J., Mariano, E., Cantarella, H., Eduardo, L., Panutti, R. M. U., Trivelin, P. C. O. Biomass accumulation and growth curve in sugarcane fertigated with nitrogen doses. *Australian Journal of Crop Science*, v. 17, n. 3, p. 244-253, 2023.
doi: 10.21475/ajcs.23.17.03.p3079
- Larcher, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Roma, 2000. 531p.
- Leanasawat, N., Kosittrakun, M., Lontom, W., Songsri, P. Physiological and agronomic traits of certain sugarcane genotypes grown under field conditions as influenced by early drought stress. *Agronomy*, v. 11, n. 11, p. 2319, 2021.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11112319>
- Lima, G. S., Pinheiro, F. W. A., Dias, A. S., Gheyi, H. R., Nobre, R. G., Soares, L. A. D. A., da Silva, E. M. Gas exchanges and production of West Indian cherry cultivated under saline water irrigation and nitrogen fertilization. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 40, n. 6, p. 2947-2960, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n2p135-141>
- Lira, R. M., Silva, E. F. F., Simões Neto, D. E., Santos Júnior, J. A., Lima, B. L. C., Silva, J. S. Growth and yield of sugarcane irrigated with brackish water and leaching fractions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 3, p. 170-175, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n3p170-175>
- Lopes, M. N., Cândido, M. J. D., Pompeu, R. C. F. F., da SILVA, R. G., de LACERDA, C. F., Bezerra, M. A., Carneiro, M. D. S. Gas exchange in Massai grass fertilized with nitrogen and grazed by sheep. *Bioscience Journal*, v. 36, n. 1, p. 52-160, 2020.
<http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v36n1a2020-42411>
- Lorenzoni, M. Z., Rezende, R., de Souza, Á. H. C., Santos, F. A. S., Lozano, C. S., de Castro Seron, C. Gas exchange, leaf and root dry mass in bell pepper under fertigation with nitrogen and potassium. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 39, n. 2, p. 511-520, 2018.
<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n2p511>

- Ma, T., Chen, K., He, P., Dai, Y., Yin, Y., Peng, S., Huang, J. Sunflower photosynthetic characteristics, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency under different soil salinity and nitrogen applications. *Water*, v. 14, n. 6, p. 982, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14060982>
- Malavolta, E., Vitti, G. C., Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- Mendonça, M. F. D., Dantas Neto, J., Silva, P. F. D., Oliveira, E. C. Yield and technological quality of sugarcane under irrigation depths and nitrogen fertilization. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 7, p. 482-489, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n7p482-489>
- Menezes, S. M., da Silva, G. F., da Silva, M. M., de Oliveira Filho, R. A., Jardim, A. M. D. R. F., Silva, J. R. I., dos Santos, M. A. L. Pulse Drip Irrigation Improves Yield, Physiological Responses, and Water-Use Efficiency of Sugarcane. *Water Conservation Science and Engineering*, v. 9, n. 1, p. 9-25, 2024. <https://doi.org/10.1007/s41101-024-00258-8>
- Menezes, S. M., Silva, G. F., Silva, M. M., Morais, J. E. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Rolim, M. M. Continuous and pulse fertigation on dry matter production and nutrient accumulation in coriander. *Dyna*, v. 87, n. 212, p.18-25, 2020. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78569>
- Morais, J. E. F., Silva, E. F. F., Andrade, L. G. L., Menezes, S. M., Cutrim, E. O., Dantas, D. C., Silva, G. F., Rolim, M. M. Nutritional status, Na⁺ and Cl⁻ concentrations, and yield of sugarcane irrigated with brackish waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, p. 863-874, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n11p863-874>
- Mushtaq, R., Sharma, M. K., Mir, J. I., Mansoor, S., Mushtaq, K., Popescu, S. M., Narayan, S. Physiological activity, nutritional composition, and gene expression in apple (*Malus domestica* Borkh) influenced by different ETc levels of irrigation at distinct development stages. *Water*, v. 13, n. 22, p. 3208, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13223208>

- Oliveira, F. M., Aspiazú, I., Kondo, M. K. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. *Revista Trópica*, v. 5, n. 1, p. 56-67, 2011. <https://doi.org/10.0000/rtcab.v5i1.305>
- Oliveira, R. A., Hoffmann, H. P., Barbosa, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. Orgs. Curitiba: UFPR/RIDESA, 2021. 79p.
- Pereira, L. D. S., Saad, J. C. C., Cardoso, A. I. I., Castro, V. A. D., Lima, C. J. G. D. S., da Silva, E. M. Nutrient content and accumulation in mini lettuce as a function of fertigation management strategies. *Horticultura Brasileira*, v. 40, n. 4, p. 403-410, 2023. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20220408>
- Pereira, M. J., Santos, R. L., Silva, C. J. C., Ataíde, L. D. S. C., Souza Santos, R. V., Monte, I. R., Costa Santos, M. B. Development of sugarcane varieties under foliar application of nitrogen. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 8, p. e297985359, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5359>
- Rank, P. H., Vishnu, B. Pulse drip irrigation: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, v. 10, n. 1, p. 125-130, 2021.
- Resende, R. S., Nascimento, T., Carvalho, T. B. D., Amorim, J. R., Rodrigues, L. Reducing sugarcane irrigation demand through planting date adjustment in Alagoas State, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, p. 75-81, 2021. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n2p75-81>
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., Alvarez, V. H. V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. 359p.
- Rodrigues, V. A., Crusciol, C. A. C., Bossolani, J. W., Moretti, L. G., Portugal, J. R., Mundt, T. T., Lollato, R. P. Magnesium foliar supplementation increases grain yield of soybean and maize by improving photosynthetic carbon metabolism and antioxidant metabolism. *Plants*, v. 10, n. 4, p. 797, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040797>
- Silva, J. H. B., Almeida, L. J. M., Silva, A. V., Araújo, J. R. E. S., Santos, J. P. O., Silva, A. J., Mielezski, F. Filter cake increases sugarcane yield. *Brazilian Journal of Biology*, v. 83, p. e273414, 2023. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.273414>

- Souza, C. S., Silva, G. F., Costa, V. G., Silva M. M., Silva, V. B., Menezes, S. M., Costa, A. F., Diniz, A. A. Continuous and pulse fertigation on the accumulation and export of nutrients by cowpea. *Revista Caatinga*, v. 37, p. 11818, 2024. <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3711818rc>
- Sulaiman, A. A., Arsyad, M., Amiruddin, A., Teshome, T. T., Nishanta, B. New Trends of Sugarcane Cultivation Systems Toward Sugar Production on the Free Market: A Review. *Agrivita Journal of Agricultural Science*, v. 45, n. 2, p. 395-406, 2023. <http://doi.org/10.17503/agrivita.v45i2.4066>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6 ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 888p.
- Talebnejad, R., Sepaskhah, A. R. Physiological characteristics, gas exchange, and plant ion relations of quinoa to different saline groundwater depths and water salinity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 62, n. 10, p.1347-1367, 2016. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1144925>
- Uribe, R. A. M., Castro Gava, G. J., Kölln, O. T., Saad, J. C. C. Estimativa do acúmulo de fitomassa da soqueira de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de N-fertilizante utilizando modelo de simulação. *Irriga*, v. 1, n. 1, p. 126-126, 2016. <https://doi.org/10.15809/IRRIGA.2016V1N1P126-139>
- Wang, X., Wang, L., Shangguan, Z. Leaf gas exchange and fluorescence of two winter wheat varieties in response to drought stress and nitrogen supply. *PLoS One*, v. 11, n. 11, p. e0165733, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165733>
- Wanderley, J. A., Azevedo, C. A. D., Brito, M. E., Ferreira, F. N., Cordão, M. A., & Lima, R. F. D. Gas exchange in yellow passion fruit under irrigation water salinity and nitrogen fertilization. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 2, 135-141, 2022.
- Yin, C., Pang, X., Chen, K. The effects of water, nutrient availability and their interaction on the growth, morphology and physiology of two poplar species. *Environmental and Experimental Botany*, Aligarh, v. 67, n. 1, p. 196-203, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.003>
- Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Santos Júnior, J. A., Silva, G. F., Menezes, D., Almeida, C. D. G. C. Assessing the productivity of coriander under different irrigation depths

and fertilizers applied with continuous and pulsed drip systems. *Water Supply*, v. 21, n. 5, p. 2099-2108, 2021. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.008>

Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Silva, G. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Menezes, S. M. Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of coriander. *Horticultura Brasileira*, v. 37, n. 1, p. 22-28, 2019. https://doi.org/10.1590/s0102_053620190103

CAPÍTULO IV

CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DOSES DE NITROGÊNIO VIA FERTIRRIGAÇÃO PULSADA E CONTÍNUA

CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DOSES DE NITROGÊNIO VIA FERTIRRIGAÇÃO PULSADA E CONTÍNUA

RESUMO: O crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar podem ser afetados pela interferência de diferentes fatores, como a adubação nitrogenada e a disponibilidade hídrica. O uso eficiente da água e dos nutrientes é uma estratégia importante para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar, bem como manter a sustentabilidade agrícola dos canaviais. Nesse contexto, a irrigação pulsada surge como uma técnica promissora no manejo da cultura, oferecendo benefícios precisos na disponibilização de nutrientes e conservação da água. Diante desse cenário, objetivou-se com a presente pesquisa avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de nitrogênio, aplicadas via fertirrigação pulsada e contínua, sobre o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar. O experimento de campo foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), durante o período de dezembro de 2021 a outubro de 2022. O arranjo experimental adotado foi do tipo blocos ao acaso, com um esquema fatorial de 5 x 2, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em cinco doses de nitrogênio (80, 120, 160, 240 e 320 kg ha⁻¹) aplicadas via fertirrigação e duas formas de aplicação da irrigação, pulsada e contínua. Durante o crescimento da cultura foram realizadas as seguintes medições: altura do colmo, diâmetro do colmo, área e índice de área foliar, aos 60, 90, 120, 150, 180 e 310 DAC. No final do ciclo, a produtividade, o rendimento bruto de açúcar e etanol, também foram determinadas. A dose de 226 kg ha⁻¹ de N proporcionou a maior produtividade de colmos pela cultura. A irrigação aplicada de forma pulsada associada a adubação nitrogenada proporcionou maior altura dos colmos e rendimentos da cana-de-açúcar, com melhorias tanto na produtividade dos colmos quanto na produção de açúcar e etanol. A irrigação pulsada proporcionou às plantas maiores valores de diâmetro dos colmos, de área e de índice de área foliar. O incremento das doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação contribuiu para o aumento dos parâmetros biométricos da cana-de-açúcar, refletindo-se em maiores produtividade e rendimentos brutos de açúcar e etanol.

PALAVRAS-CHAVE: Adubação nitrogenada, Índices biométricos, Irrigação por pulso, Manejo da irrigação, Produção, *Saccharum spp.* (L).

GROWTH AND PRODUCTIVITY OF SUGARCANE UNDER NITROGEN DOSES VIA PULSED AND CONTINUOUS FERTIGATION

ABSTRACT: The growth and productivity of sugarcane can be affected by various factors such as nitrogen fertilization and water availability. Efficient use of water and nutrients is an important strategy for increasing sugarcane productivity and maintaining the agricultural sustainability of sugarcane fields. In this context, pulsated irrigation emerges as a promising technique for crop management, offering precise benefits in nutrient delivery and water conservation. This research aimed to evaluate the effect of applying different nitrogen doses, using pulsated and continuous fertigation methods, on the growth and productivity of sugarcane. The field experiment was conducted at the Carpina Sugarcane Experimental Station (EECAC) from December 2021 to October 2022. The experimental design was a randomized block design with a 5 x 2 factorial scheme, with four replications. The treatments consisted of five nitrogen doses (80, 120, 160, 240, and 320 kg ha⁻¹) applied via fertigation and two irrigation methods: pulsated and continuous. During the crop growth, the following measurements were taken: plant or stalk height, stalk diameter, leaf area, and leaf area index, at 60, 90, 120, 150, 180, and 310 days after planting. At the end of the cycle, productivity, gross sugar yield, and ethanol yield were also determined. The dose of 226 kg ha⁻¹ of N resulted in the highest stalk productivity for the crop. Pulsated irrigation combined with nitrogen fertilization led to greater stalk height and sugarcane yields, with improvements in both stalk productivity and sugar and ethanol production. Pulsated irrigation also benefited stalk diameter, leaf area, and leaf area index. Increasing the nitrogen doses applied via fertigation contributed to higher biometric parameters of sugarcane, reflecting greater productivity and gross yields of sugar and ethanol.

KEYWORDS: Nitrogen fertilization, Biometrics indices, Pulse irrigation, Irrigation management, Production, *Saccharum* spp. (L).

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura reconhecida em todo o mundo por sua alta produtividade e é amplamente valorizada como uma matéria-prima de alta qualidade para a fabricação de açúcar, sendo a principal fonte de sacarose (Babu et al., 2022). Além de seu papel como cultura agrícola, a cana-de-açúcar é utilizada na produção de etanol a partir de açúcares, tornando-se assim uma cultura energética de grande importância para o país (Vandenberghe et al., 2022). Devido à sua versatilidade como matéria-prima em diversas aplicações, a cana-de-açúcar é cultivada em vários países, sendo o Brasil o maior produtor mundial (Cursi et al., 2022).

Conforme o levantamento da CONAB (2024), as condições climáticas favoráveis e os investimentos no setor canavieiro resultaram em um aumento de 16,8% na produção de cana-de-açúcar em comparação com a safra anterior, totalizando 713,2 milhões de toneladas. Essa maior produção beneficiou o aumento na fabricação de açúcar e etanol, com 45,6 milhões de toneladas de açúcar e 29,6 bilhões de litros de álcool (CONAB, 2024).

Com a contínua demanda por açúcar e etanol, a expansão das áreas agrícolas e a busca por maior produtividade impulsionam o aumento na aplicação de fertilizantes nitrogenados ao longo dos anos, visando atender às demandas nutricionais das plantações (Costa et al., 2019; Boschiero et al., 2020), pois, fatores como água e adubação desempenham um papel fundamental no crescimento das culturas, afetando diretamente a produtividade da cana-de-açúcar (Singh et al., 2021).

A fim de garantir melhorias na qualidade da cana-de-açúcar nas áreas canavieiras, é essencial fornecer água e nutrientes adequadamente, especialmente nitrogênio (Ma et al., 2021; Singh et al., 2021). O nitrogênio (N) é o macronutriente constituinte de diversas proteínas e aminoácidos, sendo o segundo nutriente mais extraído pela cana-de-açúcar (Oliveira et al., 2011a). Além disso, o N influencia no metabolismo dos carboidratos e tem efeito positivo no crescimento e desenvolvimento, bem como na qualidade dos colmos, e no vigor das plantas (Shekinah et al., 2012; Pereira et al., 2020; Gu et al., 2021).

Nesse contexto, a fertirrigação surge como o principal método para fornecer tais elementos, ao consiste na aplicação de fertilizantes via água de irrigação, promovendo maior eficiência hídrica e nutricional para as culturas (Martins et al., 2017; Pereira et al., 2019). Manter a umidade do solo por meio da irrigação e garantir a disponibilidade precisa de nutrientes via fertirrigação são pré-requisitos importantes para uma colheita

satisfatória da cana-de-açúcar. Nessa perspectiva, a irrigação pulsada surge como uma técnica auxiliar de manejo para manter a umidade do solo, melhorar a eficiência no uso de água e nutrientes, ao mesmo tempo que promove uma melhor aeração do solo e otimiza o crescimento das plantas (Almeida et al., 2015, 2018).

A irrigação pulsada é caracterizada por uma sequência de ciclos intercalados, nos quais cada ciclo inclui uma fase de irrigação seguida por um período de repouso, sendo repetidos até que toda a quantidade necessária de água seja fornecida às plantas (Karmeli e Peri, 1974). Os benefícios associados à irrigação pulsada têm se destacado em diversas culturas, a exemplo da cana-de-açúcar, que segundo Menezes et al. (2024) o uso da técnica resultou em maior rendimento da cana-de-açúcar, com aumento na produtividade dos colmos, assim como na produção de açúcar e etanol.

Embora haja informações disponíveis sobre o uso da irrigação pulsada em algumas culturas, os estudos referentes à aplicação da fertirrigação por gotejamento pulsado na cultura da cana-de-açúcar ainda são escassos. Esta lacuna de conhecimento é significativa, considerando que a importância da água e da adubação nitrogenada nesta cultura, bem como os benefícios que a irrigação pulsada pode trazer para aprimorar os cultivos irrigados. Diante desse contexto e visando-se otimizar os recursos hídricos e de fertilizantes, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de N, aplicadas via fertirrigação pulsada e contínua, sobre o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), durante o terceiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar (Figura 1), localizada no município de Carpina-PE (7° 51'24''S, 35°14'16''W), com uma altitude de 180 m, região da Zona da Mata de Pernambuco, no período entre dezembro de 2021 a outubro de 2022.

O clima da região é classificado como tropical úmido (As), conforme a classificação de Köppen (Alvares et al., 2014). Essa região possui uma estação chuvosa que ocorre de maio a julho. A precipitação média anual é de 1.174 mm, com o pico de chuvas concentrando-se durante o outono e o inverno, com uma média de 199,6 mm no mês de junho, sendo considerado o mais chuvoso. O solo da área de estudo é classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrófico abrupto (EMBRAPA, 2018), textura franco arenoso. A caracterização química e física da área experimental nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40, 0,40-60 m, bem como as características químicas da água utilizada para irrigação estão apresentados na tabela 1.

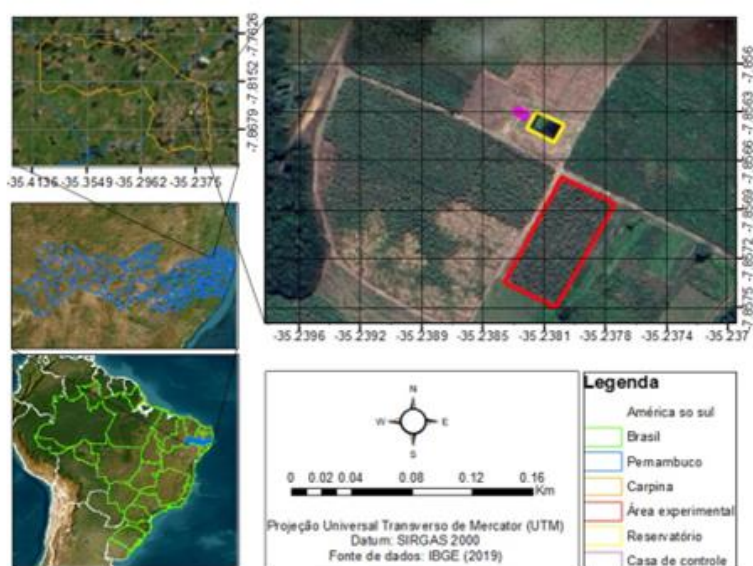


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

Fonte: autora (2024).

Tabela 1. Análise química e física do solo da área do estudo e análise química da água utilizada para irrigação, Carpina 2024.

Características químicas do solo																		
Camada	pH	Cu	Fe	Mn	Zn	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	m	V	M.O	
M	H ₂ O	-----mg dm ⁻³ -----					----- cmol _c dm ⁻³ -----						----- % -----					
0-0,20	6,10	0,0	66,8	9,2	1,0	6,0	2,3	1,2	0,5	0,17	0,0	5,1	4,17	9,27	0,0	44,8	2,6	
0,20-0,40	6,26	0,0	67,6	13,1	1,2	13,0	2,4	1,3	0,7	0,20	0,0	3,5	4,6	8,1	0,0	56,8	2,6	
0,40-0,60	6,34	0,0	73,1	3,2	0,5	4,0	2,0	2,2	0,3	0,12	0,0	3,2	4,6	7,9	0,0	60,0	1,7	
Características físicas do solo																		
Camada	Areia			Silte		Argila		Textura		Ds		Dp		PT		θ _{CC}		θ _{PMP}
m								-		----- kg m ³ -----		%		----- m ³ m ³ -----				
0-0,20	70,90			12,00		17,10		Franco Arenosa		1,36		2,63		48,17		0,150		0,100
0,20-0,40	71,00			9,90		19,10		Franco Arenosa		1,31		2,56		48,79		0,180		0,120
0,40-0,60	66,00			7,70		26,30		Franco Argilo Arenosa		1,42		2,74		48,32		0,189		0,093
Características químicas da água de irrigação																		
pH	CE	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Sulfatos		Alcalinidade		Cloretos		RAS		Classificação				
-	dSm ⁻¹	-----mg. L ⁻¹ -----									(mmo. L ¹) ^{0,5}		-					
6,50	0,227	14,0	16,03	12,64	60,0	24,82		140,0		96,11		2,71		C2S1				

Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; P: Fósforo; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Na: Sódio; Al: Alumínio; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; m: Saturação por alumínio; V: Saturação por bases; M.O: Matéria Orgânica; Ds: Densidade do Solo; Dp: Densidade de Partículas; PT: Porosidade Total; pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; θ_{cc} e θ_{PMP}: Respectivamente, Umidade Volumétrica do Solo na Capacidade de Campo e no Ponto de Murcha Permanente; RAS: Razão de Adsorção de Sódio.

O preparo do solo foi realizado 60 dias antes da instalação do experimento, envolvendo o uso de um subsolador para descompactar as camadas mais profundas do solo, seguido de gradagem para destorroar, destruição de restos de culturas, incorporação do calcário e sulcagem, para

abertura dos sulcos de plantio. Antes do plantio, procedeu-se à aplicação de $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico, para corrigir a acidez do solo, elevar o pH e neutralizar a presença de alumínio trocável. O plantio da cana-de-açúcar, correspondente à primeira folha, foi realizado manualmente no ano de 2019. Foram abertos sulcos com cerca de 25 cm de profundidade para plantio dos rebolos, material vegetal proveniente da EECAC-UFRPE.

A fertilização mineral para a cana planta foi estabelecida com base na análise química do solo, aderindo às recomendações conforme as necessidades nutricionais da cultura, conforme Cavalcanti et al. (2008). A adubação fosfatada e potássica na primeira folha (cana-planta) foi fornecida de forma convencional no plantio. A adubação nitrogenada foi realizada de forma parcelada, aplicando-se 50% da dose recomendada no plantio e os 50% restantes foram fornecidos via fertirrigação a cada quinze dias, durante a aplicação dos tratamentos.

Para a primeira soca, a adubação com nitrogênio (N) foi realizada conforme as recomendações de Aguiar et al. (2014). Foram aplicados 100 kg ha^{-1} de sulfato de amônia de forma convencional, juntamente com 50 kg ha^{-1} de ureia via fertirrigação. Quanto ao fósforo e ao potássio, as quantidades foram baseadas nas orientações de Ribeiro et al. (1999), com doses de P_2O_5 de 40 kg ha^{-1} e 140 kg ha^{-1} de K_2O , respectivamente. O P_2O_5 foi aplicado integralmente de maneira convencional aos 55 dias após o corte (DAC), utilizando-se como fonte o superfosfato triplo, enquanto o K_2O foi aplicado na dose de 80 kg ha^{-1} de forma convencional e 60 kg ha^{-1} via fertirrigação, utilizando-se como fonte o cloreto de potássio.

Quanto ao segundo ciclo da cana-soca, iniciado em dezembro de 2021, o manejo nutricional considerou a análise química do solo. Para assegurar uma eficiente distribuição de nutrientes ao longo do ciclo, a adubação com nitrogênio seguiu-se a curva de acúmulo e exportação de nutrientes estabelecida por Oliveira et al. (2011b), no qual se aplicou as doses de 178, 267, 356, 535 e 712 kg ha^{-1} de N, via fertirrigação utilizando como fonte a ureia.

O fósforo e o potássio foram aplicados de acordo com recomendação de Ribeiro et al. (1999). Aos 58 DAC o P_2O_5 foi aplicado todo de forma convencional na dose de 142 kg ha^{-1} , utilizando como fonte o superfosfato triplo, enquanto o K_2O foi aplicado 168 kg ha^{-1} via fertirrigação, utilizando como fonte o cloreto de potássio branco. O nitrogênio e o potássio aplicados via fertirrigação, foram disponibilizados entre os meses de março a setembro, a cada quinze dias. Os totais de fertilizantes correspondentes a cada mês encontram-se detalhados na Figura 2.

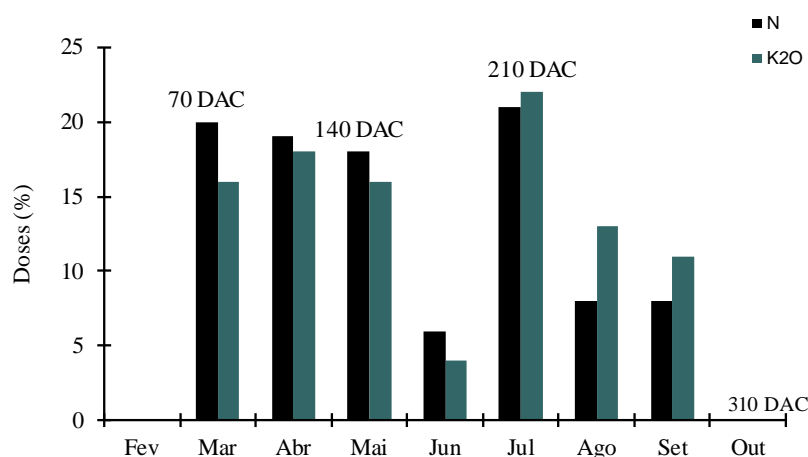


Figura 2. Parcelamento mensal da aplicação, via fertirrigação, de N e K₂O na cultura da cana-de-açúcar.

Fonte: da autora (2024).

Foi aplicado, também, uma suplementação nutricional por meio do fertilizante mineral misto denominado KSC Mix, que apresenta garantias de S (11%), Mg (9%), B (0,5%), Cu (0,05), Fe (2,5%), Mn (2%), Mo (0,2%) e Zn (1,5%). Foram realizadas duas aplicações do produto, via foliar, aos 121 e 137 DAC, na dose de 2,5 kg ha⁻¹.

O experimento foi conduzido sob um delineamento experimental em blocos casualizados, adotando um esquema fatorial 5 x 2. No primeiro fator, foram consideradas cinco doses de nitrogênio (80; 120; 160; 240 e 320 kg ha⁻¹), aplicadas via fertirrigação e o segundo fator contemplou dois tipos de aplicação da irrigação (irrigação pulsada e contínua) com quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais.

As fertirrigações com N e K₂O, iniciaram-se aos 70 DAC, mediante a utilização de uma bomba dosadora do modelo Dosador Minidos 10 (10% da vazão), marca Hydro System. Nos tratamentos com irrigação pulsada, foram empregados quatro pulsos de irrigação, com um intervalo de repouso de 40 minutos entre duas aplicações. A duração de cada pulso foi determinada após o cálculo diário da quantidade de água necessária para a cultura.

Na área, cada parcela experimental foi formada por quatro sulcos de plantio combinado de 1,40 m + 0,60 m, medindo 7 m de comprimento. As quatro linhas de plantas centrais consideradas a área útil da parcela onde as avaliações foram conduzidas, desprezando-se 1 m das extremidades de cada linha, totalizando 20 m² de área útil.

A variedade utilizada no experimento foi a RB041443, selecionada pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, que faz parte da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA). Essa variedade apresenta como características desenvolvimento rápido, alta produtividade agrícola, maturação precoce, baixa taxa de florescimento, um longo período útil de industrialização (PUI), alto teor de sacarose e resistência às principais doenças que afetam o canavial, bem como resistência a nematoides (Oliveira et al., 2021).

O sistema de irrigação adotado foi o gotejamento subsuperficial, composto por fitas gotejadoras (DN 16 mm) equipadas com emissores in-line autocompensantes e antidrenantes. Esses emissores estavam espaçados a cada 0,50 m, apresentando saída cilíndrica do tipo PC/AS com vazão de 1L h⁻¹, e alocados no solo a 0,20 m de profundidade. O sistema era composto, por uma motobomba centrífuga (3,0 cv), um sistema de filtragem e retro lavagem, composto por dois filtros de areia e um sistema de injeção da fertirrigação composto por um manômetro e filtro, bico injetor e uma bomba dosadora de fertilizante (10% da vazão). Além disso, incluía 10 registros de espera para o controle do fluxo de água de forma individual.

A determinação do tempo de irrigação para cada tratamento foi obtida com base na lâmina líquida (LL), espaçamento entre emissores e linhas, vazão do emissor e a eficiência de aplicação (equação 1). Essa eficiência foi determinada por meio de um teste de uniformidade de distribuição do sistema (CUD) (equação 2), realizado conforme a metodologia apresentada por Keller e Karmeli (1974), cujo valor obtido foi de 98%.

$$TI = \frac{LL * E1 * E2}{ef * q} \quad (1)$$

Em que:

TI é o tempo de irrigação (horas),

LL é a lâmina líquida (mm),

E1 é o espaçamento entre emissores (m),

E2 é o espaçamento entre linhas (m),

ef é a eficiência do sistema de irrigação,

q é a vazão do emissor (L/h).

$$CUD = \frac{q_{1/4}}{q_{Total}} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

CUD = Coeficiente de uniformidade de distribuição (%);

$q_{1/4}$ = média de $1/4$ das vazões que apresentaram os menores valores;

q_{total} = média de todas as vazões.

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi calculada diariamente por meio do produto da ETo obtida pelo Tanque Classe “A” e o coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar, conforme recomendado por Doorenbos e Pruitt, 1977 (equação 3).

$$ETc = ((ECA \times Kp \times Kc) - P) * Kl \quad (3)$$

Em que:

ETc = Evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;

ECA = Evaporação do tanque classe A, mm dia⁻¹;

Kp = Coeficiente do tanque classe A, adimensional e,

Kc = Coeficiente de cultivo, adimensional,

P é a precipitação efetiva (mm),

Kl é o coeficiente de ajuste para a irrigação localizada.

Os valores de Kp foram obtidos a partir de dados de velocidade do vento, umidade relativa do ar e evaporação do tanque Classe A, instalado nas proximidades da área experimental, conforme a metodologia descrita por Doorenbos e Pruitt, (1977).

Os dados relativos ao coeficiente de cultura (Kc) utilizados seguiram as recomendações de Doorenbos e Kassan (1994), com base nos diferentes estágios de desenvolvimento da cultura (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.

Estádios de desenvolvimento		
Cobertura vegetal (%)	Dias	Kc
0 a 25	0 – 30	0,40
	30 – 45	0,50
	45 – 60	0,60
25 a 50	60 – 80	0,75
50 a 75	100 – 125	0,95
75 a 100	125 – 180	1,10
Máxima demanda	180 – 270	1,20
	270 – 300	1,30
Maturação	300 – 330	1,0
	330 – 360	0,60

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

Durante o período experimental, foi realizado o monitoramento da variação dos dados de precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c) e a lâmina bruta (LB) (Figura 3). Nesse período, a precipitação efetiva acumulada foi de 1.129 mm por ano⁻¹. A ET_o acumulada ao longo do ciclo foi de 1.139 mm, com uma média de 4,0 mm dia⁻¹. Já a evapotranspiração da cultura (ET_c) acumulou 1.039 mm, com uma média de 3,0 mm dia⁻¹, e a lâmina bruta aplicada foi de 166 mm.

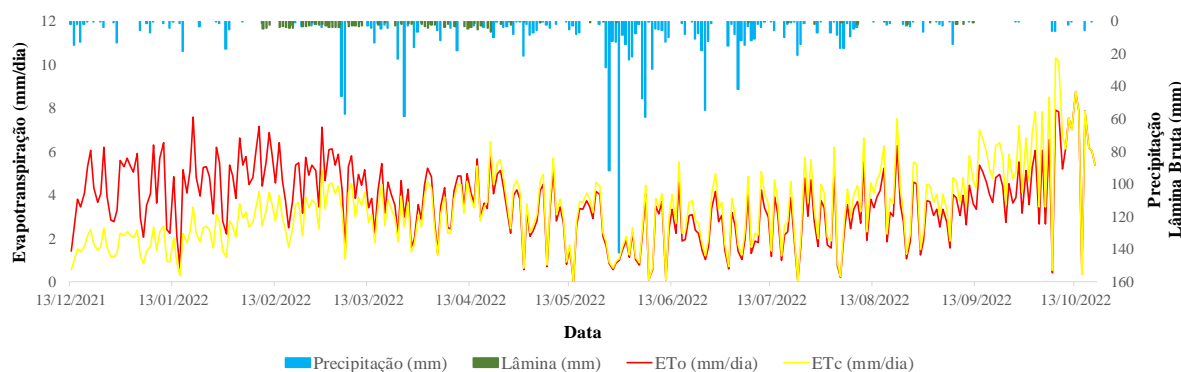


Figura 3. Dados de precipitação, evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c), e lâmina bruta aplicada na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2021/2022.

Com o intuito de induzir estresse hídrico na cana-de-açúcar, visando-se aumentar a concentração de sacarose nos colmos, promover a maturação e elevar a concentração de açúcar a irrigação foi suspensa aos 270 dias após o corte (DAC). A colheita da cana-de-açúcar foi realizada aos 310 DAC.

Para avaliar o crescimento das plantas de cana-de-açúcar, foram realizadas medições aos 60, 90, 120, 150, 180 e 310 dias após o corte (DAC) em dez plantas selecionadas na área útil de cada parcela. As medidas incluíram: altura do colmo (AC), diâmetro dos colmos (DC), número de folhas verdes (NFV), comprimento (CF+3) e largura das folhas (LF+3), e posteriormente área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF).

A altura do colmo foi determinada com o auxílio de uma fita métrica, medindo da superfície do solo até a inserção da folha +1 (a primeira folha de cima para baixo), conforme descrito por Kuijper (Dillewijn, 1952). O diâmetro do caule foi obtido com um paquímetro graduado, medido a uma altura correspondente a um terço do colmo (1/3) a partir da base do colmo.

O número de folhas verdes foi obtido pela contagem das folhas que estavam abertas com pelo menos 20% de área foliar verde, a partir da folha +1. As medições do CF+3 (cm) e LF+3 (cm) foram feitas na terceira folha +3 com o auxílio de fita métrica. Os valores referentes ao CF+3, LF+3 e NFV foram utilizados para determinar área foliar (AF) (equação 4), seguindo metodologia descrita por Hermann e Câmara (1999).

$$AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2) \quad (4)$$

Em que:

AF = Área foliar;

C = Comprimento da folha;

L = Largura da folha;

0,75 = Fator de forma

2 = Fator de correção para área foliar da cultura

N = Número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde, segundo metodologia descrita por (Hermann e Câmara, 1999).

O cálculo do índice de área foliar (IAF) foi realizado conforme a metodologia estabelecida por Watson (1947) considerando a área foliar e a área ocupada pela planta no solo (equação 5)

$$IAF = \frac{AF}{AOPS} \quad (5)$$

Em que:

IAF = Índice de área foliar, m² m⁻² de solo;

AF = Área foliar média de uma planta, m²;

AOPS = Área no solo ocupada por uma planta, m².

Para obtenção da produtividade da cana-de-açúcar, na colheita, aos 310 DAC, foi realizado o peso dos colmos da área útil de cada parcela, utilizando um dinamômetro acoplada a um tripé. Esses dados foram então extrapolados para calcular a produtividade de colmos (TCH, Mg ha⁻¹). Para avaliar o rendimento bruto do açúcar (RBA, Mg ha⁻¹) e rendimento bruto do etanol (RBE, m³ ha⁻¹), foram selecionados dez colmos por parcela, os quais foram utilizados para a determinação de parâmetros industriais, como o teor de sacarose no caldo (Polcaldo) e os açúcares redutores totais do caldo (ARcaldo). A metodologia empregada para estas medições foi conforme as diretrizes estabelecidas pelo CONSECANA (2015), proporcionando uma base confiável para a análise industrial da cana-de-açúcar.

O cálculo do RBA (rendimento bruto de açúcar) e do RBE (rendimento bruto de etanol) (equações 6 e 7, respectivamente) foi realizado conforme procedimentos metodológicos propostos por Caldas (1998):

$$RBA = \frac{pol \times TCH}{100} \quad (6)$$

$$RBE = \frac{[(\text{Pol} \times f_{RBE}) + AR] \times fg \times TCH}{100} \quad (7)$$

Em que:

RBA = Rendimento Bruto de Açúcar

RBE = Rendimento Bruto de Etanol

Pol = Teor de sacarose no caldo, %;

TCH = Produtividade de colmos, Mg ha⁻¹;

fRBET = Fator de transformação estequiométrica de sacarose em uma molécula de glicose mais uma de frutose, igual a 1,052;

AR = Açúcares redutores totais do caldo, %; fg = fator de Gay-Lussac, igual a 0,6475

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F. Quando foi observado um efeito significativo para o teste F, os dados relacionados às doses de nitrogênio foram desdobrados através da análise de regressão (p<0,05). Por outro lado, os dados referentes aos tipos de aplicação da fertirrigação (pulsado e contínuo) foram comparados utilizando o teste de médias de Scott-Knott (p<0,05). A seleção do modelo

de regressão foi baseada no maior valor do coeficiente de determinação (R^2), na significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p \leq 0,05$), na ausência de significância do desvio de regressão e na resposta biológica de cada variável em relação aos tratamentos avaliados. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da análise de variância (Tabela 3), observou-se efeito significativo ($p < 0,05$) da interação entre as doses de nitrogênio (DN) (80, 120, 180, 240, 320 kg ha⁻¹) aplicadas e os tipos de aplicação da irrigação (T) (pulsada e contínua) sobre a altura do colmo (AC). Por outro lado, a interação entre as doses de nitrogênio aplicadas e os dias após o corte (60, 90, 120, 150, 180 e 310 DAC) influenciaram significativamente as variáveis, área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF). De forma isolada, a exceção do tipo de aplicação da irrigação sobre AC, todas variáveis foram significativamente influenciadas pelas doses de N aplicadas, tipo de aplicação da irrigação e dias após o corte.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para altura do colmo (AC), diâmetro do colmo (DC), área foliar (AF) e índice de área foliar da cana-de-açúcar (RB041443), em função das doses de nitrogênio aplicadas (DN) e tipos de aplicação da irrigação (T) (pulsada e contínua).

Parâmetros Morfológico da cana-de-açúcar					
FV	GL	Quadrado médio			
		AC	DC	AF	IAF
Doses de N (DN)	4	822,86**	0,358**	0,006*	0,415*
Tipo de aplicação (T)	1	5,62 ^{ns}	0,610**	0,007*	0,425**
Dia após o corte (DAC)	5	286111,79**	1,762**	0,004*	159,7*
Bloco	3	537,76**	0,327**	0,003**	0,340**
DN x T	4	387,43*	0,036 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,020 ^{ns}
DN x DAC	20	120,15 ^{ns}	0,081 ^{ns}	0,002*	0,131*
T x DAC	5	8,22 ^{ns}	0,196 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,042 ^{ns}
DN x T x DAC	20	56,71 ^{ns}	0,032 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	0,036 ^{ns}
Resíduo	177	56,71	0,049	0,0009	0,063
CV	%	7,58	10,28	15,45	16,04

FV: Fonte de Variação; GL: Graus de Liberdade; ns: não significativo; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

Verifica-se, por meio do desdobramento das doses de nitrogênio dentro dos tipos de aplicação da irrigação (Figura 4A), que houve diferença significativa entre a irrigação pulsada e contínua. Para irrigação pulsada, observou-se um modelo linear crescente, com altura máxima de 149,4 cm na dose de 320 kg ha⁻¹ de N. Nesse caso, houve um acréscimo de 0,0412% na altura do colmo por aumento unitário da dose de N aplicada. Por outro lado, na irrigação contínua, o maior valor de AC foi de 149,8 cm, estimada na dose de 218 kg ha⁻¹ de N, revelando um aumento de 9,7% na AC em relação à dose de 80 kg ha⁻¹ de N, cujo valor obtido foi 136,5 cm.

Já em relação à interação dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) dentro de cada uma das doses de nitrogênio aplicadas (Figura 4A), houve diferença significativa entre a irrigação pulsada e contínua nas doses de 240 e 320 kg ha⁻¹ de N. A irrigação contínua na dose correspondente a 240 kg ha⁻¹ de N incrementou 4,6% na AC, quando comparada com a irrigação pulsada. Na dose 320 kg ha⁻¹ de N, a irrigação pulsada incrementou em 5,2% a altura do colmo (AC) em detrimento do valor obtido para a variável com a aplicação da irrigação contínua.

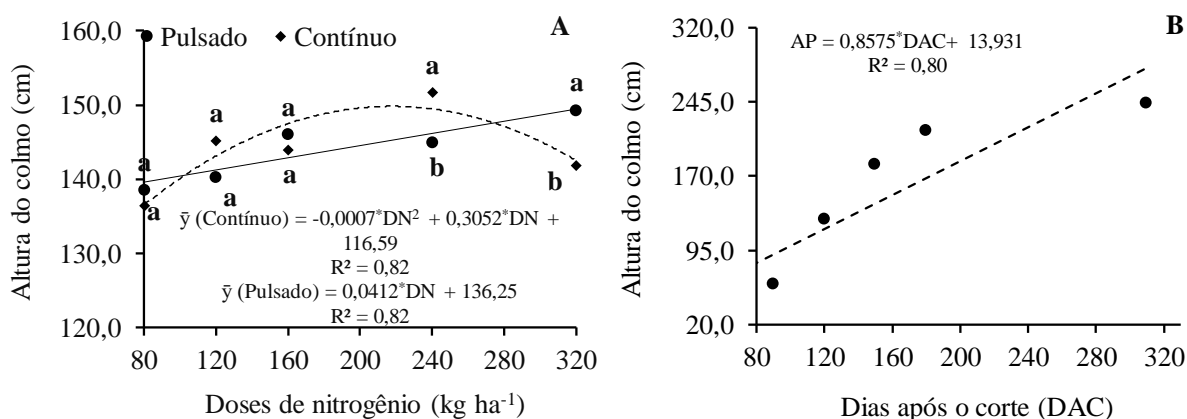


Figura 4. Altura do colmo (DC) da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio aplicadas e tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) (A) e das diferentes épocas de avaliação (dias após o corte) (B).

* - Significativo a $p \leq 0,05$, respectivamente, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) entre os tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

Entre os diferentes nutrientes aplicados na cana-de-açúcar, o nitrogênio é um nutriente essencial, pois a cana-de-açúcar requer doses ótimas de N em estágios fenológicos críticos (Dinh et al., 2018; Iqbal et al., 2020). O nitrogênio está envolvido em vários aspectos críticos, incluindo o crescimento vegetativo da planta, expansão das

folhas verdes e produção de perfilhos na cana-de-açúcar (Dinh et al., 2018; Yang et al., 2019; Anas et al., 2020). A fertirrigação por gotejamento assegura o fornecimento equilibrado de nutrientes, a exemplo do nitrogênio, assegurando a distribuição dos nutrientes diretamente na zona radicular, e essa combinação tem demonstrado potencial para aumentar a resposta da planta à fotossíntese durante o crescimento da cultura (Kölln et al., 2023). Tal melhoria se reflete em colmos mais altos, indicando um desenvolvimento mais vigoroso das plantas.

O aumento na altura do colmo em resposta às doses de nitrogênio é atribuído à participação desse nutriente em funções vitais para o desenvolvimento das plantas, como sua função estrutural e sua participação na composição de diversos compostos orgânicos, além de influenciar nos processos fisiológicos na planta (Prado et al., 2010; Vale et al., 2011; Pereira et al., 2020).

A esse respeito, Kölln et al. (2023) estudando a curva de crescimento da cana-de-açúcar (cana-soca) em resposta às doses de nitrogênio aplicadas via gotejamento subsuperficial, constataram AC de 200 cm, obtida com a aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N, aos 400 DAC. Oliveira Junior et al. (2023) obtiveram altura máxima de colmo de 288 cm para a cana-soca (genótipo IACSP95-5094) no tratamento com aplicação de 160 kg ha⁻¹ de N, representando um aumento de 2,27% na AC em comparação com o tratamento sem aplicação de nitrogênio.

Com a aplicação da irrigação pulsada às plantas, a altura do colmo da cana-de-açúcar aumentou linearmente com o aumento das doses de nitrogênio aplicadas. Enquanto a fertirrigação contínua distribui todo o nitrogênio em uma única aplicação diária, a fertirrigação pulsada fragmenta a aplicação ao longo do dia. Esse fracionamento favorece a manutenção de uma umidade do solo mais constante durante o dia, contribuindo para uma maior estabilidade da solução do solo e, conseqüentemente, proporcionando maior absorção do nutriente, como o nitrogênio, em comparação à sua absorção sob fertirrigação contínua (Menezes et al., 2020). Assim como, no presente estudo, Menezes et al. (2024), também observaram uma influência positiva da irrigação pulsada na altura do colmo da cana-de-açúcar, no qual obtiveram, aos 310 DAC, altura máxima de 365 cm, quando as plantas foram submetidas a irrigação por gotejamento pulsado.

Por intermédio da Figura 4B, verifica-se que a AC em função dos dias após o corte da cana-de-açúcar, no qual se ajustou ao modelo linear crescente. A altura máxima do colmo foi obtida aos 310 DAC, cujo valor estimado foi de 279,7 cm.

De acordo com Allen et al. (1998), o crescimento intenso dos colmos da cana-de-açúcar ocorre entre 135 e 300 dias após o plantio, momento em que a cultura normalmente entra na fase de maturação e o crescimento do colmo tende a ser inibido. Campos et al. (2014) ressaltam que o crescimento contínuo e uniforme pode ter contribuído para aumentar a eficiência fotossintética das plantas. Além disso, o aumento no comprimento dos colmos pode indicar variedades responsivas mesmo em condições de baixa disponibilidade de água para as plantas.

Corroborando com esses resultados, Bhatt et al. (2022) constataram, sob cultivo irrigado, AC de 223,2 cm aos 261 dias após o corte para a cultivar CoJ 88. Por outro lado, Silva et al. (2023), em seu estudo sobre o crescimento da cana-de-açúcar (cultivar CTC 4), registraram uma AC de 346,8 cm aos 250 DAC.

Constata-se que houve efeito das doses de nitrogênio, dos dias após o corte e dos tipos de aplicação da irrigação sobre o diâmetro do colmo da cana-de-açúcar (Figura 5). O maior diâmetro do colmo foi obtido com a dose de 250 kg ha⁻¹ de N, cujo valor estimado foi de 2,25 cm, apresentando um incremento de 8,1% em relação à menor dose aplicada (80 kg ha⁻¹ de N – 2,08 cm) (Figura 5A). Quanto ao diâmetro do colmo em função dos dias após o corte (Figura 5B), o maior valor foi observado aos 202 DAC, o qual o valor estimado foi 2,31 cm.

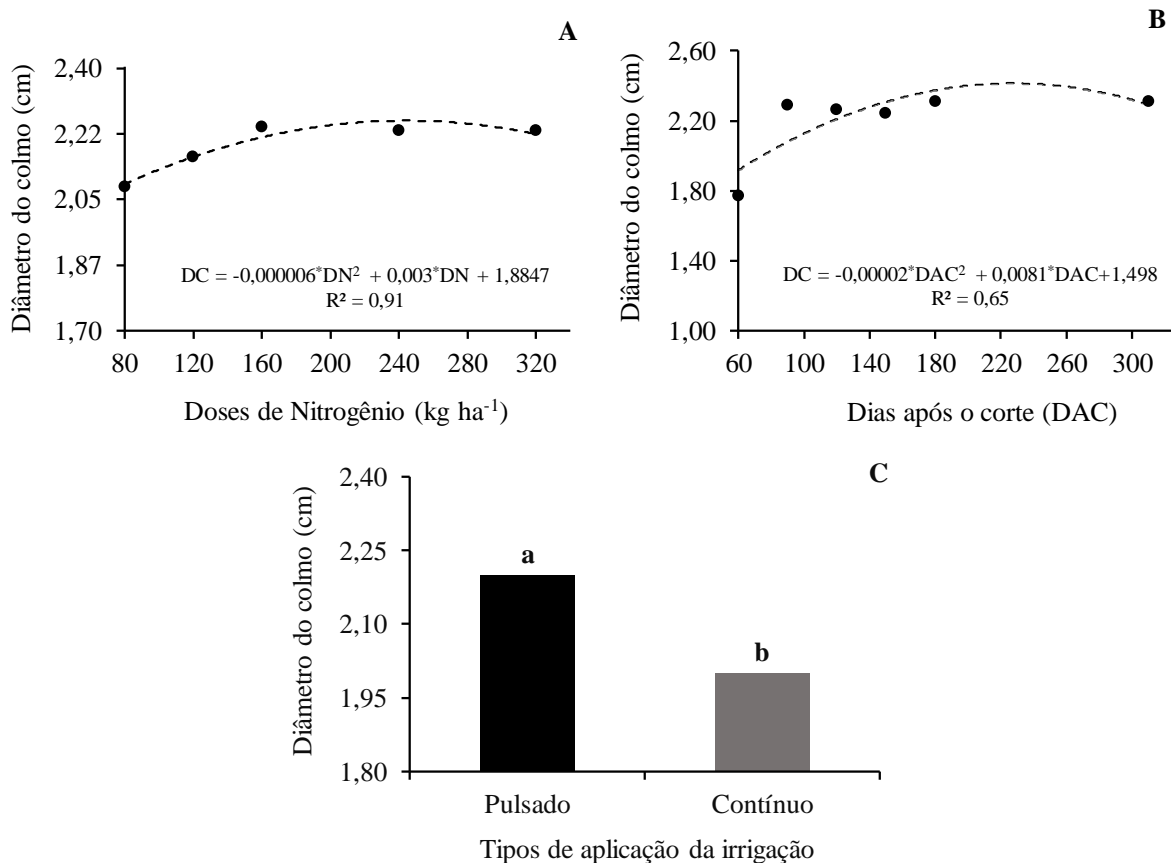


Figura 5. Diâmetro do colmo (DC) sob efeito das doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação (A), dos dias após o corte (DAC) (B) e tipos aplicação da irrigação (pulsada e contínua) (C) na cultura da cana-de-açúcar.

** - Significativo a $p \leq 0,05$, pelo teste F.

No presente estudo, a aplicação de doses de N via fertirrigação na cultura da cana-de-açúcar promoveu aumento no diâmetro do colmo ao longo do desenvolvimento das plantas. Esse efeito pode ser atribuído a função essencial do nitrogênio na estrutura celular da planta e em sua participação em diversos processos fisiológicos, como o crescimento vegetal, por exemplo (Anas et al., 2020). Estudando a cultura da cana-de-açúcar, cultivar (RB867515), sob irrigação plena, Lira et al. (2018), obtiveram aos 300 DAP, diâmetro do colmo de 4,9 cm com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N. Castro-Nava et al. (2020) na segunda soqueira (Mex 79-431), constataram DC de 2,85 cm com a aplicação de 150 kg N ha⁻¹ aos 261 DAC. Kölln et al. (2023) para cultivar SP80-3280, obtiveram diâmetro do colmo de 2,2 cm aos 150 DAC, estimada na dose 200 kg ha⁻¹ de N.

O diâmetro do colmo é um dos parâmetros morfológicos que apresenta pouca influência ao longo dos DAC. Oliveira et al. (2016) explicam que o diâmetro do colmo é uma variável com menor variação, uma vez que depende das características genéticas da

cultivar, do número de perfilhos, do espaçamento utilizado, da área foliar e das condições ambientais proporcionadas. Silva et al. (2023), avaliando o crescimento de quatro variedades de cana-de-açúcar cultivadas em regime de sequeiro e irrigação, obtiveram DC máximo até 305 e 322 DAP, respectivamente.

Em relação aos tipos de aplicação de irrigação (Figura 5C), verificou-se que a irrigação pulsada incrementou em 10% o diâmetro do colmo em relação à irrigação aplicada de forma contínua. Uma das características distintivas da irrigação pulsada é sua capacidade de manter a umidade do solo ao longo do dia, promovendo a absorção eficiente de água e nutrientes pelas plantas, resultando em benefícios para o crescimento, incluindo o aumento do diâmetro do colmo da cana-de-açúcar.

Resultado semelhante ao presente estudo foram obtidos por Menezes et al. (2024) que estudando a cultura da cana-de-açúcar, cultivar RB041443, irrigada por gotejamento pulsado, constataram que o diâmetro do colmo foi favorecido pela aplicação da irrigação pulsada, alcançando valor máximo de 3,9 cm, representando aumento de 26% em comparação com a irrigação contínua. Além disso, os autores afirmaram que essa técnica contribui para a manutenção das relações hídricas nas plantas, devido à maior disponibilidade de água e nutrientes para o processo de absorção, beneficiando características biométricas como o diâmetro do colmo.

Por meio da Figura 6, é possível observar o desdobramento das doses de N dentro dos dias após o corte da cana-de-açúcar para as variáveis, área foliar (A) e índice de área foliar (B). Constata-se que aos 215 DAC foi estimado a maior AF ($0,36 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), correspondente a dose de 160 kg ha^{-1} de N. Enquanto isso, para o mesmo período, as doses de 80, 120, 240 e 320 kg ha^{-1} de N apresentaram AF de 0,22; 0,28; 0,28 e $0,27 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente. A menor área foliar ($0,23 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) foi registrada aos 178 DAC com a dose de 80 kg ha^{-1} de N. Analisando os tipos de aplicação da irrigação, observa-se que a irrigação pulsada incrementou a AF em 5,5% quando comparado com a irrigação aplicada de forma contínua (Figura 6A).

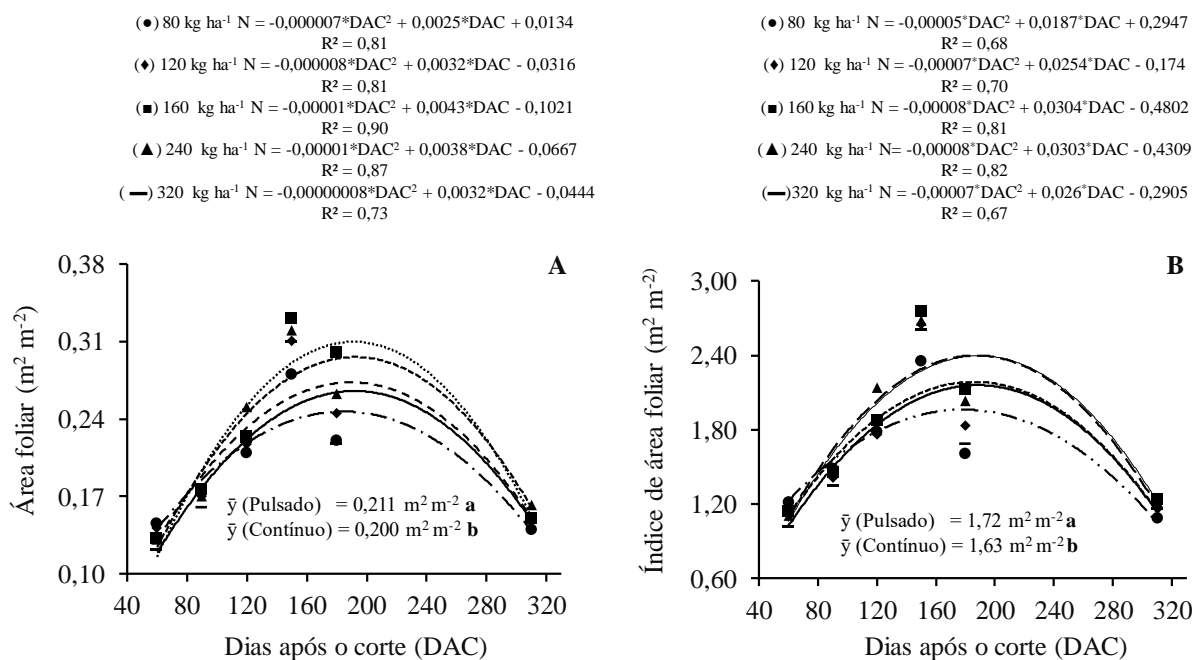


Figura 6. Área foliar (A) e índice de área foliar (B) sob efeito da interação dos dias após o corte e doses de nitrogênio aplicadas e dos tipos de aplicação da irrigação (pulsado e contínuo) na cultura da cana-de-açúcar.

* - Significativo a $p \leq 0,05$, pelo teste F.

A análise da área foliar da cana-de-açúcar é fundamental, pois essa característica está diretamente relacionada às taxas de crescimento, uma vez que a maior parte dos carboidratos essenciais é sintetizada nas folhas, assim quanto maior a área foliar, maior será a produção de carboidratos necessária para o crescimento e produção dos vegetais (Pereira et al., 2016; Oliveira et al., 2020). No estudo realizado por Dinh et al. (2018), para cana-de-açúcar, cultivar (comercial NiF8), obtiveram AF de 0,25 m² aos 160 DAP, com nível 270 kg ha⁻¹ de N. Horschutz et al. (2022) em seu estudo com doses de nitrogênio na cana-de-açúcar irrigada (variedade CTC-4) obtiveram 0,84 m² de AF aos 210 DAP, com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N.

Assim como constatado para o diâmetro do colmo, a área foliar da cana-de-açúcar também decresceu em função das épocas de avaliações. Este decréscimo está provavelmente relacionado à diminuição do número de perfilhos e folhas verdes, bem como à redução da largura e comprimento das folhas durante o ciclo da cana-de-açúcar. Segundo Maia Júnior et al. (2018), a área foliar está diretamente relacionada ao comprimento, largura da folha e número de folhas, sendo que a diminuição desses parâmetros está intimamente ligada à redução da área foliar. Inman-Bamber et al. (2012) destacam que a morte de perfilhos também contribui para essa diminuição na área foliar

e, conseqüentemente, para a redução na quantidade acumulada de biomassa na cana-de-açúcar.

O aumento da área foliar foi acentuado até os 215 dias após o corte (DAC), alcançando seu pico máximo. Isso pode estar associado ao incremento no número de perfilhos e ao crescimento da cultura. Essa correlação também foi observada no estudo de Menezes et al. (2024), onde a área foliar da cana-de-açúcar aumentou até os 223 DAC, e os autores atribuíram esse aumento ao período de crescimento intenso dos colmos e ao aumento do número de perfilhos. Além disso, Silva et al. (2014) constataram um crescimento exponencial da área foliar ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, atingindo seu ponto máximo e mantendo-se estável até os 330 dias após o corte.

Para os tipos de aplicação, a irrigação pulsada contribuiu com maior relevância para o aumento da área foliar, quando comparada com a irrigação aplicada de forma contínua. Na irrigação pulsada, água e os nutrientes são aplicados de forma fracionados, ou seja, em vez de única aplicação, será realizada por um período maior durante o dia e, conseqüentemente, durante os momentos de maior demanda evapotranspirativa da planta. Essa prática cria condições ideais para o desenvolvimento das raízes e a absorção eficiente de água e nutrientes pelas plantas, resultando em benefícios diretos para a área foliar (AF). Assouline et al. (2006) explicam, que a irrigação pulsada aprimora a absorção de nutrientes por meio de dois mecanismos principais, a reposição constante de nutrientes na zona radicular da cultura e o aumento do transporte de nutrientes dissolvidos através do fluxo de massa, devido ao maior teor médio de água no solo durante o dia.

Com relação ao índice de área foliar da cana-de-açúcar (Figura 6B), verificou-se que aos 190 DAC foi obtido o maior IAF, cujo valor encontrado foi de $2,45 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ obtido na dose correspondente a 160 kg ha^{-1} de N. Para mesma data, os tratamentos com as doses de 80, 120, 240 e 320 kg ha^{-1} de N, obtiveram valores máximos de IAF de 2,04, 2,12, 2,43, $2,12 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente. A partir do período de 190 DAC, observou-se diminuição do IAF para todas as doses de nitrogênio aplicadas. O menor valor do IAF ($2,04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) foi estimado aos 187 DAC, obtido na dose correspondente a 80 kg ha^{-1} de N.

A redução do IAF ocorrida após o período de 190 DAC, foi causada pela diminuição do número de perfilhos, número de folhas verdes (senescência) e AF. Gomide e Gomide (1999) afirmam que a diminuição no número de folhas e a AF é atribuída à idade avançada das folhas, juntamente com o aumento da atividade respiratória necessária para sua manutenção. Já Aquino et al. (2017), explicam que, essa redução no IAF seria

em razão da diminuição do número de perfilhos por metro linear e da área foliar por perfilho. Estudando a cana-de-açúcar, (cultivar RB97520) tanto em condições de cultivo irrigado quanto em sequeiro, Silva et al. (2023) obtiveram IAF de 3,1 e 1,92 m² aos 250 DAP, respectivamente. Para a cana-de-açúcar, sob cultivo irrigado (gotejamento subsuperficial), Kölln et al. (2023), obtiveram IAF de 4,1 m², aos 291 DAP com a aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N.

A irrigação aplicada na forma de pulso favoreceu o aumento do IAF da cultura da cana-de-açúcar, revelando um incremento de 5,5% em relação aplicação da irrigação de maneira contínua (Figura 6B). Segundo Rolbiecki et al. (2021) enquanto a irrigação por gotejamento garante uma disponibilização mais eficiente de nutrientes diretamente na zona radicular, suprimindo as necessidades das culturas durante seu ciclo de crescimento; por outro lado, na irrigação pulsada, a água e os nutrientes são aplicadas na forma pulsos, por um período maior durante o dia, favorecendo a manutenção e a distribuição adequada da umidade do solo. Em concordância com o presente estudo, Menezes et al. (2024) também observaram melhorias no IAF da cana-de-açúcar quando as plantas foram submetidas irrigação por pulsos, os autores obtiveram IAF máximo de 2,5 m² m⁻² aos 225 DAC, quando as plantas foram submetidas a irrigação pulsada.

Por meio da análise de variância apresentada na Tabela 4, pode-se verificar que houve efeito significativo da interação entre os tipos de aplicação da irrigação (T) (pulsada e contínua) e doses de nitrogênio aplicadas (DN) (80, 120, 160, 240, 320 kg ha⁻¹), para a produtividade de colmos (TCH), o rendimento bruto de açúcar (RBA) e o rendimento bruto de etanol (RBE).

Tabela 4. Resumo da análise de variância para a produtividade de colmos (TCH), rendimento bruto de açúcar (RBA) e rendimento bruto de etanol (RBE), da cana-de-açúcar, em função das doses de nitrogênio aplicadas via irrigação pulsada e contínua.

Componentes de produção da cana-de-açúcar				
FV	GL	Quadrado Médio		
		TCH	RBA	RBE
Tipos de aplicação (T)	1	992,11*	94,03**	49,06**
Doses de nitrogênio (DN)	4	795,77*	88,88**	46,10**
DN x T	4	855,48**	28,30*	14,84*
Blocos	3	197,72 ^{ns}	3,79 ^{ns}	1,53 ^{ns}
Resíduos	27	194,32	8,88	4,84
CV	%	11,43	15,19	14,83

FV: Fonte de Variação; GL: Graus de Liberdade.

Por intermédio da Figura 7 pode-se observar o desdobramento das doses de nitrogênio aplicadas, via fertirrigação, dentro dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) sobre a produtividade dos colmos (A), o rendimento bruto de açúcar (RBA) (B) e o rendimento bruto de etanol (RBE) (C).

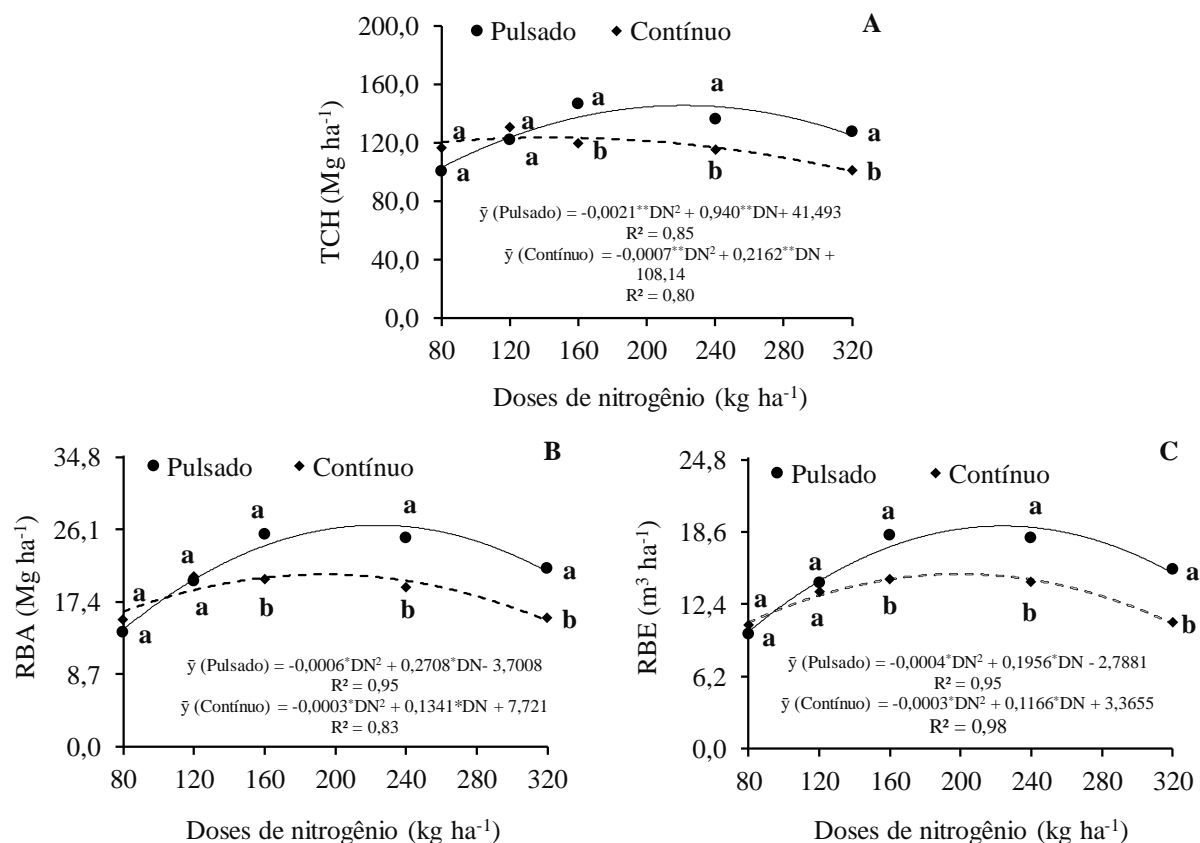


Figura 7. Produtividade de colmos (A), rendimento bruto de açúcar (B) e rendimento bruto de etanol (C) da cana-de-açúcar sob efeito da interação entre os fatores doses de nitrogênio aplicadas e dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) entre os tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua).

A maior TCH foi obtida quando as plantas de cana-de-açúcar foram submetidas a irrigação pulsada em detrimento da irrigação contínua (Figura 7A). Para a irrigação pulsada, um modelo quadrático foi ajustado aos dados, tendo-se verificado que a produtividade máxima obtida foi de $146,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, obtida na dose correspondente a $223,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, refletindo-se em um incremento de $42,1\%$ em relação à menor dose de N aplicada (80 kg ha^{-1}), a qual proporcionou uma produtividade de $103,2 \text{ Mg ha}^{-1}$. No

entanto, para irrigação contínua, a dose de 154,4 kg ha⁻¹ de N resultou na maior produtividade, atingindo 124,8 Mg ha⁻¹, um acréscimo percentual de 3,2% em comparação com a dose de 80 kg ha⁻¹ de N, que proporcionou 120,9 Mg ha⁻¹.

A melhoria na produtividade dos colmos da cana-de-açúcar sob irrigação pulsada é atribuída ao fracionamento da solução, no qual permite uma melhor distribuição da umidade do solo ao longo do dia, resultando em maior absorção de água e nutrientes pelas plantas. Estudando a cultura da cana-de-açúcar (cultivar RB041443) sob gotejamento pulsado, Andrade et al. (2024), obtiveram TCH de 95,7 Mg ha⁻¹. Menezes et al. (2024), para mesma cultivar, porém, em condições de cana-soca, obtiveram um TCH de 147,4 Mg ha⁻¹ quando as plantas foram submetidas a irrigação por pulsos.

Os autores, anteriormente citados, enfatizaram que essa melhoria na produtividade em comparação a irrigação contínua é atribuída ao incremento na distribuição de umidade do solo na zona radicular após a aplicação dos pulsos. Conforme Abdelraouf et al. (2012), o aumento no volume do solo molhado resulta em uma maior disponibilidade de água e nutrientes na zona radicular da planta, contribuindo para o aumento da produtividade das culturas.

Com relação ao desdobramento dos tipos aplicação da irrigação dentro de cada uma das doses de N aplicadas (Figura 7A), observa-se que houve diferença significativa entre a irrigação pulsada e contínua nas doses de 160, 240 e 320 kg ha⁻¹ de N, resultando em incrementos percentuais de 22,4, 18,1 e 26,9%, respectivamente, em comparação com a TCH obtida com irrigação contínua. O nitrogênio constitui-se como um nutriente de suma importância para a produção de cana-de-açúcar, sendo frequentemente fornecido por meio da água de irrigação (Rhein et al., 2016; Vega et al., 2020). A prática da irrigação possibilita uma maior mobilidade desse nutriente na subsuperfície do solo, o que se revela fundamental para a cultura da cana-de-açúcar, considerando as dificuldades associadas à incorporação de fertilizantes sem causar danos ao sistema radicular (Quintana et al., 2012; Rhein et al., 2016).

Os resultados também evidenciaram que a irrigação pulsada com doses de nitrogênio superiores a 223,8 kg ha⁻¹ causou redução da produtividade da cultura. De acordo com Faquin (1994), doses excessivas de N podem desequilibrar a nutrição da planta, reduzindo a absorção de outros nutrientes essenciais, resultando em deficiências nutricionais e, conseqüentemente, redução da produção.

Quanto ao RBA (Figura 7B), o maior valor alcançado com a irrigação pulsada foi de 26,8 Mg ha⁻¹, o qual foi obtido com a aplicação da dose equivalente a 225,6 kg ha⁻¹ de

N, registrando-se um incremento de 90% em relação ao valor observado com a menor dose aplicada (80 kg ha^{-1} de N – $14,1 \text{ Mg ha}^{-1}$). Para irrigação contínua, o maior valor encontrado do RBA foi de $22,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, obtido na dose correspondente a $223,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, evidenciando-se um incremento percentual de 37,5% sobre a dose de 80 kg ha^{-1} de N, o qual o valor encontrado foi de $16,5 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Por meio do desdobramento dos dois tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) dentro das doses de nitrogênio aplicadas (Figura 7B), constata-se que houve diferença significativa entre a irrigação pulsada e contínua nas doses de 160, 240 e 320 kg ha^{-1} . A irrigação pulsada incrementou em 26,9, 31,3 e 38,5%, respectivamente, em relação à irrigação aplicada de maneira contínua.

O comportamento do rendimento bruto de açúcar (RBA) foi semelhante ao apresentado pela produtividade de colmos (TCH), o que indica que maiores doses de N contribuíram para o aumento do RBA. Para os tipos de aplicação da irrigação, a irrigação pulsada incrementou o RBA da cana-de-açúcar. Este efeito era esperado, visto que também impactou nos parâmetros morfológicos e nos rendimentos do colmo, estabelecendo uma relação direta com esses elementos. Além disso, o incremento no RBA resultante da aplicação da irrigação pulsada, possivelmente, foi ocasionado pela maior disponibilização e absorção de nutrientes pelas plantas em função da utilização dessa técnica de manejo da irrigação. Costa et al. (2019) estudando a cana-de-açúcar (RB92579) obtiveram $29,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ de RBA com a dose correspondente 120 kg ha^{-1} de N. Iqbal et al. (2020) constataram para cana-de-açúcar, cultivar CPF-246, RBA de $13,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ com aplicação de 126 kg ha^{-1} de N via fertirrigação.

Em relação os tipos de aplicação, Andrade et al. (2024) obtiveram para a cana-de-açúcar (RB041443) RBA de $20,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ quando a cultura foi submetida a irrigação por pulsos. Menezes et al. (2024) para mesma cultivar, sob irrigação por gotejamento pulsado obtiveram RBA de $29,9 \text{ Mg ha}^{-1}$. Estes resultados corroboram a eficácia da irrigação pulsada em aumentar o rendimento da cana-de-açúcar, especialmente quando combinada com doses de nitrogênio.

Para o rendimento bruto de álcool (RBE) (Figura 7 C) verificou-se que o maior valor encontrado foi de $21,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ obtido na dose correspondente a $244,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, revelando incremento de 106,8% sobre a dose de 80 kg ha^{-1} de N, cujo valor estimado foi de $10,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Já em relação à irrigação de forma contínuo, o rendimento de álcool máximo obtido foi $14,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, na dose estimada de $194,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, apresentando

um incremento percentual de 36,4% sobre a dose de 80 kg ha⁻¹ de N, do qual o valor encontrado foi de 10,7 m³ ha⁻¹.

Assim como constatado para o rendimento de açúcar, o aumento das doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação pulsada, também incrementou o rendimento bruto do álcool (RBE). Isso só foi possível porque a técnica da irrigação por pulsos mantém a umidade no solo mais constante ao longo do dia, ademais, o nitrogênio foi disponibilizado de forma fracionada durante o dia, fazendo com que a planta absorvesse de maneira mais eficiente o nutriente. Segundo Zamora et al. (2019), o fornecimento parcelado de água e nutrientes ao longo do dia contribui para a manutenção prolongada da umidade na zona radicular. Semelhante os resultados obtidos no presente estudo, Andrade et al. (2024) e Menezes et al. (2024) também obtiveram incrementos no rendimento do álcool na cultura da cana-de-açúcar (RB041443), sob irrigação por gotejamento pulsado. Foram estimados valores de 14,9 e 18,3 m³ ha⁻¹, respectivamente. Os autores associaram esses resultados ao aumento da eficiência de absorção de água e nutrientes pelas plantas de cana-de-açúcar, devido à manutenção dos teores de umidade adequados no solo proporcionados pela técnica.

Quanto o desdobramento dos tipos de aplicação da irrigação dentro de cada uma das doses de nitrogênio aplicadas (Figura 7C), foram obtidos incrementos percentuais para a irrigação pulsada de 27, 31 e 39% sobre o RBE nas doses de 160, 240 e 320 kg ha⁻¹, quando comparada com a irrigação contínua. Estudando o rendimento do etanol da cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada com diferentes reposições hídricas, Silva et al. (2020) obtiveram RBE de 24 m³ ha⁻¹, com 100 kg ha⁻¹ de N combinada com 100% da reposição hídrica. Gomes et al. (2021) obtiveram para cana-de-açúcar (SP80-1816,) RBE de 16,18 m³ ha⁻¹ com fornecimento de 180 kg ha⁻¹ de N.

4. CONCLUSÃO

A dose de 226 kg ha⁻¹ de N proporcionou a maior produtividade de colmos pela cultura.

O incremento das doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação contribuiu para o aumento dos parâmetros biométricos da cana-de-açúcar, proporcionando maior produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e de etanol.

A irrigação aplicada de forma pulsada associada a adubação nitrogenada proporcionou maior altura de colmos e de rendimentos da cana-de-açúcar, com melhorias tanto na produtividade de colmos quanto na produção de açúcar e etanol.

A irrigação pulsada proporcionou às plantas maiores valores de diâmetro dos colmos, de área e de índice de área foliar.

Os melhores resultados em termos de altura, diâmetro de colmo, área foliar, índice de área foliar e produção da cultura foram observados com a aplicação de doses superiores a 100 kg ha^{-1} de N.

5. REFERÊNCIAS

- Abdelraouf, R. E., Abou-Hussein, S. D., Abd-Alla, A. M., Abdallah, E. F. Effect of short irrigation cycles on soil moisture distribution in root zone, fertilizers use efficiency and productivity of potato in new reclaimed lands. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 8, n. 7, p. 3823-3833, 2012.
- Aguiar, A. T. E., Gonçalves, C., Paterniani, M. E. A. G. Z., Tucci, M. L. S. A., Castro, C. E. F. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas - Boletim 200. 7ª Ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2014. 452p. (Boletim IAC, nº 200).
- Allen, R. G., Pereira, P. S., Raes, R., Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Almeida, H. J, Pancelli, M. A., Prado, R. M., Cavalcante, V. S., Cruz, F. J. R. Effect of potassium on nutritional status and productivity of peanuts in succession with sugarcane. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 15, n. 1, p. 1-10, 2015. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000001>
- Almeida, W. F., Paz, V. P. S., Jesus, A. P. C., Silva, J. S., Gonçalves, K. S., Oliveira, A. S. Yield of green beans subjected to continuous and pulse drip irrigation with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 7, p. 476-481, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p476-481>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., Sparovek, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. *Meteorologische zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- Anas, M., Liao, F., Verma, K. K., Sarwar, M. A., Mahmood, A., Chen, Z. L., Li, Y. R. Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. *Biological Research*, v. 53, n. 47, p. 1-20, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40659-020-00312-4>
- Andrade, W. J. M., Silva, G. F., Menezes, S. M., Silva, M. M., Silva, A. O., Lopes, I. A. P., Sousa, R. R. Características fisiológicas e rendimento da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação. *Observatório de La Economía Latino-americana*, v. 22, n. 1, p. 4387-4415, 2024. <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-232>

- Aquino, G. S., Medina, C. C., Costa, D. C., Shahab, M., Santiago, A. D. Sugarcane atraw management and its impactos on production and development of ratoons. *Industrial Crops and products*, v. 102, p. 58-64, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.018>
- Assouline, S., Möller, M., Cohen, S., Ben-Hur, M., Grava, A., Narkis, K., Silber, A. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 5, p. 1556-1568, 2006. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0365>
- Babu, D. K. S., Janakiraman, V., Palaniswamy, H., Kasirajan, L., Gomathi, R., Ramkumar, T. R. A short review on sugarcane: its domestication, molecular manipulations and future perspectives. *Genetic Resources and Crop Evolution*, v. 69, n. 8, p. 2623-2643, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01430-6>
- Bhatt, R., Kumar, R., Kashyap, L., Alataway, A., Dewidar, A. Z., Mattar, M. A. Growth, yield, quality and insect-pests in sugarcane (*Saccharum officinarum*) as affected by differential regimes of irrigation and potash under stressed conditions. *Agronomy*, v. 12, n. 8, p. 1942, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081942>
- Boschiero, B. N., Mariano, E., Torres-Dorante, L. O., Sattolo, T. M., Otto, R., Garcia, P. L., Trivelin, P. C. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 117, p. 367-382, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10074-w>
- Caldas, C. Manual de análises selecionadas para indústrias sucroalcooleiras. Maceió: Sindicato da Indústria e do Álcool do Estado de Alagoas, 1998. 438p.
- Campos, P. F., Alves Júnior, J., Casaroli, D., Fontoura, P. R., Evangelista, A. W. Variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação suplementar no cerrado goiano. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 6, p. 1139-1149, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000600010>
- Castro-Nava, S., Herrera-Sepúlveda, M. R., García-Girón, J. O. S. E. Photosynthetic Response to Nitrogen Fertilization in Sugarcane Under Rainfed and High-Temperature Conditions. *Revista Caatinga*, v. 33, n. 4 p. 1140-1149, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n429rc>

- Cavalcanti, F. L. A., Santos, J. C. P., Pereira, J. R., Leite, J. P., Silva, M. C. L., Freire, F. J., Silva, D. J., Sousa, A. R., Messias, A. S., Faria, C. M. B., Burgos, N., Lima Júnior, M. A., Gomes, R. V., Cavalcanti, A. C., Lima, J. F. V. F. Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. 2ª aproximação. 3 ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco IPA, 2008. 212p.
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Terceiro Levantamento: Safra 2023/2024. CONAB, Brasília, Brasil, v. 11, n. 3, 2024.
- CONSECANA - Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. Manual de Instruções. 6.ed. Piracicaba - SP, 2015. 80p.
- Costa, A. R. F. C., Rolim, M. M., Simões Neto, D. E., Silva, M. M., Silva, G. F., Pedrosa, E. M. R. Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *Irriga*, v. 24, n. 1, p. 38-53, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p38-53>
- Cursi, D. E., Hoffmann, H. P., Barbosa, G. V. S., Bressiani, J. A., Gazaffi, R., Chapola, R. G., Carneiro, M. S. History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. *Sugar Tech*, v. 24, n. 1, p. 112-133, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00951-1>
- Dillewijn, C. V. Botany of sugarcane. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.
- Dinh, H. T., Watanabe, K., Takaragawa, H., Kawamitsu, Y. Effects of drought stress at early growth stage on response of sugarcane to different nitrogen application. *Sugar Tech*, v. 20, n. 4, p. 420-430, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-05>
- Doorenbos, J. Y., Pruitt, W. O. Crop water requirements. FAO Estudio de Riego y Drenaje, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, n. 24, Roma, n. 24, 1977. 144p.
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33), 1994. 306p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5.ed. Brasília, 2018. 355p.
- Faquin, V. Nutrição mineral de plantas. Lavras: ESALFAEPE, 1994. 227p.

- Ferreira, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Gomes, F. H., Soares, F. A. L., Teixeira, M. B., Sousa, A. E. C., Silva, E. C., Vidal, V. M., Dantas, L. R. Sources and doses of nitrogen in plant cane production and residual effect on the first ratoon of sugarcane in a savannah Red Oxisol. *Revista Australiana de Crop Science*, v. 15, n. 5, p. 708-715, 2021. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.167560642961310>
- Gomide, C. A. D. M., Gomide, J. A. Análise de crescimento de cultivares de *Panicum maximum* Jacq. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 28, n. 4, p. 675-680, 1999. <https://doi.org/10.1590/S1516-35981999000400003>
- Gu, Y., Wang, J., Cai, W., Li, G., Mei, Y., Yang, S. Different amounts of nitrogen fertilizer applications alter the bacterial diversity and community structure in the rhizosphere soil of sugarcane. *Frontiers in Microbiology*, v. 12, p. 721441, 2021. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.721441>
- Hermann, E. R., Câmara, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. *Revista STAB - Açúcar, Alcool e Subprodutos*, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999.
- Horschutz, A. C. O., Cunha, F. N., Teixeira, M. B., Silva, E. C., Cabral Filho, F. R., Alves, D. K. M. Leaf growth and development of sugarcane irrigated and fertilized with different sources and doses of nitrogen. *Irriga*, v. 27, n. 2, p. 296-310, 2022. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2022v27n2p296-310>
- Inman-Bamber, N. G., Lakshmanan, P., Park, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. *Field Crops Research*, v. 134, p. 95-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.004>.
- Iqbal, Z., Chattha, M. B., Subhani, M. N. Impact of different levels of nitrogen by soil application and fertigation through drip irrigation on growth, yield and quality of sugarcane. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, v. 57, n. 3, p. 829-835, 2020. <https://10.21162/PAKJAS/20.8833>
- Karmeli, D., Peri, G. Basic Principles of Pulse Irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, v. 100, n. 3, p. 309-319, 1974. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000988>.

- Keller, J., Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, v. 17, p. 678-684, 1974.
- Kölln, O. T., Castro Gava, G. J., Mariano, E., Cantarella, H., Panutti, L. E., Uribe, R. M., Arlanch, A. B., Paludetto, A., Pereira, C. D., Trivelin, P. C. O. Biomass accumulation and growth curve in sugarcane fertigated with nitrogen doses. *Australian Journal of Crop Science*, v. 17, n. 3, p. 244-253, 2023. <https://doi.org/10.21475/AJCS.23.17.03.P3079>
- Lira, R. M., Silva, E. F. F., Simões Neto, D. E., Santos Júnior, J. A., Lima, B. L. C., Silva, J. S. Growth and yield of sugarcane irrigated with brackish water and leaching fractions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 3, p. 170-175, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n3p170-175>
- Ma, Z., Wu, W., Alatalo, J. M., Fu, W., Bai, Y. Optimal water-fertilizer combinations for efficient nitrogen fixation by sugarcane at different stages of growth. *Water*, v. 13, n. 20, p. 2895, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13202895>
- Maia Júnior, S. O., Silva, J. A. C., Santos, K. P. O., Cordeiro, D. R. C., Silva, J. V., Endres, L. Respostas morfológicas e fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar sob estresse hídrico no segundo ciclo de cultivo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 12, n. 3, p. 2661-2672, 2018. <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n300830>
- Martins, P. H. M., Oliveira, R. A. A., Buso, W. H. D., Rodovalho, R. S. Análise de crescimento do feijoeiro a diferentes manejos de adubação nitrogenada na região do cerrado. *Revista Agrotecnologia*, v. 8, p. 63-70, 2017. Doi: 10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v8n1p63-70
- Menezes, S. M., Silva, G. F., Silva, M. M., Morais, J. E. F., Vasconcelos, M. C., Souza, C. S., Rolim, M. M. Pulsed drip irrigation reduces sugarcane water consumption and improves growth, productivity, sugar and ethanol yields. *BioEnergy Research*, p. 1-12, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10729-4>
- Menezes, S. M., Silva, G. F., Zamora, V. R. Ó., Silva, M. M., Silva, A. C. R. A., Silva, E. F. F. Nutritional status of coriander under fertigation depths and pulse and continuous drip irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 6, p. 364-371, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n6p364-371>

- Oliveira Junior, A. C., Silva, S., L. N., Reis, M. N. O., Vitorino, L. C., Bessa, L. A., Teixeira, M. B., Soares, F. A. L. Effect of Mineral and Organic Nitrogen Sources on Vegetative Development, Nutrition, and Yield of Sugarcane. *Agronomy*, v. 13, n. 6, p. 1627, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061627>
- Oliveira, A. R., Braga, M. B., Santos, B. L. S., Walker, A. M. Biometria de cultivares de cana-de-açúcar sob diferentes reposições hídricas no vale do Submédio São Francisco. *Energia na Agricultura*, v. 31, n.1, p.48-58, 2016. <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2016v31n1p48-58>
- Oliveira, E. C. A. D., Freire, F. J., Oliveira, R. I. D., Oliveira, A. C. D., Freire, M. B. G. D. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 3, p. 579-588, 2011b. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300002>
- Oliveira, F. M., Aspiazú, I., Kondo, M. K. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. *Revista Trópica*, v. 5, n. 1, p. 56-67, 2011a. <https://doi.org/10.0000/rtcab.v5i1.305>
- Oliveira, O. H., Pinto, M. C., Souto, L. S., Dutra Filho, J. A., Luna, R. G., Souza, A. S. Analysis of the initial growth of sugarcane in an irrigation regime with wastewater. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 10, p. e779108416-e779108416, 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8416>
- Oliveira, R. A., Daros, E., Zambon, J. L. C., Weber, H., Ido, O. T., Bessalho-Filho, J. C., da Silva, D. K. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.
- Oliveira, R. A., Hoffmann, H. P., Barbosa, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. Orgs. Curitiba: UFPR/RIDESA, 2021. 79p.
- Pereira, M. J., Santos, R. L., Silva, C. J. C., Ataíde, L. S. C., Santos, R. V. S., Monte, I. R., Silva, I. C., Santos, J. A., Santos, M. B. C. Desenvolvimento de variedades de cana-de-açúcar sob aplicação foliar de nitrogênio. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 9, n. 8, p. e297985359, 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5359>

- Pereira, R. M., Casaroli, D., Vellame, L. M., Alves Júnior, J., Evangelista, A. W. P. Sugarcane leaf area estimate obtained from the corrected normalized difference vegetation index (NDVI). *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 46, n. 2, p. 140-148, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4639303>
- Pereira, V. G. M. F., Lopes, A. S., Belchior, I. B., Fanaya Júnior, E. D., Pacheco, A., Brito, K. R. M. Irrigação e fertirrigação na cultura do eucalipto. *Ciência Florestal*, v. 29, n.3, p. 22-34, 2019. <https://doi.org/10.5902/1980509823362>
- Prado, R. M., Franco, C. F., Puga, A. P. Deficiências de macronutrientes em plantas de soja cv. BRSMG 68 (Vencedora) cultivada em solução nutritiva. *Comunicata Scientiae*, v. 1, n. 2, p. 114-119, 2010.
- Quintana, K. A., Zanini, J. R., Silva, E. R. Irrigação e fertirrigação por gotejamento para cana-de-açúcar na presença e ausência de boro. *Científica*, v. 40, n. 2, p. 103-116, 2012. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2012v40n2p103%20-%20116>
- Rhein, A. F., Pincelli, R. P., Arantes, M. T., Dellabiglia, W. J., Kölln, O. T., Silva, M. D. A. Technological quality and yield of sugarcane grown under nitrogen doses via subsurface drip fertigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 209-214, 2016. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p209-214>
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., Alvarez, V. H. V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. 359p.
- Rolbiecki, R., Rolbiecki, S., Figas, A., Jagosz, B., Wichrowska, D., Ptach, W., Liberacki, D. Effect of drip fertigation with nitrogen on yield and nutritive value of melon cultivated on a very light soil. *Agronomy*, v. 11, n. 5, p. 934, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050934>
- Shekinah, E. D., Sundara, B., Rakkiyappan, P. Relative significance of N nutrition on yield, quality and ethanol in sugarcane (*Saccharum species hybrid*) plant: ratoon system. *Sugar Tech*, v. 14, n. 2, p. 134-137, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12355-011-0124-y>
- Silva, C. J. D., Flumignan, D. L., Arcoverde, S. N., Comunello, E. Growth and production of sugarcane varieties under supplementary irrigation and no irrigation. *Revista*

Caatinga, v. 36, n. 4, p. 885-896, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252023v36n416rc>

Silva, N. F., Cunha, F. N., de Oliveira, R. C., de Freitas Moura, L. M., de Campos Bastos, F. J., Teixeira, M. B. Crescimento da cana-de-açúcar sob aplicação de nitrogênio via gotejamento subsuperficial. *Revista Brasileira De Agricultura Irrigada-Rbai*, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2014. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v8n100188>

Silva, N. F., Cunha, F. N., Teixeira, M. B., Antonio, F., Soares, L. Crescimento e rendimento da Cana-de-açúcar irrigada submetida a diferentes reposições hídricas e nitrogênio. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 14, n. 1, p. 3792-3802, 2020. <https://doi.org/10.7127/rbai.v14n100955>

Singh, K., Brar, A. S., Mishra, S. K. Improvement in Productivity and Profitability of Sugarcane Through Drip Fertigation in North Indian Conditions. *Sugar Tech*, v. 23, n. 3, p. 536-545, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00924-w>

Vale, D. W., Prado, R. M., Avalhães, C. C., Hojo, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 6, n. 2, p. 189-196, 2011. <https://doi:10.5039/agraria.v6i2a550>

Vandenberghe, L. P. S., Valladares-Diestra, K. K., Bittencourt, G. A., Zevallos Torres, L. A., Vieira, S., Karp, S. G., Sydney, E. B., de Carvalho, J. C., Thomaz Soccol, V., Soccol, C. R. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 167, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>

Vega, V. S., Salagar, V. S., Cabrejos, J. P. Nitrogen cycle of sugarcane irrigated with 'filter cake water'. *Sugar Tech*, v. 22, n. 3, p. 445-450, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00810-5>

Watson, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, v. 11, n. 1, p. 41-76, 1947.

Yang, Y., Gao, S., Jiang, Y., Lin, Z., Luo, J., Li, M., Que, Y. The physiological and agronomic responses to nitrogen dosage in different sugarcane varieties. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, p. 406, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00406>

Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Silva, G. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Menezes, S. M. Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of coriander. *Horticultura Brasileira*, v. 37, n. 1, p. 22-28, 2019. https://doi.org/10.1590/s0102_053620190103

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo trouxe contribuições para o manejo de irrigação e fertilização da cana-de-açúcar. A pesquisa foi realizada na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), localizada na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco e demonstrou que o uso da irrigação pulsada, em comparação com a irrigação contínua, foi melhor do ponto de vista de produção e nutrição da cultura.

Os resultados indicaram que a irrigação pulsada contribuiu para aumentos na produção de biomassa seca da parte aérea e dos colmos, com incrementos de 13,9 e 10,1%, respectivamente. Esses ganhos podem ser atribuídos à manutenção da umidade do solo proporcionada pela irrigação pulsada, que favoreceu a absorção de nutrientes essenciais, como nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio, magnésio, ferro, cobre, manganês e zinco, fundamentais para processos metabólicos das plantas.

Além dos benefícios atribuídos a produção e fertilização, a combinação de irrigação pulsada com doses de nitrogênio proporcionou melhorias nas respostas fisiológicas e biométricas da cana-de-açúcar. Portanto, com este estudo fica evidenciado a importância de práticas agrícolas que integrem a manutenção da umidade do solo com adubação nitrogenada equilibrada. A adoção de técnicas como a irrigação pulsada pode não apenas aumentar a eficiência produtiva da cana-de-açúcar, mas também promover a sustentabilidade agrícola, contribuindo para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos e nutricionais utilizados.

Recomenda-se que futuras pesquisas aprofundem a investigação de novas estratégias de manejo de irrigação e nutrição, considerando tanto a viabilidade econômica quanto os impactos ambientais dessas práticas em diferentes contextos regionais. Para melhorar a compreensão da irrigação pulsada, torna-se fundamental, também, estudar o comportamento da umidade do solo e como ela se relaciona com seus aspectos morfológicos, nutricionais e de produção da cana-de-açúcar.

Além disso, se faz fundamental a determinação do número ideal de pulsos de irrigação, do tempo e dos intervalos de aplicação das irrigações, tudo com fins de desenvolvimento de práticas de manejo mais eficientes e ajustadas às condições específicas de cada cultivo. Também se faz importante realizar dois ciclos visando-se o monitoramento dos períodos de maior déficit hídrico na região.