

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CRESCIMENTO E QUALIDADE DE MUDAS PRÉ-
BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE
ADUBAÇÃO E DE TEMPOS DE RUSTIFICAÇÃO**

Ana Beatriz Coelho França

Engenheira Agrônoma

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CRESCIMENTO E QUALIDADE DE MUDAS PRÉ-
BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE
ADUBAÇÃO E DE TEMPOS DE RUSTIFICAÇÃO**

Ana Beatriz Coelho França

Orientadora: Profa. Dra. Mara Cristina Pessoa da Cruz

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

2024

F814c

França, Ana Beatriz Coelho

Crescimento e qualidade de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar em função de adubação e de tempos de rustificação / Ana Beatriz Coelho França. -- Jaboticabal, 2025
56 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Mara Cristina Pessoa Da Cruz

1. Cana-de-açúcar. 2. Sustentabilidade. 3. Adubação. 4.
Mudas. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Com esta pesquisa será possível elaborar novos protocolos de produção de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, nos quais serão propostos diminuição da adubação e do tempo de rustificação. Adotando essas estratégias de manejo foi possível observar que a qualidade das mudas se mantém ou aumenta, o que implica em sistemas de produção mais econômicos e sustentáveis.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

With this research it will be possible to develop new protocols for the production of pre-sprouted sugarcane seedlings, in which a reduction in fertilization and rustification time will be proposed. By adopting these management, it was possible to observe that the quality of the seedlings was maintained or increased, which implies more economical and sustainable production systems.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: CRESCIMENTO E QUALIDADE DE MUDAS PRÉ- BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE ADUBAÇÃO E DE TEMPOS DE RUSTIFICAÇÃO

AUTORA: ANA BEATRIZ COELHO FRANÇA


ORIENTADORA: MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ (Participação Presencial)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal


Dr. LUIS GUSTAVO TEIXEIRA (Participação Presencial)
Grupo São Martinho S/A/ Pradópolis/SP


Prof. Dr. JOSÉ RICARDO MANTOVANI (Participação Presencial)
Fundação de Ensino e Tecnologia de Alfenas / Universidade José do Rosário Vellano (UNIFENAS) - Alfenas/MG


Pesquisador Dr. ESTÊVÃO VICARI MELLIS (Participação Presencial)
Centro de Solos e Recursos Agroambientais, Fertilidade do Solo / Instituto Agrônomo de Campinas IAC - Campinas/SP


Dr. ANTONIO MÁRCIO SOUZA ROCHA (Participação Presencial)
Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão (FEPE) / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 22 de novembro de 2024

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

ANA BEATRIZ COELHO FRANÇA - nascida em 22 de abril de 1992 em Ribeirão Preto – SP, graduou-se em Engenharia Agrônoma em fevereiro de 2016 pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal (FCAV-UNESP). Trabalhou neste período com a caracterização mineralógica das Terras Pretas de Índio e métodos de quantificação indireta (Suscetibilidade magnética, Espectroscopia de reflectância difusa e Fluorescência de raios-X), sendo bolsista de iniciação científica da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) entre os anos de 2012 e 2014. Realizou intercâmbio pelo programa Ciências sem Fronteiras durante 1 ano e 5 meses na Universidade do Estado do Colorado. Em agosto de 2015, concluiu estágio extracurricular no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA/ Agricultural Research Service) e treinamento técnico no laboratório Natural Resource Ecology localizado na Colorado State University. Em agosto de 2019, obteve o título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Câmpus de Jaboticabal – SP. Durante este período trabalhou com Suscetibilidade magnética e Espectroscopia de reflectância difusa na predição de metais pesados em solos tropicais sob o cultivo de cana-de-açúcar. Em março de 2021, iniciou o curso de Doutorado pelo Programa Ciência do Solo na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP (Câmpus de Jaboticabal). Atua profissionalmente desde 2016 na Usina São Martinho, localizada em Pradópolis – SP, sendo suporte técnico responsável pela produção das mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar.

“Reconheça todas as suas pequenas vitórias.
Eventualmente elas irão se somar e virar algo
enorme e incrível” (Kara Goucher)

Aos pilares da minha vida: José Fernando França e Valéria Duarte Coelho França, que estão comigo em todos os momentos, e que me ensinam a compartilhar, agradecer e amar.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por me guiar em cada momento de dificuldade e cansaço. Valeu a pena cada esforço para chegar até aqui.

À Professora Mara Cristina Pessôa da Cruz, que considero inspiração de vida e dedicação. Obrigada pela paciência, ensinamentos e confiança durante estes anos de trabalho.

Ao meu noivo Fábio Tiraboschi Leal, que me ajudou a construir essa jornada maravilhosa, sempre oferecendo seu amor, paciência, serenidade, resiliência e comemorando comigo todas as pequenas grandes alegrias.

À minha irmã Ana Laura Coelho França, por ser meu exemplo de esforço, dedicação, lucidez e carinho, e aos meus sobrinhos Iago Coelho Moreira e Benjamim França da Costa, que são minhas maiores riquezas.

À minha avó Cuca, pelas orações, palavras fraternas e de acolhimento e à minha avó Lena (*in memoriam*) que sempre nos ensinou o valor do estudo, persistência e constância.

Aos membros da banca de qualificação, Dr. Rafael Gonçalves Peluco e Dr. Daniel de Bortoli Teixeira, cujas sugestões contribuíram para o enriquecimento deste estudo.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Luís Gustavo Teixeira, Dr. José Ricardo Mantovani, Dr. Estêvão Vicari Mellis e Dr. Antônio Márcio Souza Rocha, que contribuíram com valiosas sugestões, tornando este trabalho ainda mais consistente e relevante.

Aos amigos da Usina São Martinho que me apoiaram, sem medir esforços, em especial ao Marcos Roberto Pereira Alves, Gildasio da Silva, Emerson Lima, Andresa Carla do Nascimento, Idnei Samuel Dela Marta e Diego Furlan.

Aos colegas do Laboratório de Fertilidade do Solo, que auxiliaram durante a condução das avaliações, João Pedro de Sá, Roger Meirelles Pereira e Sabrina Lopes.

À Usina São Martinho, pelo incentivo para a realização deste trabalho, bem como pela concessão da área experimental.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da UNESP – Jaboticabal, pela confiança e oportunidade de realizar esta pesquisa.

Finalmente, a todos os que contribuíram, de maneira direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Importância da cultura da cana-de-açúcar.....	3
2.2. Modalidades de plantio de cana de açúcar.....	5
2.3. Sistema de produção das MPBs.....	6
2.4. Nutrição de mudas e crescimento do sistema radicular	8
2.5. Substratos e adubação para mudas pré-brotadas.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Experimento 1: Marcha de acúmulo de matéria seca e nutrientes em mudas de cana-de-açúcar.....	13
3.2. Experimento 2: Potencial de fornecimento de nutrientes pelo substrato e adequação da adubação do substrato e da fertirrigação para produção de MPBs.....	15
3.3. Experimento 3: Definição da frequência de fertirrigação para produção de MPBs.....	19
3.4 Experimento 4: Emissão de raízes em função de tempos de rustificação e de adubação de substrato.....	21
3.5. Experimento 5: Multiplicação de MPBs, no campo, obtidas com variação nos tempos de rustificação.....	23
3.6. Análise estatística dos dados.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1. Experimento 1: Marcha de acúmulo de matéria seca e nutrientes em mudas de cana-de-açúcar.....	25
4.2. Experimento 2: Potencial de fornecimento de nutrientes pelo substrato e adequação da adubação do substrato e da fertirrigação para produção de MPBs.....	31
4.3. Experimento 3: Definição da frequência de fertirrigação para produção de MPBs.....	41
4.4 Experimento 4: Emissão de raízes em função de tempos de rustificação e de adubação de substrato.....	45
4.5. Experimento 5: Multiplicação de MPBs, no campo, obtidas com variação nos tempos de rustificação.....	47
5. CONCLUSÕES	49
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
6. REFERÊNCIAS	50

CRESCIMENTO E QUALIDADE DE MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE ADUBAÇÃO E DE TEMPOS DE RUSTIFICAÇÃO

RESUMO – A utilização de mudas pré-brotadas (MPBs) de cana-de-açúcar proporciona a formação de canaviais mais homogêneos, sadios e com maior potencial de produtividade. No entanto, o sucesso no uso das MPBs depende da qualidade das mudas, que resulta, entre outros fatores, de um bom manejo da adubação. Mudanças bem nutridas apresentam maior vigor de parte aérea e raízes e, com isso, maior potencial de sobrevivência no pós-transplante. Com o propósito de ajustar a adubação de MPBs em um sistema de produção comercial, foram conduzidos quatro experimentos em casa de vegetação e um no campo. O delineamento estatístico está descrito para cada experimento, mas em todos foram avaliadas quatro repetições e o procedimento estatístico foi análise de variância (ANOVA), com comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. No experimento 1, conduzido em delineamento inteiramente ao acaso, o objetivo foi determinar o acúmulo de matéria seca e nutrientes ao longo do ciclo de MPBs das cultivares CTC2994, IACSP95-5094 e CTC 4, que cresceram em vasos com solo. Constatou-se que para as cultivares IACSP95-5094 e CTC 4 a sequência de acúmulo de nutrientes foi K>N>Ca>Mg>P>S, e para a CTC2994 foi K>N>Mg>Ca>P>S. O experimento 2, conduzido em blocos ao acaso com parcelas subdivididas, foi conduzido em bandejas com substrato, com objetivo de avaliar o potencial de fornecimento de nutrientes pelo substrato. Nesse experimento foi verificado que a mistura de bagaço de cana, torta de filtro e húmus de torta de filtro na proporção 8:1:1 (v:v:v) é insuficiente para garantir a nutrição adequada das mudas, e que, por outro lado, a adubação do substrato associada a fertirrigação praticada no viveiro fornece quantidades maiores de nutrientes do que as acumuladas na marcha de absorção (experimento 1), com exceção de K, Mg e Mn. Desse modo, ficou evidenciada a necessidade de ajustes no manejo da adubação praticada no viveiro. Por isso, no experimento 3, também em blocos ao acaso com parcelas subdivididas, foi feita avaliação do manejo da fertirrigação, e foi possível estabelecer que 4 fertirrigações semanais permitem a obtenção de mudas de qualidade equivalente a 6 fertirrigações. No experimento 4, em delineamento inteiramente ao acaso, foram avaliados os efeitos de doses na adubação de substrato e de tempos de rustificação em características da parte aérea e de raízes da cultivar CTC2994 transplantada em vasos. Constatou-se que com 1/3 da adubação de substrato praticada no viveiro foram obtidas mudas de qualidade e com maior desenvolvimento do sistema radicular. Os resultados do experimento 4 foram validados em campo, no experimento 5, conduzido em blocos ao acaso, com o objetivo de avaliar três tempos de rustificação e as mesmas três cultivares, no desempenho das mudas no campo. No momento da desdobra observou-se que os tempos de rustificação 20 e 30 dias apresentaram maior quantidade de perfilhos por metro e maior taxa de desdobra, em relação a 10 dias de rustificação. Portanto, a adubação do substrato pode ser diminuída para 1/3 da dose empregada no viveiro, o número de fertirrigações pode ser reduzido de 6 para 4 aplicações semanais e o tempo de rustificação pode ser encurtado de 30 para 20 dias.

Palavras-chave: substrato, qualidade, raiz, MPBs, marcha de absorção

GROWTH AND QUALITY OF PRE-SPROPPED SUGARCANE SEEDLINGS AS A FUNCTION OF NUTRIENT SUPPLY AND RUSTIFICATION TIMES

ABSTRACT – The use of pre-sprouted sugarcane seedlings (MPB) provides a more homogeneous sugarcane field formation, healthy and with greater productivity potential. However, the success in using MPBs depends on the quality of the seedlings, which results in good fertilizer management. Well-nourished seedlings have greater aerial and root vigor therefore greater potential for post-transplant survival. With the purpose of adjusting the fertilization of MPBs in a commercial production system, four experiments were conducted in a greenhouse and one in the field. The statistical design is described for each experiment, all experiments had four replications, and the statistical procedure used was ANOVA. It was used Tukey test at 5% probability. Experiment 1 was conducted in a completely randomized design. The objective was to determine the accumulation of dry mass and nutrients throughout the MPB cycle of three cultivars CTC2994, IACSP95-5094 and CTC4 that grew in pots with soil. It was found that for macronutrients, the accumulation sequence, regardless of the cultivar, was $K > N > Ca > Mg > P > S$. The accumulation sequence for micronutrients was $Mn > Zn > Fe > B > Cu$. Experiment 2, was conducted in randomized blocks with split plots and was conducted in trays with substrate. The objective was to evaluate the potential of substrate supply the need of nutrients by MPBs. In this experiment it was found that the substrate with sugarcane bagasse, filter cake and filter cake humus (8:1:1, in volume) is insufficient to ensure adequate nutrition for seedlings. Also, the fertilization of the substrate associated with fertigation provides greater amounts of nutrients than those accumulated during the absorption march (experiment 1), except for K, Mg and Mn. Therefore, there is a need for adjustments in the management of fertilization practiced in the nursery. Therefore, in the experiment 3, also in randomized blocks with subdivided plots, an assessment of fertigation management was carried out. It was possible to establish that 4 weekly fertigations allow obtaining seedlings of equivalent quality to 6 fertigations. The experiment 4, was used completely randomized design. This experiment aimed to know the effects of substrate fertilization doses and rustification times on shoot and root characteristics using the cultivar CTC2994 transplanted into pots. It was found that with 1/3 of the substrate fertilization practiced in the nursery, quality seedlings were obtained with greater development of the root system. The results of experiment 4 were validated in the field, in experiment 5. This experiment was conducted in randomized blocks, with the objective of evaluating three rustification times using the same three cultivars, looking for the performance of seedlings in the field. At the time of splitting, it was observed that the rustification times of 20 and 30 days presented a greater number of tillers per meter and a higher splitting rate, compared to 10 days of rustification. Therefore, substrate fertilization can be reduced to 1/3 of the dose used in the nursery, the number of fertigations can be reduced from 6 to 4 weekly applications and the hardening time can be shortened from 30 to 20 days.

Keywords: substrate, quality, roots, MPBs, absorption march

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de produção de mudas pré-brotadas (MPBs) de cana-de-açúcar foi desenvolvida por pesquisadores do Instituto Agrônomo (IAC) e utiliza colmos produzidos a partir de jardins clonais com origem genética e sanidade certificadas. Após o plantio das MPBs no campo, há necessidade de irrigar as mudas, o que aumenta muito os custos de implantação dos canaviais. Mesmo irrigando, o índice de pegamento das plantas é baixo, em determinadas épocas do ano. Embora esse problema explique parte do baixo desempenho das mudas no campo, muitas vezes o insucesso é devido à qualidade das mudas.

De modo geral, a parte aérea vigorosa é a forma mais imediata de avaliação da qualidade das mudas, mas as raízes são também muito importantes, pois estão relacionadas à sobrevivência e adaptação das MPBs às condições de campo. O estado nutricional da planta tem relação direta com o desenvolvimento adequado das MPBs e, por isso, há necessidade de pesquisas relacionadas à nutrição e adubação, visando mudas com parte aérea e raízes vigorosas.

Sabe-se que as relações entre o fornecimento de nutrientes e a formação e o desenvolvimento das raízes são complexas, visto que a proliferação de raízes pode ser estimulada quando elas encontram regiões ricas em nutrientes, mas, em alguns casos, alta concentração de nutrientes pode levar à ocorrência de efeito inverso.

Existem protocolos nos quais estão estabelecidas doses, modos e frequência de aplicação de nutrientes para produção de MPBs. No entanto, eles não contemplam a diversidade de substratos que são usados, especialmente aqueles que contêm na sua composição a torta de filtro, que é fonte de nutrientes, particularmente de N e P, e que podem demandar manejos de adubação diferentes dos recomendados.

O estudo da marcha de absorção de nutrientes e da produção de matéria seca em cada estágio de desenvolvimento das MPBs é de fundamental importância para subsidiar estratégias de adubação que devem ser usadas no substrato. Além disso, desenvolver protocolos específicos para cada forma de fornecimento de

nutrientes, agrupando cultivares em função das exigências nutricionais, é fundamental para o adequado desenvolvimento de raízes e da parte aérea.

Neste sentido, mudas bem nutridas podem apresentar aumento na produção de raízes e de parte aérea, de modo a obter ganhos de qualidade com redução de custos, e uso racional e eficiente dos insumos. No entanto, o possível incremento no volume de raízes devido a melhor nutrição pode implicar na necessidade de reduzir o tempo de rustificação, visto que o sistema radicular mais vigoroso, confinado no volume restrito do tubete, pode enovelar. Os tubetes precisam ser pequenos para otimizar o uso da área física dos viveiros que produzem milhões de mudas anualmente, mas esta restrição, associada a longos períodos de permanência das mudas nos viveiros, além de comprometer o crescimento das raízes, resulta em baixo vigor vegetativo e redução de área foliar. Ajustar a nutrição das MPBs com os tempos de rustificação é um desafio que, se superado, resultará em mudas melhores, produzidas em menor tempo, e com maior potencial de sobrevivência pós-transplântio.

As hipóteses deste trabalho foram: a) cultivares de cana-de-açúcar apresentam respostas a adubação diferentes já na fase de mudas; b) é possível diminuir a adubação de substrato e a fertirrigação das mudas pré-brotadas de cana quando elas são cultivadas em meios que contêm nutrientes; c) o excesso de nutrientes no substrato e o tempo prolongado de rustificação podem inibir a emissão de raízes no pós-transplântio.

Diante do exposto, os objetivos com este trabalho foram: a) determinar a marcha de acúmulo de matéria seca e nutrientes em mudas de cana-de-açúcar conduzidas em vaso com solo; b) avaliar o potencial de fornecimento de nutrientes pelo substrato contendo torta de filtro de forma a adequar a adubação de substrato e a fertirrigação para a produção de MPBs; c) estabelecer a frequência de fertirrigação na produção de MPBs, a fim de adequar a fertirrigação praticada nos viveiros; d) determinar os efeitos dos tempos de rustificação e da adubação de substrato na emissão de raízes de MPBs; e) avaliar o desempenho a campo de MPBs produzidas variando os tempos de rustificação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância da cultura da cana-de-açúcar

As commodities agrícolas têm grande relevância e influência na economia brasileira. Em 2020, a cana-de-açúcar ocupou, em faturamento, a quarta posição entre as commodities agrícolas, com geração de valor de US\$ 8,7 bilhões, sendo superada apenas pela soja, minério de ferro e petróleo bruto (Sebrae, 2022). Os principais produtos obtidos dessa cultura são açúcar, álcool etílico (etanol) e bioeletricidade, leveduras e biogás.

Embora a cana-de-açúcar tenha sido introduzida no Brasil nas primeiras décadas do século XVI, e o açúcar tenha sido seu principal produto durante um longo período, foi em 1975, com a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que o setor teve grande estímulo de crescimento. O objetivo do Proálcool foi substituir os veículos a gasolina por álcool e aumentar a utilização de energia limpa no País (Matos e Marafon, 2020). A diversificação em direção à produção de etanol trouxe a vantagem da flexibilização industrial, ou seja, a capacidade de modificar a relação de produção açúcar-etanol, transformando o Brasil no grande regulador e estabilizador do mercado de açúcar (Nastari, 2015). As vantagens ambientais fizeram do etanol um produto valioso. A utilização de veículos com motor flex-fuel (gasolina e álcool) e o papel do etanol como aditivo à gasolina devido a sua elevada octanagem, levaram a diminuição na importação de gasolina no Brasil (Santos e Castilho, 2020).

Mais recentemente, o advento de uso do bagaço, resíduo da produção agroindustrial, para cogeração de energia elétrica, trouxe outra vantagem competitiva econômica e ambiental para o setor sucroenergético. Por exemplo, a bioeletricidade gerada no período da seca aumenta a oferta de energia sem novos investimentos, economizando água que poderia ser retirada dos reservatórios nos períodos mais secos (Santos e Castilho, 2020).

No setor sucroenergético, outro resíduo da produção de etanol, a vinhaça, pode ser utilizado nas lavouras como biofertilizante, devido a sua composição rica em nutrientes como potássio, fósforo e nitrogênio (Wheeler et al., 2021; Hoarau et

al., 2018). Outro subproduto da produção de açúcar e etanol é a torta de filtro, resultante do processo de filtragem do caldo da cana-de-açúcar tratado. Esse resíduo é composto principalmente por restos de bagacilho e material mineral presente na matéria-prima, e é uma importante fonte de fósforo, cálcio, nitrogênio e ferro, além de contribuir com a adição de material orgânico ao solo.

A safra 2023/2024 apresentou recorde histórico de produção de cana-de-açúcar, com um total de aproximadamente 713 milhões de toneladas de cana processadas (Conab, 2024). Esta quantidade representa aumento de 16,8% em relação à safra 2022/2023. A área colhida também apresentou aumento de 0,5%, alcançando 8,4 milhões de hectares. A produtividade média da safra 2023/2024 (85.600 kg ha⁻¹) foi 16% maior do que a da safra 2022/2023. As condições climáticas favoráveis, especialmente no quesito pluviométrico, registradas no início do ciclo de desenvolvimento vegetativo, favoreceram o ganho de produtividade e auxiliaram na obtenção dos resultados mencionados (Conab, 2024). No entanto, cabe salientar que a produtividade média da cultura na safra 2023/2024, ano agrícola com condições climáticas bastante favoráveis a produção de cana, foi apenas 17% maior que a produtividade média obtida nos últimos 10 anos, que foi de 73.040 kg ha⁻¹ (Conab, 2024). Admitindo o potencial biológico de produção de cana-de-açúcar sugerido por Landell et al. (2005), 350.000 kg ha⁻¹ de colmos, o setor ainda tem muito a avançar.

A região sudeste concentra a maior produção de cana-de-açúcar, e na safra 2023/2024 também apresentou aumento na quantidade colhida de aproximadamente 21% em relação à safra 2022/2023, totalizando 469 milhões de toneladas. A produtividade média alcançada pela região Sudeste foi de 92.000 kg ha⁻¹ (Conab, 2024). Na safra 2005/2006, no Estado de São Paulo, principal produtor de cana-de-açúcar na região Sudeste, com 83% de produção, a produtividade média foi de 90.000 kg ha⁻¹ (Landell e Bressiani, 2008). Estes resultados indicam a necessidade de evolução no sistema produtivo de cana-de-açúcar, que deve passar pelo desenvolvimento e melhor alocação das cultivares nos ambientes de produção, aperfeiçoamento das modalidades de plantio, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, melhoria nos sistemas de colheita, e novas tecnologias e ferramentas de trabalho, como a Matriz do Terceiro Eixo.

2.2. Modalidades de plantio de cana-de-açúcar

O plantio da cana-de-açúcar pode ser feito de forma semimecanizada e mecanizada. No plantio semimecanizado, algumas operações são mecanizadas como a abertura e o fechamento dos sulcos, cobertura, aplicação de defensivos, e outras são manuais, como a colocação das mudas no sulco e o corte dos colmos. Em meados da década de 1980, os toletes chegavam até as áreas de plantio em caminhões ou carretas e a distribuição era realizada por pessoas. Porém, com a implementação da NR31, que proíbe a permanência das pessoas nos bordos dos caminhões em movimento, essa modalidade de plantio deixou de ser realizada (Santos e Borém, 2016).

Para se adequar às normas trabalhistas, a retirada dos colmos do caminhão é feita por uma carregadeira, que forma pequenos montes a uma distância que facilita a movimentação das equipes que vão distribuir e picar os colmos dentro do sulco. Nesta modalidade, utilizam-se de 12 a 14 gemas viáveis por metro linear de sulco, consumindo entre 8.000 e 12.000 kg ha⁻¹ de mudas (Santos e Borém, 2016).

No plantio mecanizado de cana picada, a abertura do sulco é concomitante com a distribuição em profundidade, a colocação do tolete e sua cobertura, reduzindo-se as perdas de água do solo por secamento do sulco. A colheita dos toletes (mudas) que abastece o plantio é feita por colhedora adaptada para o corte de mudas. O consumo de colmo nesta modalidade é de aproximadamente 12.000 a 14.000 kg ha⁻¹, utilizando-se entre 15 e 22 gemas viáveis por metro linear de sulco (Santos e Borém, 2016).

Mais recentemente, foi implementado o plantio mecanizado de mudas pré-brotadas (MPBs), no qual a máquina realiza a abertura do sulco, a adubação, o plantio e a cobertura das mudas. Neste caso, as bandejas contendo as mudas são colocadas nas plataformas das máquinas e duas pessoas realizam, por meio de uma mesa giratória, a distribuição das mudas. Para esta modalidade, o consumo de colmos é de 2.000 kg ha⁻¹ (Oliveira et al., 2018). A associação das MPBs ao sistema Meiosi (Método Inter-rotacional Ocorrendo Simultaneamente) pode garantir ganhos ainda maiores, visto que, com um hectare de mudas, é possível plantar 40 ha de linhas-mãe de MPB. Considerando que a área de Meiosi tenha uma taxa de desdobra de 1:10, após a desdobra a área plantada será de 400 ha. Ou seja, com

apenas 1 ha de mudas obtidas da matriz é possível plantar aproximadamente 400 ha.

O sistema conhecido como Meiosi foi desenvolvido por José Telles Barcelos, no início de 1980, na estação experimental do Planalsucar, em Uberlândia, com o objetivo de viabilizar o consórcio racional da cana-de-açúcar com culturas anuais e/ou adubos verdes em área de reforma e minimizar os custos de produção (Landell, 1998). Neste sistema de produção realiza-se o plantio de duas linhas de cana e deixa-se um espaço intercalar, com o objetivo de produzir nessas duas linhas mudas suficientes na própria área de renovação. Neste espaço intercalar, cria-se a possibilidade de instalar culturas que tenham ciclo compatível com a produção de mudas via Meiosi, ou seja, culturas que possam ser plantadas e colhidas durante o período do desenvolvimento da muda, tais como soja, amendoim e adubos verdes.

Nos dias atuais, nas linhas de Meiosi podem ser usadas mudas oriundas de micropropagação, MPBs, minitoletes e cana picada. Pode-se também variar o espaço intercalar entrelinhas, dependendo da época de plantio, tipo de solo e cultivar.

2.3. O sistema de produção de MPBs

A tecnologia de utilização das mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar foi desenvolvida por pesquisadores do IAC (Instituto Agrônômico). As gemas são obtidas de colmos de cana inteira produzidos em campos de plantas fornecedoras. Alguns estágios do processo estão descritos a seguir (Xavier et al., 2014).

Etapa 1: retirada dos colmos, corte e preparo dos minirrebolos

Nesta etapa, realiza-se o corte dos colmos com idade fisiológica de 6 a 10 meses de maneira a evitar danos mecânicos às gemas. Uma vez cortados, os colmos são transportados até as biofábricas, onde se inicia o processo de despalha (remoção da palha que fica aderida ao colmo) e corte dos minirrebolos, por meio de um sistema de guilhotinas com lâmina dupla. Realiza-se ainda a seleção das gemas após o corte, eliminando-se gemas que apresentem avarias.

Etapa 2: tratamento das gemas

Realiza-se a proteção fitossanitária das gemas por meio da utilização de fungicidas, e/ou inseticidas. O método utilizado para controle é a imersão em solução por três minutos. Outros tratamentos complementares, como promotores de enraizamento, podem ser usados com o objetivo de garantir a sanidade e o vigor inicial das plantas provenientes das gemas.

Etapa 3: brotação

Esta etapa do processo ocorre em substrato, e para isso, são utilizadas bandejas com quantidades de minirrebolos variáveis de acordo com a bandeja escolhida pelo produtor. Nos viveiros de produção de mudas, é comum o uso de bandejas com tubetes de pequeno volume, porque elas normalmente são mais baratas e adensadas, ou seja, em uma mesma área é possível produzir mais plantas (Lerena et al., 2006). A escolha dos recipientes usados nos viveiros pode influenciar no desenvolvimento das mudas, visto que a restrição física do sistema radicular afeta a disponibilidade de água, nutrientes e promove redução considerável na interceptação de luz (McConnughay e Bazzar, 1991).

Após o plantio dos minirrebolos, as bandejas são mantidas em casa de brotação a 32°C. O molhamento deve ser suficiente para garantir a manutenção do processo de pré-brotação. A duração desse período é variável (aproximadamente 10 dias), dependendo da cultivar, época do ano e idade fisiológica da gema.

Etapa 4: repicagem

Alguns viveiros realizam a etapa anterior em caixas e, após a etapa de brotação, fazem a separação e o transplante das mudas para as bandejas. Destaca-se que, nesta etapa, há um segundo processo de seleção em que as gemas que não brotaram são descartadas.

Etapa 5: aclimação (estufas de desenvolvimento)

As mudas permanecem em casa de vegetação por aproximadamente 20 dias. As lâminas e os turnos de irrigação são definidos de acordo com o desenvolvimento das plantas. No fim desta etapa, há uma primeira poda foliar, realizada por meio de tesouras ou podadoras que devem estar devidamente desinfetadas. Esse manejo minimiza as perdas de água.

Etapa 6: rustificação

Ocorre nas bancadas a pleno sol, para adaptar as mudas às condições de plantio no campo. Basicamente, preconiza-se o controle de irrigação com quatro turnos de rega totalizando 4 mm/dia. O manejo de podas foliares é intensificado, com três podas ao longo de 21 dias. No fim desta etapa, a muda está em condições de ser retirada do tubete e transportada para o campo. O ciclo médio de produção de MPBs é de 60 dias.

A etapa de rustificação é um conjunto de práticas operacionais adotadas durante a fase final da produção de mudas (antes da expedição), com a finalidade de aumentar a tolerância às adversidades edafoclimáticas que podem ocorrer após o transplante no campo (Lima et al., 2014), por meio do estímulo de mecanismos de defesa a estresses bióticos e abióticos (Jacobs e Landis, 2009). A aclimação promove o aumento da sobrevivência das mudas no campo (Tatagiba et al., 2007), sendo responsável pela preparação fisiológica das plantas durante e após seu plantio (Dos Santos et al., 2008). As práticas adotadas na fase de rustificação incluem manejo da adubação, irrigação e poda da parte aérea (Jacobs e Landis, 2009). No entanto, estudos que visem ajustar os manejos das MPBs aos tempos de rustificação para otimizar a adaptação e a sobrevivência das mudas após o transplante no campo precisam ser estimulados e intensificados.

2.4. Nutrição de mudas e crescimento do sistema radicular

A produtividade do canavial, entre muitos fatores, é função da qualidade das mudas e, por isso, elas precisam apresentar parte aérea e raízes bem formadas. Contudo, as raízes acabam, de maneira equivocada, recebendo menor atenção que a parte aérea. Investir em estudos que auxiliem na determinação de índices de qualidade que vão além da relação parte aérea/raiz pode auxiliar os viveiristas na condução do sistema de produção.

A arquitetura das raízes é resultado de quatro processos: divisão celular no meristema apical, responsável pelo crescimento indeterminado da raiz pela adição de novas células; alongamento celular, principal processo responsável pelo crescimento; formação de raízes laterais, que aumentam a capacidade de exploração do solo; e formação de pelos radiculares, que incrementam a superfície

de contato solo-planta (López Bucio et al., 2003). Qualquer modificação nesses processos pode causar expressivas alterações na arquitetura radicular e, conseqüentemente, modificar as relações da planta com o solo. A maior parte dos estudos com raízes de plantas que crescem em sistemas fechados está voltada para a compreensão das modificações que podem ocorrer devido ao tamanho do recipiente e a disponibilidade de nutrientes, especialmente de nitrogênio, fósforo e potássio.

As raízes laterais são mais sensíveis às variações do teor de nutrientes do que as raízes primárias (Tian et al., 2014). Estudos indicam o efeito positivo do nitrato no desenvolvimento das raízes laterais. Entretanto, as vias de sinalização de nitrato que regulam o desenvolvimento de raízes laterais são extremamente complexas, porque existem diversas vias que promovem diferenças no desenvolvimento de raízes laterais, dependendo da concentração e distribuição de nitrato no solo (Sun et al., 2017).

As plantas podem desenvolver um sistema radicular mais exploratório sob deficiência de N, devido a formação de raízes laterais mais longas (Araya et al., 2014a). No entanto, os efeitos e a magnitude provenientes da escassez de N no meio sobre a ramificação das raízes pode variar em função do estado nutricional em N da própria planta e do nível de estresse (Forde, 2014). Sob leve deficiência de N, o comprimento médio das raízes laterais foi significativamente estimulado. No entanto, quando submetido a deficiência de N severa, o comprimento total das raízes laterais diminuiu e sua formação foi ausente (Gruber et al., 2013).

A auxina é um hormônio regulador importante que contribui para o desenvolvimento da raiz em resposta ao nitrato (Forde e Lorenzo, 2001), existindo fortes conexões entre a sinalização de ambos, que juntos regulam o desenvolvimento das raízes laterais (Mounier et al., 2014). Um efeito positivo da privação moderada de N na formação de raízes laterais em *Arabidopsis* exigiu um gene de biossíntese de auxina. Sob baixo fornecimento de nitrato, a expressão do gene foi regulada positivamente, resultando em aumento nos níveis de auxina nas raízes laterais em desenvolvimento (Ma et al., 2014).

De modo semelhante ao que acontece com o N, as relações entre o P e a formação e o desenvolvimento de raízes das plantas também são complexas. A

limitação de P na forma inorgânica pode deslocar o fluxo de carboidratos prioritariamente no sentido das raízes e, conseqüentemente, aumentar a relação entre raiz e parte aérea (Wanke et al., 1998). Por outro lado, apesar do crescimento do sistema radicular ser menos afetado que a parte aérea pela limitação de P inorgânico, também pode ser verificada redução severa do comprimento da raiz principal, em condições de suficiência de P (Chen et al., 2000; Linkohr et al., 2002). O menor crescimento da raiz principal decorre da redução do tamanho final e do número de células que entram em divisão celular. O efeito do fósforo inorgânico na divisão celular é tão significativo que o número de células em divisão na raiz principal da planta *Arabidopsis thaliana* pode ser reduzido a zero, após 10 dias sem fósforo inorgânico no meio (Sanchez-Calderon et al., 2005).

A redução da divisão celular no meristema da raiz principal altera o balanço hormonal, reduzindo a dominância apical e favorecendo a iniciação de raízes laterais. Há aumento da densidade de raízes laterais nas plantas que são submetidas a deficiência de P. Quando se soma ao comprimento da raiz primária, o comprimento das raízes laterais de plantas sob limitação de fósforo inorgânico, obtém-se valor similar ao alcançado pela raiz primária sob suficiência de fósforo inorgânico, sugerindo modificação na estratégia de ocupação e exploração do solo. Raízes laterais, além de explorarem maior volume de solo, competem menos entre si devido à distância entre as mesmas (Silva e Delatorre et al., 2009).

O crescimento e o desenvolvimento ideal das raízes demanda diferentes níveis de K no solo (Leigh et al., 1984). Por exemplo, a síntese de proteínas e a atividade enzimática das células das raízes necessitam de teores adequados de K no citoplasma de maneira a manter o pH citoplasmático (Walker et al., 1998). A expansão celular na zona de alongamento necessita de pressão de turgor que se acumula através de substâncias osmoticamente ativas, incluindo K^+ (Dolan et al., 2004). Na zona de maturação radicular, os pelos radiculares crescem apicalmente através da ação dos fluxos de K^+ (Zhao et al., 2016). Além disso, mudanças adaptativas na arquitetura do sistema radicular e no desenvolvimento radicular evoluíram nas plantas, de maneira a aumentar a absorção de K^+ em condições em que há deficiência do nutriente (Wang et al., 2013).

Fica evidente, pelas informações apresentadas, que processos relacionados ao nutriente limitante ou em excesso impactam a arquitetura das raízes e, conseqüentemente, o crescimento da parte aérea (Hodge, 2004). No entanto, fatores como tipo e qualidade do substrato, tamanho do recipiente de produção, temperatura na região de crescimento das raízes, densidade das plantas na bandeja, entre outros, precisam ser considerados e, certamente, o tipo de substrato e a adubação do substrato têm papel determinante na qualidade das MPBs.

2.5. Substratos e adubação para mudas pré-brotadas

O termo substrato refere-se a qualquer material sólido, que seja natural, sintético, residual, mineral ou orgânico e que, quando colocado em um recipiente, permite a ancoragem do sistema radicular e, por conseguinte, dá sustentação para a planta (Noronha et al., 2018). O substrato pode ser utilizado puro ou em mistura com outros materiais e pode apresentar diferentes granulometrias.

O conhecimento das propriedades do substrato é importante para que ele possa ser utilizado com sucesso em cultivos distintos (De Marco et al., 2017). O cultivo em recipientes, ou seja, em espaço e volume limitados, requer manejo diferente daquele do cultivo no solo nas áreas agrícolas. O substrato participa ativamente da dinâmica dos nutrientes, por isso, é importante conhecer as propriedades físicas, químicas e biológicas de seus constituintes. Materiais inertes do substrato servem como suporte físico para o cultivo e condicionam a disponibilidade de nutrientes às plantas. No entanto, em geral, os inertes não possuem quantidades relevantes de nutrientes na composição, o que implica na necessidade de realizar adubação (Fonteno, 2007; Fermino e Kämpf, 2012).

O substrato ideal para o desenvolvimento de MPBs deve apresentar densidade (base seca) de 0,1 a 0,3 kg m⁻³, aeração de 20 a 30% e água facilmente disponível entre 30 e 40%. O índice salino deve estar entre 0,36 e 0,65 dS m⁻¹ (a 25°C), determinado pelo método de extração 1:5, ou de 0,76 a 1,25 dS m⁻¹, pelo método 1:2. O pH do substrato deve estar em torno de 5,5 a 6,5, para que não ocorra indisponibilização de nutrientes, e a CTC sugerida varia de 500 a 1.000 mmol_c dm⁻³ (Xavier et al., 2014).

Os materiais atualmente utilizados na composição de substratos são turfa, areia, casca de arroz carbonizada, vermiculita, perlita, vermicomposto (húmus de minhoca), fibra de coco, compostos orgânicos e outros (Zorzeto, 2011). A busca por substratos com grande disponibilidade local e menor custo tem sido intensificada nos últimos anos. Nesse sentido, o setor sucroenergético destaca-se pelo uso de substratos a base de resíduos da agroindústria como bagaço e torta de filtro.

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto fibroso resultante da extração do caldo de cana através da moagem. A torta de filtro é um subproduto residual da filtração do caldo no filtro rotativo do processamento industrial da cana-de-açúcar. De modo geral, ela é rica em N, P, K, Ca, Mg, S e compostos orgânicos, apresentando, em média, 1,49% de N; 1,72% de P_2O_5 ; 3,4% de K_2O ; 4,59% de Ca; 0,46% de Mg e 0,60% de S, enquanto para os micronutrientes B, Mn, Cu e Zn, os teores são 11,3; 577; 119 e 143 $mg\ kg^{-1}$ (Luz e Vitti, 2008). O P é o elemento mais estudado da torta e, de acordo com Adorna et al. (2013) a concentração varia entre 1,2 e 1,8% de P_2O_5 , dos quais 50% estão prontamente disponíveis para as plantas, e o restante será mineralizado mais lentamente (Santana et al., 2012).

Embora se admita que os materiais orgânicos tenham contribuição na nutrição de mudas no viveiro, a adubação de substrato e a fertirrigação são práticas preconizadas para o fornecimento de nutrientes às MPBs. A adubação do substrato sugerida pelas recomendações do IAC (Xavier et al., 2014) contempla, a cada 200 dm^3 de substrato, 400 g de cloreto de potássio (60% de K_2O), 460 g de nitrato de amônio (32% de N), 400 g de termofosfato magnésiano (17,5% P_2O_5 total) e 1.200 g de adubo de liberação lenta Osmocote Mini Prill® (19% N, 6% P_2O_5 e 10% K_2O). Além disso, recomenda-se que a cada semana sejam realizadas fertirrigações com fosfato monoamônico e nitrato de cálcio, nas doses de 100 gramas e 150 gramas, respectivamente, adicionadas em 10 litros de água (Xavier et al., 2014).

Os protocolos citados definiram doses, modos e frequência de aplicação de nutrientes (Xavier et al., 2014). No entanto, eles são gerais e não contemplam a diversidade de substratos que existem nos viveiros, especialmente aqueles que contêm na sua composição a torta de filtro, fonte de nutrientes, particularmente N e P, e que pode resultar em manejos de adubação diferentes dos recomendados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos cinco experimentos na região de Pradópolis, Estado de São Paulo, Brasil, com o propósito de estudar o manejo da adubação e o processo de rustificação de mudas de cana-de-açúcar. Quatro experimentos foram conduzidos em casa de vegetação (experimentos 1 a 4), e um em condições de campo (experimento 5). No experimento 1, conduzido em vasos contendo solo, foram determinadas as marchas de acúmulo de matéria seca da parte aérea e de nutrientes para MPBs das cultivares de cana-de-açúcar CTC2994, IACSP95-5094 e CTC 4. No experimento 2, conduzido em bandejas com substrato, avaliou-se o potencial de fornecimento de nutrientes pelo substrato para as três cultivares. No experimento 3 foi avaliado o efeito de formas de fertirrigação durante o ciclo de desenvolvimento das mudas das três cultivares. No experimento 4 foi feito estudo dos efeitos de doses de adubos aplicados via substrato e de tempos de rustificação no enraizamento e no crescimento da parte aérea da CTC2994 após o transplântio. No experimento 5, conduzido em campo, foi avaliado o efeito de tempos de rustificação de MPBs das três cultivares no estabelecimento e na multiplicação de mudas, usando medidas biométricas.

3.1. Experimento 1: Marcha de acúmulo de matéria seca e nutrientes em mudas de cana-de-açúcar

Foi feita coleta de solo na região de Pradópolis/SP, na camada de 0 a 0,20 m, em área de cultivo de cana-de-açúcar. O solo coletado é Latossolo Vermelho eutrófico típico textura argilosa que, após secagem ao ar, foi passado em peneira de 4 mm, homogeneizado e caracterizado seguindo métodos descritos em Raij et al. (2001), obtendo-se: pH (CaCl₂) = 5,5; MO = 33 g dm⁻³; P (resina) = 67 mg dm⁻³; K⁺ = 4,1 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 27 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 10 mmol_c dm⁻³; H+Al = 32 mmol_c dm⁻³; CTC = 73 mmol_c dm⁻³; V% = 56; S-SO₄²⁻ = 6 mg dm⁻³; Cu = 6,1 mg dm⁻³; Fe = 79 mg dm⁻³; Mn = 33,1 mg dm⁻³; Zn = 5,2 mg dm⁻³; B = 0,53 mg dm⁻³. Na análise granulométrica foram obtidos: argila = 53,90%; silte = 17,41% e areia = 28,69%.

O experimento foi conduzido de 15 de janeiro a 11 de março de 2021 em delineamento inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 3x8, com quatro repetições, combinando três cultivares de cana-de-açúcar (CTC2994, IACSP95-5094 e CTC4) e oito tempos de crescimento (7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 dias após o transplântio). A unidade experimental foi constituída por um vaso contendo 3 dm³ de solo e um minirrebolo brotado por vaso. A densidade do solo passado em peneira de 4 mm foi de 1,10 g cm⁻³. O solo foi transferido para os vasos e, em seguida, foi adicionado volume de água calculado para atingir 60% da capacidade máxima de retenção de água do solo. Em função dos resultados da análise química do solo, a calagem e a adubação não foram realizadas previamente ao transplântio dos minirrebolos.

Os colmos foram coletados de um campo de cultivo de plantas fornecedoras de material de propagação, e a partir deles foram obtidos os minirrebolos, que foram inicialmente colocados em bandejas com substrato para brotação, e 7 dias após foram transplântados para os vasos. Após o transplântio, os vasos com solo foram pesados para obtenção da massa que foi usada como referência nas irrigações. A partir do transplântio, os vasos foram pesados diariamente para reposição de água de forma a manter a umidade em 60% da capacidade máxima de retenção. Para minimizar os efeitos do ambiente no crescimento das plantas, os vasos foram submetidos à troca de posição dentro das bancadas, de forma aleatória.

Durante a condução do experimento, aplicações de soluções nutritivas foram realizadas aos 7, 21, 42 e 49 dias após o transplântio (DAT) do minirrebolo nos vasos, totalizando 225 mg dm⁻³ de N, 55 mg dm⁻³ de P, 225 mg dm⁻³ de K e 28 mg dm⁻³ de S. Os adubos usados foram sulfato de potássio, nitrato de potássio, ureia, fosfato de amônio monobásico e cloreto de potássio.

Na Figura 1, pode-se verificar as condições de temperatura e umidade na casa de vegetação durante a condução do experimento.

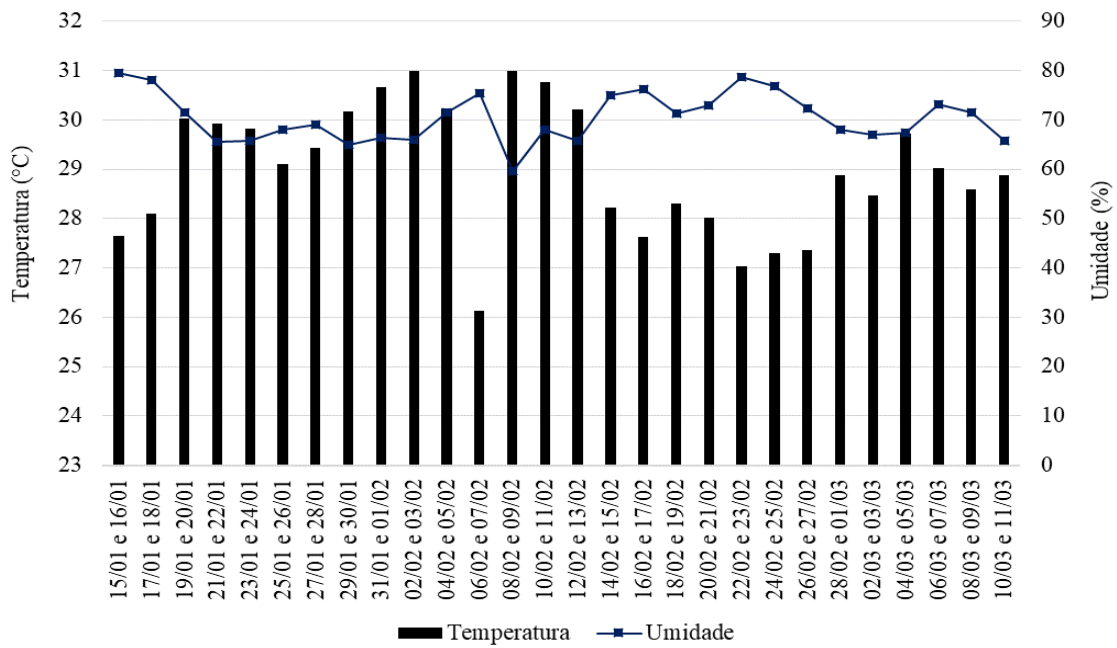


Figura 1. Média de temperatura e umidade na casa de vegetação a cada dois dias de condução do experimento 1.

O corte da parte aérea das plantas foi realizado aos 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 e 56 DAT, e o material colhido foi lavado com solução aquosa de detergente neutro 1 mL L^{-1} , seguido de enxágue com água deionizada. Após lavadas, as amostras de plantas foram secas em estufa a $65\text{-}70^\circ\text{C}$ até peso constante para obtenção da matéria seca. Na matéria seca da parte aérea, após moagem, foram determinadas as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn seguindo os métodos descritos por Carmo et al. (2000). Com os dados de matéria seca e o teor de nutrientes, foi calculado o acúmulo dos nutrientes na parte aérea.

3.2. Experimento 2: Potencial de fornecimento de nutrientes pelo substrato e adequação da adubação do substrato e da fertirrigação para produção de MPBs

O experimento foi conduzido em casa de vegetação entre 04 de abril e 21 de maio de 2022, utilizando bandejas contendo 77 células, com volume de 140 mL por célula, as quais foram preenchidas com substrato a base de bagaço de cana-de-açúcar, torta de filtro e húmus de torta de filtro, na proporção 8:1:1 (v:v:v). As características dos materiais isolados estão na Tabela 1.

Tabela 1. Carbono e nutrientes nos componentes do substrato, em base seca.

Componentes substrato	C	N	C/N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Cu	Zn	Fe
	--- g kg ⁻¹ ---			----- g kg ⁻¹ -----								
Bagaço de cana	474	4,1	116	0,3	1,0	2,0	0,6	0,4	0,08	0,009	0,019	6,9
Torta de filtro	168	17,4	10	3,2	5,6	18,0	3,4	1,5	0,58	0,054	0,126	48,5
Húmus torta de filtro	164	16,2	10	5,5	2,1	24,7	2,2	1,7	0,66	0,066	0,161	53,8

Métodos: Metais: EPA-SW-846-3051, com determinação por ICP-AES, de acordo com EPA-SW-846-6010, e potássio por fotometria de chama. Nitrogênio total: método Kjeldahl; Nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito: destilação por arraste a vapor; Carbono orgânico: digestão com dicromato e determinação volumétrica; pH, determinação em extrato aquoso na proporção 1:10 (resíduo:água), segundo métodos descritos em "Andrade, J.C.; Abreu, M.F. (editores), Análise química de resíduos sólidos para monitoramento e estudos agroambientais. Campinas, Editora IAC, 2006, 178p."

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdividas, com quatro repetições. A unidade experimental foi constituída por três bandejas com 77 células contendo 10,78 litros de substrato. Os tratamentos principais, nas parcelas, foram três formas de fornecimento de nutrientes: substrato sem adubação e sem fertirrigação; substrato com adubação e sem fertirrigação e substrato com adubação e fertirrigação. Os tratamentos secundários, nas subparcelas, foram as três cultivares, CTC2994, CTC4, IACSP95-5094, uma em cada bandeja.

A adubação do substrato foi realizada de acordo com as recomendações do IAC (Xavier et al., 2014), sendo adicionados, a cada 200 dm³ de substrato, 400 g de cloreto de potássio (60% de K₂O), 460 g de nitrato de amônio (32% de N), 400 g de termofosfato magnésiano (17,5% P₂O₅ total) e 1.200 g de adubo de liberação lenta Osmocote Mini Prill® (19% N, 6% P₂O₅ e 10% K₂O). A caracterização dos substratos sem e com adubação está na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos substratos sem e com adubação mineral.

Substrato	pH	CE	N-mineral	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn
		dS m ⁻¹	----- mg L ⁻¹ -----								
Sem adubo	5,3	1,1	37,9	15,2	126,9	92,2	60,9	31,4	0,1	0	0,3
Com adubo	5,3	6,3	765,8	12,0	597,5	357,0	147,9	70,1	0,5	1	0,1

Método de extração: 1:1,5 (Holanda). Métodos de determinação: N-(amoniacal e nitrato): destilação; P; K, Ca, Mg, S, B, Cu e Zn: ICP-OES

A irrigação foi feita com uma lâmina diária de 12 mm, parcelada em três aplicações de 4 mm, sendo que para o tratamento com fertirrigação os nutrientes foram fornecidos em uma lâmina de 4 mm, em seis dias da semana. As fontes utilizadas foram: nitrato de amônio, sulfato de magnésio, sulfato de zinco, nitrato de

cálcio, fosfato monopotássico e sulfato de magnésio heptahidratado. Na Tabela 3 tem-se a estimativa de fornecimento de nutrientes em cada tratamento, durante o ciclo de 47 dias de desenvolvimento das plantas. As condições de temperatura e umidade durante a condução do experimento em cada uma das etapas de desenvolvimento das MPBs estão na Figura 2.

Tabela 3. Estimativa da quantidade de nutrientes fornecida na adubação, ao longo de 47 dias de condução do experimento.

Elemento	Substrato	Substrato adubado	Substrato adubado fertirrigado
mg do nutriente por muda			
N	5,31	267,95	389,78
P	0,93	63,27	113,14
K	14,74	223,84	285,83
Ca	12,91	63,31	118,95
Mg	8,53	28,13	50,09
S	4,39	29,04	59,49
B	0,01	0,29	0,29
Mn	0,29	1,13	1,13
Cu	0,03	0,17	0,17
Zn	0,05	1,59	3,96
Fe	1,08	1,08	1,08

Aos 46 DAT foram feitas medidas de altura e diâmetro de 15 plantas ao acaso em cada bandeja. A altura foi obtida medindo do colo da planta até a inserção da folha completamente desenvolvida com lígula visível. O maior diâmetro do colmo foi medido a cerca de 1 cm do colo da planta. Aos 47 DAT foi feita a colheita da parte aérea e das raízes das mudas. Para as avaliações de parte aérea foram coletadas as mesmas 15 plantas por repetição usadas nas medidas de altura e diâmetro, e para as avaliações de raízes foram usadas três das quinze plantas. O procedimento de preparo das amostras, obtenção de matéria seca, determinação de teor e cálculo de acúmulo de nutrientes na parte aérea seguiu o que está descrito no experimento 1.

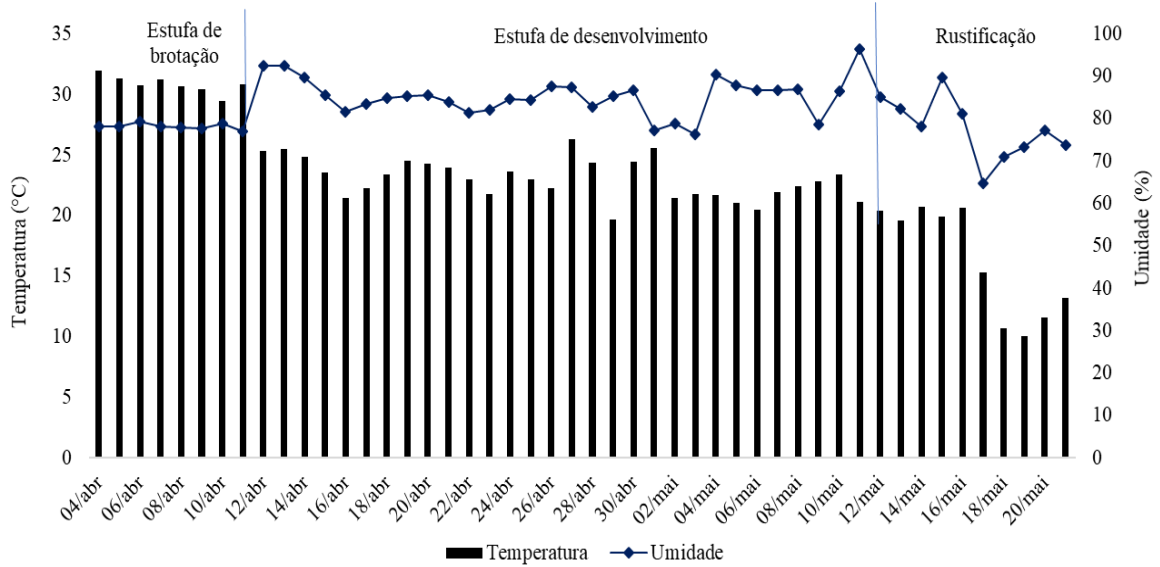


Figura 2. Temperatura e umidade durante as fases de desenvolvimento das mudas do experimento 2.

As amostras de raízes foram lavadas sobre peneiras até remoção completa do substrato e, em seguida, foram conservadas em solução de álcool etílico aproximadamente 46% e armazenadas a 4°C até que fossem feitas as determinações de área, comprimento e volume. Essas medidas foram obtidas a partir de imagens capturadas por uma câmera fotográfica digital semiprofissional, que foram editadas usando o software GiaRoots (Galkovskyi et al., 2012), conforme exemplificado na Figura 3. Depois da obtenção das imagens as amostras foram secas em estufa a 65-70°C para obtenção da matéria seca.

a)



b)

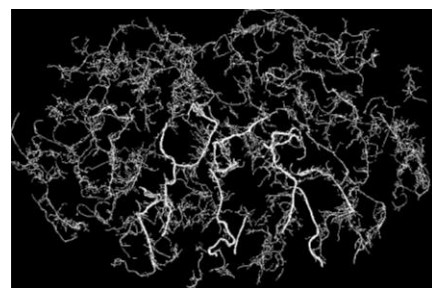


Figura 3. Sistema radicular de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. (a) imagem capturada com câmera e (b) imagem editada pelo software.

Os dados de altura da planta, diâmetro do colmo, matéria seca da parte aérea, de raízes e total foram usados para o cálculo do índice de qualidade de Dickson (Dickson et al., 1960), conforme apresentado a seguir:

$$IQD = MST / [(AP/DC) + (MSPA/MSR)]$$

Em que:

IQD = índice de qualidade de Dickson

MST = matéria seca total (parte aérea + raízes), em g/planta

AP = altura da planta, em cm

DC = diâmetro do colmo, em mm.

MSPA = matéria seca da parte aérea, em g/planta.

MSR = matéria seca de raízes, em g/planta

3.3. Experimento 3: Definição da frequência de fertirrigação para produção de MPBs

O experimento foi conduzido em casa de vegetação entre 27 de junho e 12 de agosto de 2022, utilizando o mesmo modelo de bandeja e a mesma composição do substrato do experimento 2. A adubação do substrato foi a mesma para todos os tratamentos e seguiu as recomendações do IAC (Xavier et al., 2014).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. A unidade experimental foi constituída por quatro bandejas contendo 77 células, com volume de 0,14 L, preenchidas com substrato e um minirrebolo. Os tratamentos principais, nas parcelas, foram cinco formas de fertirrigação relacionados a frequência de aplicação de solução com N, P, K, Mg, S e Zn em relação à aplicação de solução com N e Ca (Tabela 4). Os tratamentos secundários, nas subparcelas, foram as três cultivares, CTC2994, CTC4, IACSP95-5094.

Tabela 4. Descrição dos tratamentos de fertirrigação ao longo da semana.

Fertirrigação	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
4:2*	N, P, K, Mg, S, Zn	N,Ca	N, P, K, Mg, S, Zn	N, Ca	N, P, K, Mg, S, Zn	N, P, K, Mg, S, Zn	Água
3:2	N, P, K, Mg, S, Zn	N,Ca	N, P, K, Mg, S, Zn	N, Ca	N, P, K, Mg, S, Zn	Água	Água
2:2	N, P, K, Mg, S, Zn	N,Ca	Água	N, Ca	N, P, K, Mg, S, Zn	Água	Água
1:2	N, P, K, Mg, S, Zn	N,Ca	Água	N, Ca	Água	Água	Água
Sem	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água

* Fertirrigação 4:2 refere-se ao tratamento referência, com maior quantidade de nutrientes aplicada.

A irrigação foi feita com uma lâmina diária de 12 mm, parcelada em três aplicações de 4 mm, sendo que os nutrientes foram aplicados junto a irrigação (fertirrigação) somente em uma das aplicações de 4 mm, conforme tratamentos. Na Tabela 5, tem-se a estimativa de fornecimento de nutrientes por tratamento, durante o ciclo de 47 dias de desenvolvimento das plantas.

Tabela 5. Estimativa da quantidade de nutrientes fornecida em cada tratamento ao longo de 47 dias de desenvolvimento das plantas, somada à adubação de substrato.

Elemento	Sem fertirrigação	Fertirrigação 4:2	Fertirrigação 3:2	Fertirrigação 2:2	Fertirrigação 1:2
mg do nutriente por muda					
N	267,95	389,78	365,36	346,25	327,14
P	63,27	113,14	99,75	87,28	74,81
K	223,84	285,83	255,59	240,09	224,60
Ca	63,31	118,95	118,95	118,95	118,95
Mg	28,13	50,09	36,07	30,58	25,09
S	29,04	59,49	47,58	40,06	32,53
B	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Cu	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Mn	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Zn	1,59	3,96	3,35	2,75	2,14

Aos 47 DAT foi feita a colheita da parte aérea e das raízes das mudas. Quinze plantas foram coletadas por repetição para avaliação da parte aérea, e para as avaliações de raízes, foram utilizadas três dessas quinze plantas. O procedimento de preparo das amostras, obtenção de matéria seca, determinação de teor e cálculo de acúmulo de nutrientes na parte aérea seguiu o mesmo procedimento do experimento 1. Os procedimentos de lavagem, secagem,

obtenção da MSR e processamento de imagens do GiaRoots seguiram os mesmos procedimentos do experimento 2.

3.4. Experimento 4: Emissão de raízes em função de tempos de rustificação e de adubação de substrato

As mudas usadas neste experimento foram produzidas obedecendo às etapas de brotação, aclimatação e rustificação em bandejas contendo substrato, variando as doses de nutrientes usadas no substrato, em três tempos de rustificação (10, 20 e 30 dias). As adubações foram: substrato sem adubação mineral; substrato com adubação mineral completa (recomendação IAC - Xavier et al., 2014); substrato com adubação mineral equivalente a 1/3 da adubação completa e substrato com adubação mineral equivalente a 2/3 da adubação completa. Durante a aclimatação foi feita fertirrigação 1:2 (Tabela 4) em todos os tratamentos.

Na sequência, as mudas foram transplantadas para vasos com o objetivo de avaliar a emissão de novas raízes após o transplante. Os vasos para os quais as mudas foram transplantadas eram transparentes e foram revestidos com papel alumínio para evitar a entrada de luz. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na região de Pradópolis, entre 21 e 31 de março de 2023. O solo utilizado foi Latossolo Vermelho eutrófico típico textura argilosa, o mesmo empregado no experimento 1, cuja caracterização está apresentada no item 3.1.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 4x3, com quatro repetições. O primeiro fator foi composto por quatro adubações de substrato realizadas na etapa anterior (em bandejas) e o segundo fator foi representado pelos tempos de rustificação: 10, 20 e 30 dias. A cultivar de cana-de-açúcar utilizada foi a CTC2994. A unidade experimental foi constituída de um vaso contendo solo e uma MPB.

A reposição de água após o transplante foi realizada diariamente de forma a manter a umidade em 60% da capacidade máxima de retenção. Para minimizar os efeitos do ambiente no crescimento das plantas, os vasos foram submetidos à

troca de posição dentro das bancadas, de forma aleatória. Durante a condução deste experimento, não foram realizadas adubações.

Com o objetivo de verificar a emissão das raízes pelas mudas, a cada dia o papel alumínio era retirado para observação. Por isso, aos 10 DAT o experimento foi concluído, pois em todos os vasos havia raízes visíveis.

A colheita da parte aérea e das raízes emitidas a partir do limite do tubete (Figura 4) foi realizada aos 10 DAT. A parte aérea foi lavada com solução aquosa de detergente neutro 1 mL L⁻¹, seguido de enxágue com água deionizada. Após lavadas, as amostras de parte aérea foram secas em estufa a 65-70°C até as amostras atingirem massa constante. As amostras de raízes foram lavadas sobre peneiras até remoção completa do solo, conservadas em solução de álcool etílico aproximadamente 46%, em geladeira, a 4°C, até que fossem feitas as determinações de área, comprimento e volume de raízes. Essas avaliações foram realizadas a partir de imagens capturadas por uma câmera fotográfica digital semiprofissional, e em seguida, processadas usando o software GiaRoots (Galkovskyi et al., 2012). Depois da obtenção das imagens, as amostras das raízes foram secas em estufa a 65-70°C para obtenção da matéria seca.



Figura 4. Emissão de novas raízes após 10 dias de transplante das mudas em vasos.

3.5. Experimento 5: Multiplicação de MPBs, no campo, obtidas com variação nos tempos de rustificação

O experimento foi conduzido em campo, em área de reforma de cana-de-açúcar, em Meiosi, durante o período de 03 agosto de 2023 (transplântio) a 09 de fevereiro de 2024 (colheita). A área experimental está no município de Barrinha, no Estado de São Paulo, Brasil, e o solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico, de textura argilosa. As coordenadas do local do experimento são 21°13' 58" de latitude Sul e 48° 7' 91" de longitude Oeste. A amostragem de solo foi realizada na camada 0 a 0,20 m para fins de análise de fertilidade do solo. As características químicas obtidas foram: pH (CaCl₂) = 5,1; MO = 24 g dm⁻³; P (resina) = 49 mg dm⁻³; K⁺ = 1,0 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 27 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 12 mmol_c dm⁻³; H+Al = 41 mmol_c dm⁻³; CTC = 81 mmol_c dm⁻³; V% = 49. Para análise química do solo, seguiram-se os procedimentos descritos em Raij et al. (2001).

O clima da região é Aw segundo classificação de Koeppen-Geiger, ou seja, é tropical, com a estação chuvosa no verão-outono (de novembro a abril) e a estação seca no inverno-primavera (de maio a outubro). A precipitação média anual, com base em dados coletados nos últimos cinco anos, é equivalente a 806,4 milímetros. Os dados climáticos são apresentados na Figura 5. Durante a condução do experimento, o registro de precipitação foi de 668 milímetros.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em três cultivares (CTC2994, CTC4, IACSP95-5094) e três tempos de rustificação (10, 20 e 30 dias), totalizando 36 parcelas. A parcela foi composta por duas linhas-mãe de cana-de-açúcar de quatro metros, e o espaçamento entre as mudas foi de 0,50 m em cada linha-mãe, totalizando 16 plantas por parcela (2 linhas de oito plantas, área total). A área útil da parcela foi composta por 8 plantas, desprezando-se as duas plantas nas extremidades de cada linha-mãe. O espaçamento entre as duas linhas-mãe foi de 1,5 m e, entre blocos, que seria o espaçamento destinado à cultura intercalar, foi de 4,5 m. Durante o desenvolvimento das MPBs no viveiro, utilizou-se a adubação completa para substrato (recomendação IAC) e forma de fertirrigação 1:2 (experimento 3).

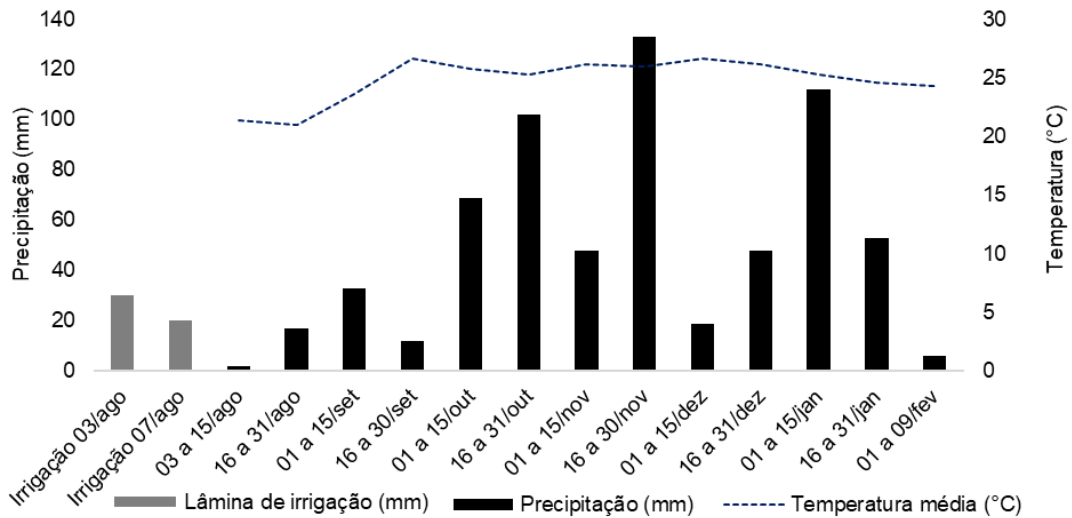


Figura 5. Precipitação e temperatura durante as quinzenas de condução do experimento 5.

Para o transplântio das MPBs foi feita abertura dos sulcos a 0,35 m, utilizando sulcador mecânico. Simultaneamente, foi feita a adubação de transplântio com 39 kg ha⁻¹ de N, 156 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e também de K₂O (650 kg ha⁻¹ da fórmula 06-24-24). O transplântio das MPBs foi realizado com matraca e, em seguida, foram aplicadas duas lâminas de irrigação para ‘pegamento’ das mudas, totalizando 50 mm. A primeira lâmina de irrigação com 30 mm foi aplicada imediatamente após o transplântio, e a segunda, com 20 mm, foi aplicada quatro dias após o transplântio.

A colheita foi realizada manualmente aos 180 DAP, cortando-se os colmos da cana-de-açúcar da área útil a aproximadamente 5 cm da base. As variáveis avaliadas foram número de perfilhos, número de gemas por colmo e altura da base ao ponto de quebra. Foi realizado o cálculo para obtenção da taxa de desdobra do experimento, seguindo a seguinte equação:

$$TD = (P \times G) / GM$$

Em que:

TD = taxa de desdobra

P = número de perfilhos por metro

G = número de gemas por colmo

GM = número de gemas por metro, desejado para o plantio (no caso, para fins de cálculo da taxa de desdobra, foram consideradas 12 de gemas por metro como referência).

3.6. Análise estatística dos dados

Os dados dos experimentos foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Para os fatores qualitativos, as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, desdobrando-se a interação dos fatores quando o F foi significativo. O programa estatístico utilizado foi o Assistat. Para o fator quantitativo, regressões lineares e quadráticas foram ajustadas, sendo adotados os modelos significativos com maior grau. O software utilizado foi o Sigmaplot.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento 1: Marcha de acúmulo de matéria seca e nutrientes em mudas de cana-de-açúcar

Houve efeito significativo de cultivares e DAT no acúmulo de matéria seca (Tabela 6), mas não houve efeito de interação. O acúmulo médio de matéria seca foi significativamente maior para as cultivares IACSP05-5094 e CTC2994 em comparação a cultivar CTC4. As curvas de acúmulo de matéria seca em função do tempo estão na Figura 6, na qual se observa que a taxa de incremento de matéria seca foi intensificada após 21 DAT para todas as cultivares. As taxas de incremento médio das cultivares entre os períodos 7 a 21 DAT e 21 a 56 DAT foram de 0,125 e 0,747 gramas por dia, respectivamente. Este resultado pode ser um importante balizador no manejo da adubação de mudas nos viveiros, sugerindo que adubações nos primeiros 21 DAT podem ser reduzidas em relação ao período subsequente.

As curvas de acúmulo de matéria seca não estabilizaram até os 56 DAT, tendo em vista que foi avaliada apenas a fase inicial de crescimento, e as avaliações foram encerradas aos 56 DAT porque esse é o tempo médio de desenvolvimento de MPBs em casa de vegetação. As cultivares IACSP95-5094, CTC2994 e CTC4 encerraram o ciclo de desenvolvimento com acúmulos de matéria seca de 30,68; 29,08 e 25,82 gramas por planta (Figura 6). Os acúmulos de matéria seca obtidos neste trabalho estão acima dos observados aos 63 dias por Figueirêdo et al. (2020), para a cultivares CTC4 e SP80-181. Os valores

verificados por esses autores foram 3,23 e 6,24 gramas por planta para CTC4 e SP80-181, respectivamente. Esta diferença nos resultados pode ser atribuída ao fato de que, nos estudos de Figueirêdo et al. (2020), foi utilizado solo de textura arenosa com baixa fertilidade e não houve adubações durante o ciclo e, no presente caso, foi usado Latossolo Vermelho eutrófico típico textura argilosa de alta fertilidade, e foram feitas adubações.

Tabela 6. Efeitos das cultivares e dos dias após o transplântio no acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S e matéria seca da parte aérea das plantas.

	Matéria seca (g/planta)	N	P	K ¹ (mg/planta)	Ca	Mg ¹	S
Cultivares							
CTC2994	11,09 a	181,15 a	22,24 ab	264,20 a	29,05 ab	31,23 a	5,55 a
CTC4	9,17 b	154,10 b	20,65 b	234,51 b	28,32 b	26,32 b	4,41 b
IACSP95-5094	11,30 a	200,23 a	25,07 a	281,11 a	35,19 a	32,05 a	5,62 a
Dias após o transplântio (DAT)							
7	0,62	14,74	2,57	-	3,35	-	0,35
14	1,45	32,22	4,80	35,53	5,38	4,50	0,98
21	2,37	50,57	6,75	58,60	8,35	6,16	1,64
28	6,22	121,88	16,74	153,51	18,88	15,28	4,37
35	9,48	160,20	21,09	212,81	26,20	21,65	4,60
42	14,63	231,98	31,92	323,61	42,92	35,85	4,37
49	20,85	334,28	44,42	452,77	63,08	53,05	8,48
56	28,53	482,05	52,92	582,77	78,66	72,59	16,74
Teste F							
Cultivares (C)	8,70**	12,08**	5,49**	10,36**	5,27**	5,09**	7,22**
Tempo (T)	212,53**	184,81**	129,23**	151,07**	182,23**	119,08**	106,12**
Interação (CxT)	0,51ns	1,09ns	0,77ns	1,05ns	0,69ns	0,50ns	1,73ns
CV%	17,47	8,88	13,16	8,04	11,19	18,27	20,41

¹ A massa de amostra obtida foi insuficiente para as determinações de K e Mg

² NS – Não Significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade

Os dados para as variáveis matéria seca, N, P, K, Ca, Mg e S foram transformados por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda=0,15$

O acúmulo de todos os macronutrientes na parte aérea das mudas aumentou com o tempo e houve diferenças entre as cultivares (Tabela 6). As cultivares IACSP95-5094 e CTC2994 apresentaram maiores acúmulos médios por planta de N, K, Mg e S em relação a CTC4. Além disso, o acúmulo médio de P e Ca por planta verificado para a IACSP95-5094 foi maior do que para a cultivar CTC4, não diferindo da CTC2994.

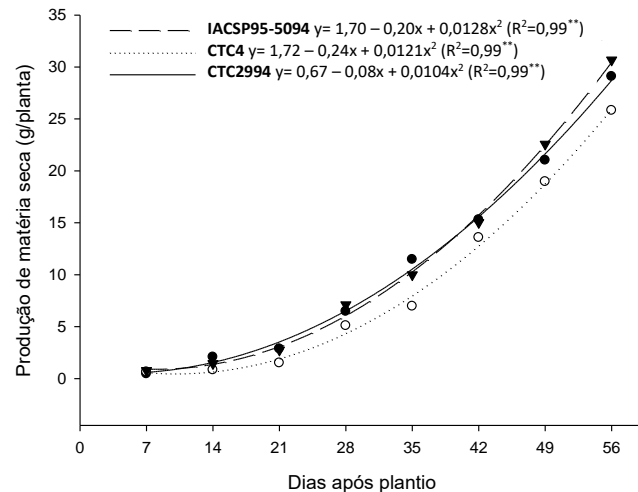


Figura 6. Marcha de acúmulo de matéria seca ao longo dos dias de transplântio do minirrebolo.

A partir das curvas de acúmulo de nutrientes em função do tempo (Figura 7) foi possível verificar que, embora no teste de comparação de médias não tenha sido observada diferença entre as cultivares, a IACSP95-5094, a partir de 42 DAT, tendeu a acumular mais N e Ca, e aos 56 DAT a diferença em relação à média das CTCs foi de 139 e 22 mg/planta, respectivamente. Os acúmulos finais de N, P, K, Ca, Mg e S para a cultivar IACSP95-5094 foram 575; 58; 641; 92; 82 e 20 mg/planta, respectivamente. Para a cultivar CTC2994, os acúmulos finais foram de 456; 51; 557; 70; 71 e 16 mg/planta e, para a cultivar CTC4, os acúmulos finais foram 415; 49; 550; 73; 65 e 14 mg/planta, considerando a mesma sequência de nutrientes.

Os acúmulos finais de nutrientes seguiram a seguinte ordem decrescente $K > N > Ca > Mg > P > S$ para as cultivares IACSP95-5094 e CTC4. Para a cultivar CTC2994 houve inversão na sequência entre Ca e Mg, obtendo-se $K > N > Mg > Ca > P > S$. Oliveira et al. (2011) trabalharam com onze cultivares de cana-de-açúcar em sistema irrigado e constataram a seguinte ordem decrescente de extração $K > Ca > N > P > Mg$. Segundo Castro (2016), as exigências da cana-de-açúcar em K e N são maiores do que as do P, sendo K e N elementos chave para a produção da biomassa. Por isso, eles devem ser fornecidos, desde o início do desenvolvimento das plantas, em doses maiores.

Os maiores acúmulos de nutrientes observados para a IACSP95-5094 se devem ao fato dela ser uma cultivar de maior demanda de nutrientes e com expectativa de produtividade elevada, ou seja, trata-se de um material genético que

tem resposta muito boa a condições de alta fertilidade, e não se adapta a ambientes mais restritivos. Segundo dados da Assocana (2020), a IACSP95-5094 desenvolve-se bem em solos de elevada fertilidade e pode atingir produtividades médias de 120 t ha^{-1} nos dois primeiros cortes. Por isso, à medida que as plantas desta cultivar foram crescendo, elas foram tendendo a acumular mais nutrientes em relação às CTCs.

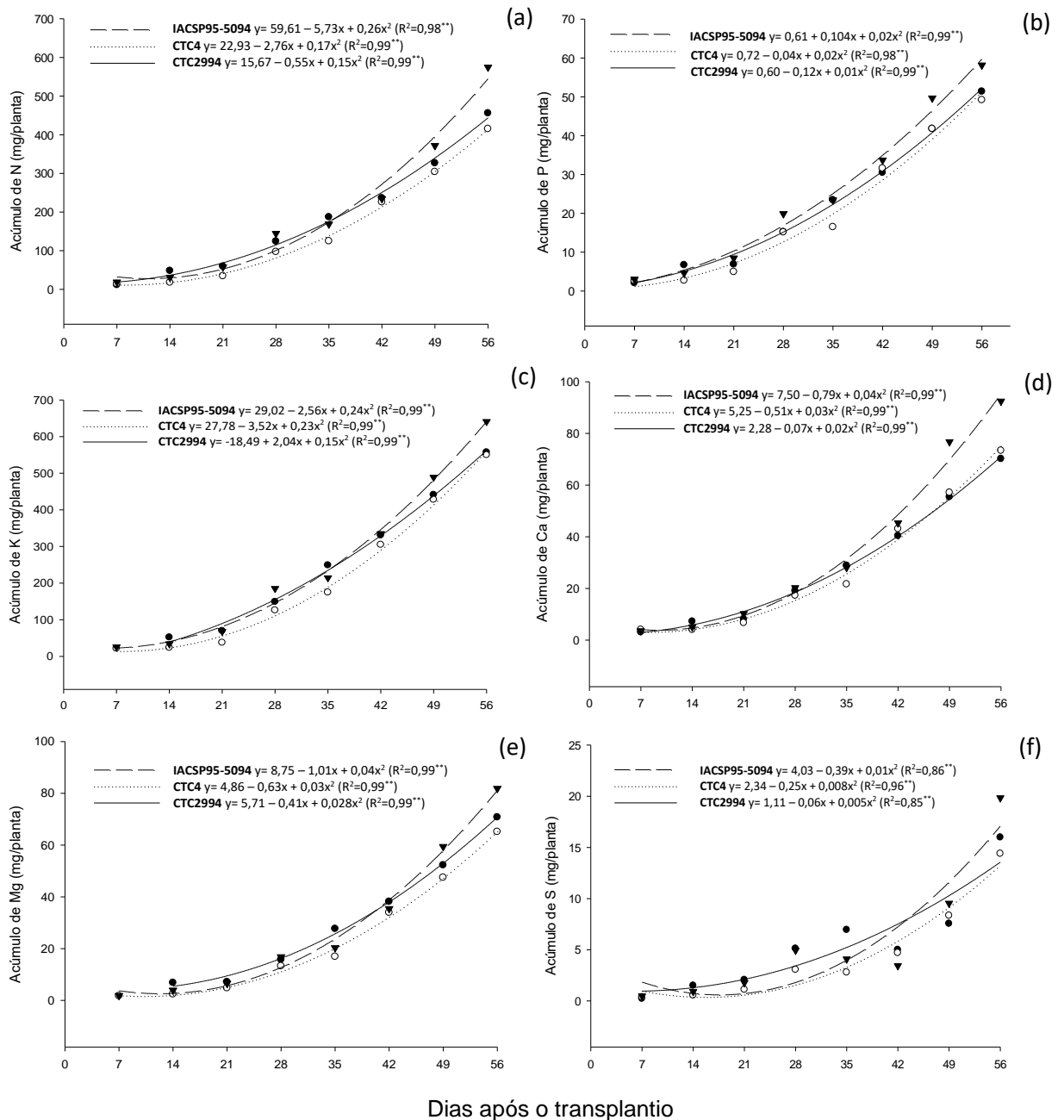


Figura 7. Marcha de absorção dos macronutrientes primários e secundários sendo (a) nitrogênio; (b): fósforo; (c) potássio; (d) cálcio; (e) magnésio e (f) enxofre

Houve efeito significativo para DAT no acúmulo de todos os micronutrientes (Tabela 7). Observou-se ainda que houve efeito significativo para as cultivares, com exceção do Cu. A partir das curvas de acúmulo de micronutrientes em função do tempo (Figura 8), foi possível verificar que, embora no teste F não tenha sido observada diferença entre as cultivares para o acúmulo de Fe, em especial, a partir dos 35 DAT a CTC4 apresentou os menores acúmulos para estes elementos.

Tabela 7. Efeitos das cultivares e dos dias após o transplântio no acúmulo dos micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn.

	B	Cu	Fe	Mn	Zn
----- (mg/planta) -----					
Cultivares					
CTC2994	0,127 a	0,041 a	0,280 a	0,687 ab	0,251 b
CTC4	0,076 b	0,036 a	0,234 a	0,626 b	0,210 c
IACSP95-5094	0,110 a	0,040 a	0,284 a	0,818 a	0,356 a
Dias após o transplântio (DAT)					
7	-	0,005	0,027	0,031	0,019
14	0,024	0,008	0,047	0,086	0,045
21	0,044	0,015	0,070	0,140	0,071
28	0,074	0,027	0,190	0,406	0,182
35	0,083	0,037	0,215	0,572	0,236
42	0,118	0,057	0,372	0,902	0,358
49	0,171	0,078	0,519	1,489	0,536
56	0,222	0,086	0,687	2,057	0,733
Teste F					
Cultivares (C)	13,56**	1,71ns	3,62*	7,70**	29,92**
Tempo (T)	51,84**	90,55**	112,57**	159,14**	177,56**
Interação (CxT)	4,09**	1,75ns	0,88ns	0,62ns	2,05*
CV%	15,57	29,28	27,35	12,29	20,24

NS – Não Significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade

Os dados para as variáveis B foram transformados por meio da raiz; para o Fe foram transformados por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda = 0,15$; para o Mn foi utilizada a raiz cubica e para Zn a transformação foi por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda = -1$

Os acúmulos para os elementos Mn e Zn apresentaram padrões de resposta semelhantes entre si, sendo que aos 21 DAT a cultivar IACSP95-5094 incrementou substancialmente a taxa de acúmulo destes nutrientes, enquanto a CTC4 teve os menores acúmulos (Figura 8). Os acúmulos finais de Mn e Zn para a cultivar IACSP95-5094 foram 2,33 e 1,01 mg por planta, respectivamente. Para a cultivar CTC2994, os acúmulos ao final do ciclo, desses mesmos nutrientes, foram de 2,00 e 0,62 mg por planta e, para a cultivar CTC4, os acúmulos finais foram 1,84 e 0,56 mg por planta de Mn e Zn, respectivamente. No caso do B, o padrão de resposta das cultivares foi alterado em relação aos demais micronutrientes estudados, isto

é, a CTC2994 apresentou o maior acúmulo final do nutriente, seguida pela IACSP95-5094 e pela CTC4, respectivamente.

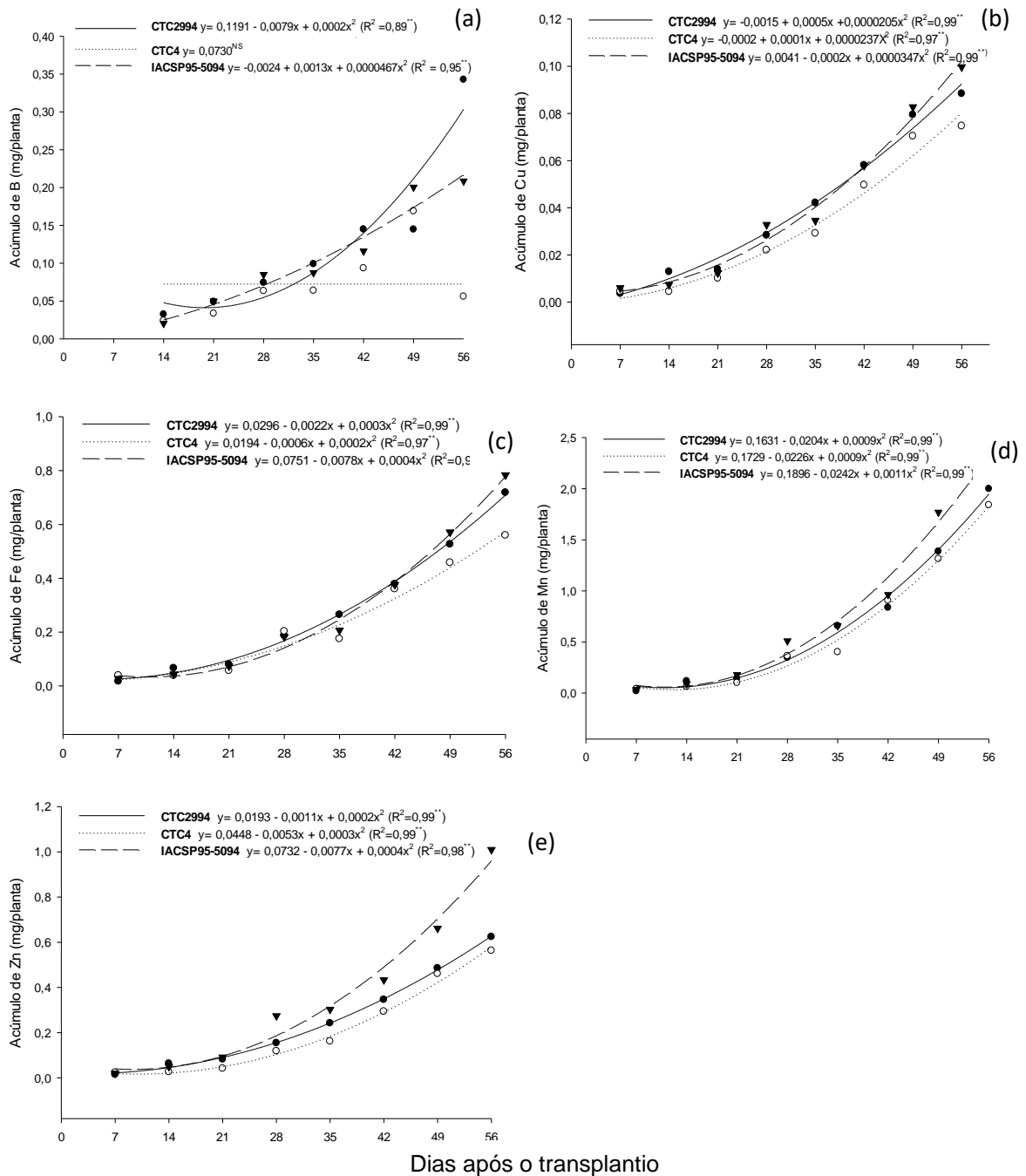


Figura 8. Marcha de absorção dos micronutrientes sendo (a) boro; (b): cobre; (c) ferro; (d) manganês e (e) zinco.

A exportação de micronutrientes pela cana-de-açúcar conduzida em campo segue geralmente a seguinte ordem: $Fe > Mn > Zn > Cu > B > Mo$, tanto para a cana-planta quanto para a cana-soca (Orlando Filho et al., 2001). No caso do Fe,

a maior extração é devida a grande abundância do nutriente nos solos do Brasil. Os acúmulos finais de nutrientes neste experimento seguiram a ordem Mn>Fe>Zn>B>Cu para as cultivares CTC2994 e CTC4. Para a cultivar IACSP95-5094 houve inversão na sequência entre Zn e Fe, obtendo-se Mn>Zn>Fe>B>Cu. As diferenças observadas nos acúmulos de micronutrientes nesse experimento, em relação a literatura, podem estar relacionadas ao tempo de avaliação (56 dias e 12 meses) e ao uso de cultivares mais modernas no presente experimento.

Na literatura há poucas informações sobre o potencial de acúmulo de matéria seca e nutrientes por mudas de cana-de-açúcar, diferenciando cultivares, principalmente porque a tecnologia de produção de MPBs é recente. No entanto, esse conhecimento é fundamental para orientar como deve ser feito o fornecimento de nutrientes nos sistemas de produção em bandejas, usando substratos orgânicos.

A avaliação das MPBs em vasos com volume 20 vezes maior que a célula da bandeja de produção de mudas e, portanto, sem limitação de crescimento, indicou que o potencial de crescimento das plantas jovens de cana é maior no vaso, e há diferença entre materiais genéticos. Comparando os acúmulos de nutrientes com o fornecimento via adubação usada em sistema de produção comercial de MPBs, conforme Tabela 3, verifica-se que o fornecimento via adubação está muito acima para a maior parte dos nutrientes. Para ajustar o fornecimento em relação à demanda das mudas foi feito o experimento 2.

4.2. Experimento 2: Potencial de fornecimento de nutrientes pelo substrato e adequação da adubação do substrato e da fertirrigação para produção de MPBs

Houve efeitos dos fatores cultivares (C), formas de fornecimento de nutrientes (F) e da interação CxF na produção de matéria seca da parte aérea e acúmulos de macronutrientes das MPBs (Tabela 8). Os acúmulos dos micronutrientes Cu, Fe e Zn foram diferentes dependendo das cultivares, das formas de fornecimento de nutrientes e da interação (Tabela 9). Os nutrientes B e Mn somente foram influenciados pelos fatores de forma isolada, sendo obtidos

maiores acúmulos para a cultivar IACSP95-5094 e para substrato adubado e fertirrigado.

Tabela 8. Efeitos das formas de fornecimento de nutrientes na matéria seca da parte aérea e no acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S nas cultivares CTC2994, CTC4 e IACSP95-5094.

	Matéria seca (g/planta)	N	P	K	Ca	Mg	S
Cultivares							
CTC2994	1,38	25,73	5,02	34,54	3,09	3,32	2,39
CTC4	1,26	23,00	6,01	35,24	3,27	3,47	2,13
IACSP95-5094	2,47	42,03	11,16	64,68	5,26	6,05	4,65
CV%	13,21	5,50	16,95	5,30	11,74	12,50	18,63
Formas de fornecimento de nutrientes							
Substrato adubado e fertirrigado	2,35	49,48	14,70	67,49	5,62	6,30	5,75
Substrato adubado	1,73	30,05	5,1	49,28	3,53	3,92	2,95
Substrato	1,03	10,83	2,35	17,70	2,48	2,62	0,47
CV%	14,34	5,50	21,43	5,42	12,19	13,12	22,62
Teste F							
Cultivares (C)	105,48**	39,62**	82,86**	56,18**	83,74**	97,77**	70,69**
Fornecimento (F)	87,34**	290,54**	199,65**	210,19**	138,64**	132,24**	175,44**
Interação (CxF)	17,67**	7,17**	43,15**	3,61*	21,87**	28,11**	26,38**
Média	1,71	30,25	7,40	44,82	3,88	4,28	3,06

NS – não significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade.

Os dados para as variáveis N e K foram transformados por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda = 0,15$

A matéria seca e os acúmulos de macronutrientes e micronutrientes pela IACSP95-5094 foram maiores no substrato adubado e fertirrigado, seguido por substrato adubado, e os menores valores foram observados nas plantas que cresceram apenas no substrato (Tabelas 8 e 9). Para Mn e Zn não houve diferença entre os tratamentos substrato adubado e somente substrato. Considerando como referência os acúmulos de nutrientes obtidos no substrato adubado e fertirrigado, observa-se pela Figura 9 que os nutrientes K, Ca, Mg, B, Fe e Mn tiveram seus percentuais acumulados nas condições substrato e/ou substrato adubado acima dos percentuais da fertirrigação. A fertirrigação forneceu 39, 65, 49, 73 e 78% do N, P, S, Cu e Zn, respectivamente.

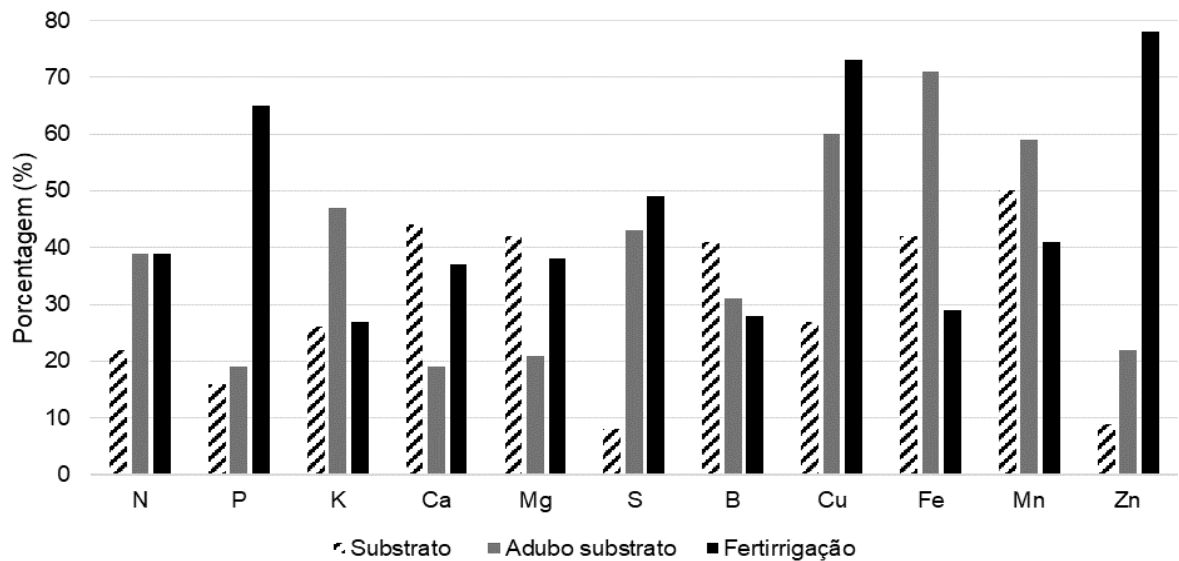


Figura 9. Fornecimento de nutrientes acumulados nas plantas que cresceram no substrato sem adubação, com adubação, e com adubação e fertirrigação, em relação aos acúmulos calculados no experimento 1

As cultivares CTC4 e CTC2994 apresentaram o mesmo padrão de resposta de acúmulo de matéria seca e nutrientes em função da adubação, ou seja, a matéria seca e os acúmulos de K, Cu e Fe para ambas as cultivares foram maiores para o substrato adubado e o substrato adubado e fertirrigado, em comparação ao substrato sem adubação. Os acúmulos de N e S foram maiores no substrato adubado e fertirrigado, seguido por substrato adubado e, por último, substrato sem adubação. Os acúmulos de P, Ca, Mg e Zn foram maiores no substrato adubado e fertirrigado, em comparação ao substrato adubado e ao substrato sem adubo (Tabela 10). Desse modo, o substrato sem adubação foi insuficiente para atender à demanda das MPBs, independentemente da cultivar. Gazola et al. (2017), também indicaram que os tratamentos que receberam adubação mineral na mistura dos substratos apresentaram mudas da cultivar CTC9001 com maior MSPA, possivelmente, porque a torta de filtro não garantiu o suprimento de todos os nutrientes necessários para o máximo desenvolvimento das mudas, necessitando suplementação com fertilizantes industriais.

Tabela 9. Efeitos das formas de fornecimento de nutrientes no acúmulo de micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn nas cultivares CTC2994, CTC4 e IACSP95-5094.

	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- (mg/planta) -----				
Cultivares					
CTC2994	0,022 b	0,008 b	0,128 b	0,095 b	0,051 b
CTC4	0,020 b	0,007 b	0,101 c	0,103 b	0,052 b
IACSP95-5094	0,040 a	0,014 a	0,201 a	0,180 a	0,111 a
CV%	6,47	20,44	13,69	17,01	14,86
Dias após o transplântio (DAT)					
Substrato adubado e fertirrigado	0,039 a	0,015 a	0,202 a	0,181 a	0,163 a
Substrato adubado	0,028 b	0,009 b	0,143 b	0,107 b	0,036 b
Substrato	0,016 c	0,004 c	0,085 c	0,090 b	0,014 b
CV%	6,08	19,92	14,56	16,57	27,25
Teste F2					
Cultivares (C)	20,54**	40,90**	83,74**	57,79**	127,15**
Fornecimento (F)	25,83**	93,87**	93,42**	64,98**	206,29**
Interação (Cx F)	0,90ns	13,91**	22,85**	2,43ns	85,49**
Média	0,028	0,010	0,143	0,126	0,071

NS – Não significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade

Os dados de acúmulo de Fe foram transformados por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda = 0,15$; para o Mn foi utilizada a raiz cúbica, para o Zn a transformação foi por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda = -1$ e para o B a transformação foi por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda = 0,4$

As cultivares avaliadas diferem em exigências nutricionais e a diferença se manifesta na fase de produção de mudas. A cultivar IACSP95-5094, que apresentou maior resposta à adubação e fertirrigação do substrato, tem se mostrado, em condições de campo, responsiva a fertilidade do solo, apresentando elevadas produtividades, especialmente em ambientes de produção favoráveis (Assocana, 2020). A CTC2994 e a CTC4 apresentaram resposta semelhante à adubação na fase de mudas, mas em condições de campo, a CTC2994 é indicada para ambientes de produção de média e alta fertilidade (Bula CTC2994, 2022), enquanto a CTC4 é mais recomendada para ambientes de produção mais restritivos (Bula CTC4, 2018).

Em relação ao fornecimento de nutrientes, observou-se que a cultivar IACSP95-5094 apresentou os maiores valores médios de matéria seca da parte aérea nos substratos adubado e adubado e fertirrigado. No substrato sem adubação, a produção de matéria seca da cultivar IACSP95-5094 não diferiu da CTC2994 (Tabela 10). Padrões de resposta semelhantes foram verificados para os acúmulos de N, P, Ca, Mg, S, Cu e Zn, com exceção da cultivar IACSP95-5094, na condição de ausência de adubação de substrato, que não se diferenciou das demais cultivares. Para o acúmulo de K, a cultivar IACSP95-5094 diferiu das duas cultivares desenvolvidas pelo CTC, independentemente da forma de fornecimento

do nutriente. Para o Fe, a cultivar IACSP95-5094 apresentou o maior acúmulo quando comparada a CTC4, independentemente do fornecimento de nutrientes. No entanto, na condição de substrato adubado e somente substrato, não houve diferença entre a cultivares IACSP95-5094 e CTC2994.

Tabela 10. Desdobramentos das interações significativas entre os manejos de adubação e as cultivares para a produção de matéria seca da parte aérea e acúmulo de nutrientes N, P, K, Ca, Mg e S.

	CTC2994	CTC4	IACSP95-5094
Matéria seca da parte aérea (g/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	1,74 aB	1,61 aB	3,71 aA
Substrato adubado	1,45 aB	1,34 aB	2,40 bA
Substrato	0,95 bAB	0,84 bB	1,31 cA
N (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	38,71 aB	34,16 aB	75,57 aA
Substrato adubado	27,74 bB	25,54 bB	38,08 bA
Substrato	10,73 cA	9,31 cA	12,43 cA
P (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	9,33 aB	10,94 aB	23,81 aA
Substrato adubado	3,87 bB	4,24 bB	7,31 bA
Substrato	1,84 bA	2,84 bA	2,35 cA
K (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	48,79 aB	49,22 aB	104,45 aA
Substrato adubado	39,19 aB	42,14 aB	66,51 bA
Substrato	15,64 bB	14,37 bB	23,10 cA
Ca (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	4,30 aB	4,28 aB	8,28 aA
Substrato adubado	2,81 bB	2,98 bB	4,80 bA
Substrato	2,18 bA	2,55 bA	2,71 cA
Mg (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	4,35 aB	4,66 aB	9,89 aA
Substrato adubado	3,22 bB	3,30 bB	5,25 bA
Substrato	2,39 bA	2,43 bA	3,02 cA
S (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	4,28aB	3,70 aB	9,26 aA
Substrato adubado	2,60 bB	2,39 bB	3,86 bA
Substrato	0,30 cA	0,30 cA	0,81 cA
Cu (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	0,011 aB	0,010 aB	0,024 aA
Substrato adubado	0,009 aB	0,007 aB	0,012 bA
Substrato	0,005 bA	0,003 bA	0,005 cA
Fe (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	0,158 aB	0,125 aB	0,322 aA
Substrato adubado	0,141 aAB	0,117 aB	0,172 bA
Substrato	0,085 bAB	0,061 bB	0,110 cA
Zn (mg/planta)			
Substrato adubado e fertirrigado	0,111 aB	0,110 aB	0,267 aA
Substrato adubado	0,029 bB	0,032 bAB	0,048 bA
Substrato	0,012 bA	0,013 bA	0,016 bA

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna, e maiúscula na linha, indicam que as mesmas não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Admitindo como referência os acúmulos de nutrientes obtidos no experimento 1 (Tabela 6), o substrato composto por bagaço de cana, torta de filtro e húmus forneceu às mudas 2, 2, 3, 20, 16, 52, 6, 19, 39, 9 e 208% do N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn, Cu, Zn e Fe, respectivamente (Tabela 11). A torta de filtro e o húmus presentes no substrato foram fontes importantes de Ca, Mg, Mn, Cu e especialmente, de S e Fe, conforme Tabelas 1 e 2. A torta de filtro é um substrato orgânico, que apresenta em sua composição 1,49% de N; 1,72% de P_2O_5 , 3,4% de K_2O ; 4,59% de Ca; 0,46% de Mg e 0,60% de S, enquanto para os micronutrientes B, Mn, Cu e Zn, os teores são 11,3; 577; 119 e 143 $mg\ kg^{-1}$ (Luz e Vitti, 2008). No entanto, a maior parte dos nutrientes não estão prontamente disponíveis às plantas e precisam passar por processos de mineralização. Por isso, a suplementação com fertilizantes minerais, e a disponibilização dos nutrientes na quantidade necessária ao longo dos estágios de crescimento das plantas, proporcionando adequado desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, é necessária.

No tratamento em que as mudas cresceram em substrato adubado, os fornecimentos de P, Ca, S, B, Cu, Zn e Fe foram atendidos (Tabela 11), pois o suprimento desses nutrientes pelo substrato adubado foi maior que o obtido na marcha de absorção. Somou-se a isso, o fato de que dentro dos seis macronutrientes, o P e o S foram o penúltimo e o último, respectivamente, mais exigidos pelas plantas de cana-de-açúcar, conforme obtido no experimento 1. Ainda para este tratamento, observou-se que 81, 49, 53 e 76 % do N, K, Mg e Mn acumulados na marcha de absorção foram atendidos pelo substrato mais adubação (Tabela 11). O suprimento de N e K proporcionado pelo substrato adubado, abaixo do verificado na marcha de absorção, pode estar relacionado às maiores exigências destes nutrientes pelas plantas, conforme verificado no experimento 1. Em relação ao Mg e Mn, as quantidades fornecidas via termofosfato magnésiano não foram suficientes ao longo do ciclo de desenvolvimento das mudas, indicando a necessidade de suplementação via fertirrigação, especialmente para atender à exigência das MPBs em N, K, Mg e Mn. A quantidade de nutrientes fornecida às plantas a partir do substrato adubado foi capaz de atender as exigências de todos os macronutrientes até os 35 DAT (Tabela 6), conforme determinado no experimento 1, indicando que a suplementação com fertirrigação nas condições

deste experimento devem ocorrer após esse período. Os micronutrientes são atendidos via adubação de substrato, exceto o Mn, que deve ser suplementado pela fertirrigação a partir dos 42 DAT.

Tabela 11. Contribuição nutricional do substrato, da adubação do substrato e da fertirrigação tendo o acúmulo de nutrientes do experimento de marcha de absorção como referência.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Mn	Cu	Zn	Fe
	----- % -----										
Substrato	2	2	3	20	16	52	6	19	39	9	208
Substrato adubado	81	142	49	100	53	342	169	76	219	296	208
Substrato adubado e fertirrigado	117	254	63	188	94	700	169	76	219	738	208

O tratamento que recebeu os maiores fornecimentos de nutrientes (substrato adubado e fertirrigação) disponibilizou para as mudas quantidades de N, P, Ca, S, B, Cu, Zn e Fe maiores em relação à extração observada no experimento 1 (Tabela 3), mas, ao mesmo tempo, atendeu a 94% e 76% da exigência de Mg e Mn das MPBs, e apenas 63% do K acumulado pelas mudas cultivadas no solo (Tabela 11). Como as mudas não manifestaram, visualmente, limitações de crescimento que pudessem ser associadas à falta de K, admite-se que, nas condições do vaso, houve “consumo de luxo” (Reis Junior, 2001), frequentemente relatado para esse nutriente.

Frente aos resultados, entende-se que a fertirrigação deve ser reavaliada, no sentido de disponibilizar às plantas apenas o necessário para atender à sua exigência em K, Mg e Mn. No entanto, os padrões de resposta ao fornecimento de nutrientes por cultivares de cana-de-açúcar devem considerar atributos de crescimento relacionados a parte aérea, acúmulo de nutrientes e raízes.

Considerando as raízes das mudas, houve diferença entre cultivares na área, comprimento e volume, mas não na matéria seca (Tabela 12). A área e o comprimento de raízes foram maiores para a cultivar IACSP95-5094 em comparação às cultivares CTC2994 e CTC4 independentemente da forma de fornecimento de nutrientes. O volume de raízes foi significativamente maior para a cultivar IACSP95-5094 comparado a CTC4, sendo que essa última não diferiu da cultivar CTC2994.

Tabela 12. Efeitos das formas de fornecimento de nutrientes e de cultivares nas características do sistema radicular de MPBs de cana-de-açúcar.

	MSR (g/planta)	Área (cm²)	Comprimento (cm)	Volume (cm³)
Cultivares				
CTC2994	0,26 a	265,80 b	4442,67 b	21,75 ab
CTC4	0,26 a	266,57 b	4457,87 b	20,98 b
IACSP95-5094	0,32 a	364,06 a	6509,95 a	27,32 a
CV%	23,20	18,65	22,77	23,01
Formas de fornecimento de nutrientes				
Substrato adubado e fertirrigado	0,24 a	246,92 b	3893,37 b	20,54 a
Substrato adubado	0,30 a	318,64 a	5860,97 a	24,24 a
Substrato	0,29 a	330,88 a	5656,15 a	25,27 a
CV%	21,74	16,58	22,03	22,84
Teste F				
Cultivares (C)	3,46ns	12,34**	12,40**	4,98*
Fornecimento (F)	3,24ns	10,06**	10,96**	2,62ns
Interação (CxF)	2,76ns	2,50ns	2,14ns	1,91ns
Média	0,28	298,81	5136,83	23,35

NS – Não Significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade

Houve efeito das formas de fornecimento de nutrientes na área e no comprimento de raízes, não ocorrendo influência na matéria seca e no volume, e as interações não foram significativas (Tabela 12). Os menores valores de área e comprimento de raízes foram obtidos quando o substrato foi adubado e fertirrigado. As diminuições observadas na área de raízes foram de 25,4 e 22,5% em relação ao substrato não adubado e ao substrato adubado, respectivamente, e no comprimento de raízes, foram de 31,2 e 33,6%, respectivamente. Este resultado pode estar relacionado com os mecanismos de respostas das raízes, que ao se desenvolverem em ambiente com elevados teores de nutrientes, não são estimuladas ao crescimento. Mello (2018), em estudos com MPB e adubação fosfatada e nitrogenada, observou menor área de raízes nos tratamentos adubados com P e N do que nos tratamentos não adubados. Embora se admita que a proliferação de raízes seja estimulada quando elas encontram regiões ricas em nutrientes (Drew, 1975), em alguns casos, sob condição de excesso, há a possibilidade de ocorrência de efeito inverso. Estudos de Araya et al. (2014a) indicam que há maior desenvolvimento do sistema radicular sob deficiência de N, devido a formação de raízes laterais mais longas. No entanto, a magnitude deste efeito pode variar em função do estado nutricional em N da planta e do nível de estresse (Forde, 2014).

Embora não tenham sido observadas diferenças na matéria seca e no volume de raízes entre as formas de fornecimento de nutrientes, os registros fotográficos, obtidos por meio do auxílio do software GiaRoots, permitiram identificar diferenças na qualidade das raízes (Figura 10). O fornecimento de nutrientes via substrato adubado e fertirrigado proporcionou maior formação de raízes finas na cultivar IACSP95-5094. A CTC4 foi a que apresentou padrão de resposta mais evidente na redução de raízes conforme a oferta de nutrientes aumentou, enquanto a cultivar CTC2994 teve padrão de resposta intermediário. Na pesquisa conduzida por Rogers e Benfey (2015) foi observado que a arquitetura do sistema radicular se modifica de acordo com as condições nutricionais e com os perfis genéticos, dependendo da espécie, e baixos teores de P resultam na inibição das raízes primárias, mas promovem aumento nas raízes laterais, nos pelos radiculares e na formação do sistema radicular. Os baixos teores de N promovem aumento nas raízes verticais e profundas, mas levam a diminuição no crescimento das raízes próximas a superfície do solo.

Diante do exposto, verificou-se que a cultivar IACSP95-5094, por apresentar maior volume de raízes, especialmente raízes finas, quando cultivada em ambiente com maiores teores de nutrientes, tem potencial de acumular mais matéria seca e nutrientes, indicando a responsividade deste material genético, como constatado no tratamento com adubação via substrato e fertirrigação. Por outro lado, a cultivar CTC4, quando manejada em ambientes de alta fertilidade, apresentou menor formação de raízes finas, e a cultivar CTC2994 apresentou padrão de resposta intermediário, indicando que para as CTCs a adubação via fertirrigação pode ser uma estratégia para aumentar a eficiência de uso dos nutrientes, sem desconsiderar a contribuição nutricional da adubação de substrato. Desse modo, adubar em excesso pode não dar bom resultado, dependendo da cultivar. No caso, a CTC 4, se adubada e fertirrigada, tem a formação de raízes finas diminuída.

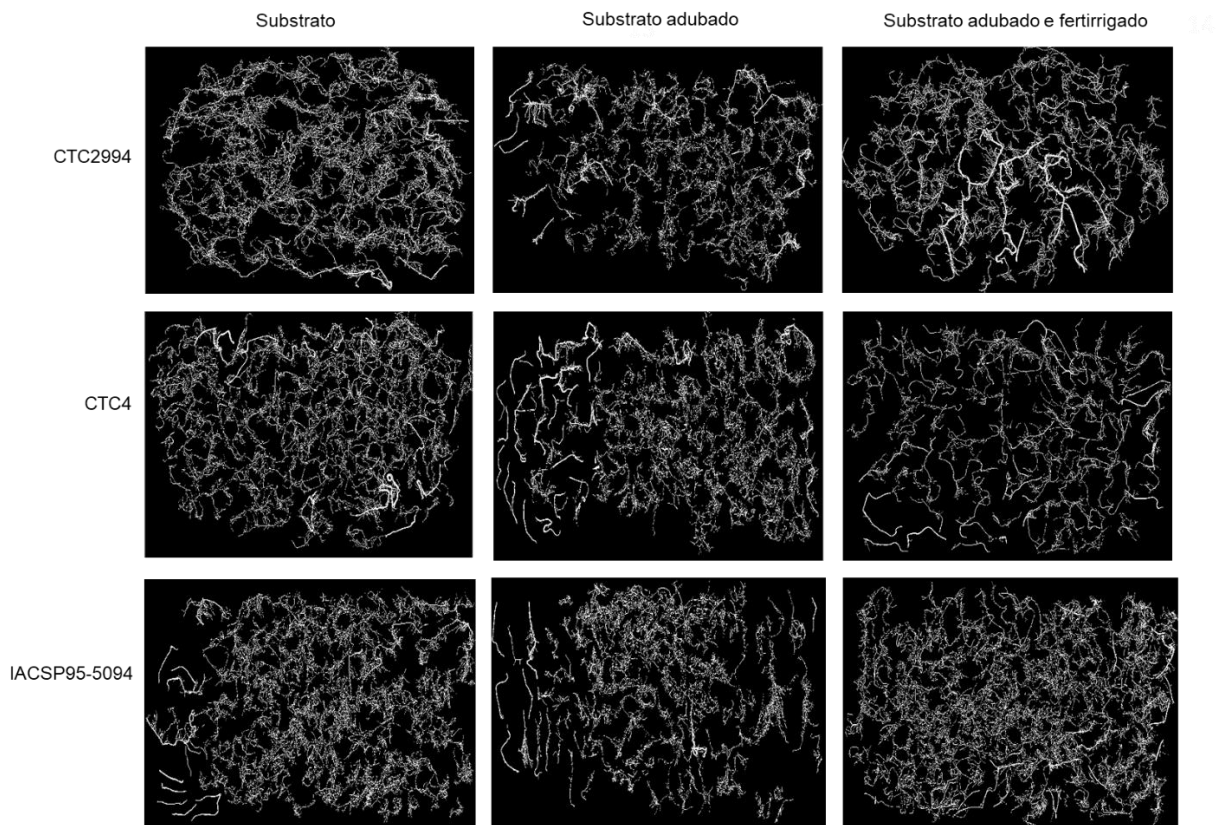


Figura 10. Imagens do sistema radicular de três cultivares de cana-de-açúcar em função das formas de fornecimento de nutrientes aos 47 dias após o plantio.

Na definição da qualidade das mudas é necessário combinar características de crescimento de parte aérea e raízes, e uma forma de associar essas informações é no IQD, Índice de Qualidade de Dickson. Ele é considerado um importante indicador da qualidade de mudas, pois considera características de crescimento e calcula a robustez e a distribuição de biomassa considerando altura, diâmetro, MSPA, MSR e MST (Fonseca et al., 2002). Segundo Hunt (1990), o valor mínimo recomendado para esse índice é 0,20, sendo a qualidade da muda incrementada à medida que o índice aumenta. Todos os valores do IQD ficaram acima do recomendado, e foram de 0,21; 0,22 e 0,28 para as cultivares CTC2994, CTC4 e IACSP95-5094, respectivamente. Entre as formas de fornecimento de nutrientes os valores de IQD foram de 0,21; 0,25 e 0,24 para substrato sem adubação, substrato adubado e substrato adubado e fertirrigado, respectivamente. O IQD é usado para determinar a qualidade de mudas de diversas espécies. No entanto, para o sistema de produção estudado, ele não teve sensibilidade em detectar as diferenças na qualidade das mudas e as formas de fornecimento de

nutrientes, visto que as mudas cultivadas em substrato sem adubação apresentaram sintomas de deficiência nutricional e diminuição na MSPA, o que deveria ter refletido no IQD.

4.3. Experimento 3: Definição da frequência de fertirrigação para produção de MPBs

Houve efeito significativo de cultivares e formas de fertirrigação na produção de matéria seca e acúmulos de macronutrientes (Tabela 13), mas não houve efeito de interação entre os fatores. A cultivar IACSP95-5094 apresentou maior produção de matéria seca e acúmulo de N, P e K na parte aérea, ao passo que as cultivares IACSP95-5094 e CTC2994 acumularam mais Ca, Mg e S em relação a CTC4. A CTC4 acumulou menos matéria seca e macronutrientes.

Tabela 13. Efeitos das cultivares e formas de fertirrigação na matéria seca da parte aérea e no acúmulo de macronutrientes nas MPBs de cana-de-açúcar.

	Matéria seca	N	P	K	Ca	Mg	S
	g/planta	mg/planta					
Cultivares							
CTC2994	1,67 b	30,94 b	4,91 b	35,53 b	6,44 a	5,94 a	3,85 a
CTC4	1,21 c	23,13 c	4,12 c	29,98 b	4,43 b	4,10 b	2,58 b
IACSP95-5094	2,05 a	37,66 a	6,64 a	49,76 a	6,66 a	6,18 a	3,88 a
CV%	12,28	15,85	18,08	26,95	19,95	21,56	19,36
Formas de fertirrigação							
4:2*	1,72 ab	38,62 a	6,22 a	39,32 b	7,18 a	6,20 a	3,38 b
3:2	1,89 a	35,57 a	6,05 a	53,06 a	6,88 a	6,49 a	3,80 b
2:2	1,91 a	36,89 a	5,32 a	49,90 ab	7,43 a	6,57 a	4,82 a
1:2	1,44 bc	25,85 b	5,15 a	26,19 c	4,71 b	4,59 b	3,25 b
Sem	1,25 c	15,97 c	3,39 b	23,66 c	3,02 c	3,16 c	1,94 c
CV%	13,07	16,03	18,49	22,53	19,36	17,93	18,07
Teste F							
Cultivares (C)	86,20**	45,05**	16,25**	19,41**	22,28**	19,14**	17,88**
Fornecimento (F)	21,01**	45,57**	37,24**	28,61**	34,26**	28,36**	23,20**
Interação (CxF)	1,46 ^{ns}	1,99 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,89 ^{ns}	1,38 ^{ns}	0,59 ^{ns}	1,42 ^{ns}
Média	1,64	30,58	5,23	38,43	5,84	5,40	2,42

NS – Não significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade.

Os acúmulos de S foram transformados por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda = 0,63$

* Fertirrigação 4:2 refere-se ao tratamento referência, com maior quantidade de nutriente aplicada.

Houve efeito de cultivares e formas de fertirrigação para todos os micronutrientes (Tabela 14). Além disso, houve efeito da interação CxF somente para Fe e B. A cultivar IACSP95-5094 apresentou os maiores acúmulos de Cu, Zn e Mn. Para o Fe e o B, os maiores acúmulos foram obtidos para as cultivares IACSP95-5094 e CTC2994.

Considerando a fertirrigação, a maior MSPA foi obtida quando utilizada fertirrigação 3:2 e 2:2, não diferenciando significativamente da 4:2. A menor MSPA foi obtida no tratamento sem fertirrigação, não se diferenciando da fertirrigação 1:2. As formas de fertirrigação 4:2, 3:2 e 2:2 tiveram os maiores acúmulos dos macronutrientes de N, Ca e Mg na parte aérea. Para o P, o uso da fertirrigação aumentou os acúmulos do nutriente na parte aérea. Para o K, a forma de fertirrigação 3:2 apresentou os maiores acúmulos do elemento, seguida pela fertirrigação 2:2. O maior acúmulo de S foi obtido para a fertirrigação 2:2. Para os micronutrientes, os maiores acúmulos de Fe, Zn e B ocorreram nas formas de fertirrigação 4:2, 3:2 e 2:2. Para o Cu, o uso das fertirrigações 3:2 e 2:2 apresentaram os maiores acúmulos na parte aérea. Para o Mn, o tratamento com fertirrigação 2:2 resultou no maior acúmulo do nutriente, seguido pelo 3:2. Os teores de Cu, Fe, Mn e B não se alteraram com as formas de fertirrigação. No entanto, houve diferenças nos acúmulos (teor x matéria seca), porque a MSPA apresentou variações em função dos tratamentos.

Tabela 14. Efeitos das cultivares e formas de fertirrigação no acúmulo de micronutrientes nas MPBs de cana-de-açúcar.

	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	-----mg/planta-----				
Cultivares					
CTC2994	0,012 b	0,104 a	0,066 b	0,109 b	0,023 a
CTC4	0,008 c	0,083 b	0,057 b	0,070 c	0,012 b
IACSP95-5094	0,014 a	0,102 a	0,090 a	0,127 a	0,021 a
CV%	16,33	5,79	6,62	16,23	40,35
Formas de fertirrigação					
4:2*	0,011 b	0,119 a	0,108 a	0,103 b	0,027 a
3:2	0,014 a	0,128 a	0,096 a	0,115 ab	0,020 a
2:2	0,015 a	0,111 a	0,090 a	0,127 a	0,019 a
1:2	0,009 bc	0,062 b	0,042 b	0,096 b	0,013 b
Sem	0,007 c	0,064 b	0,020 c	0,069 c	0,014 b
CV%	18,08	6,99	6,96	17,45	40,04
Teste F					
Cultivares (C)	53,17**	18,85**	29,19**	61,23**	16,81**
Fornecimento (F)	31,92**	32,59**	121,49**	17,83**	9,97**
Interação (CxF)	0,87ns	3,97**	1,47ns	0,59ns	2,47*
Média	0,011	0,097	0,071	0,102	0,019

NS – Não significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade.

Os acúmulos de Fe e Zn foram transformados por meio de raiz cúbica e o B, por transformação não-paramétrica (rank)

* Fertirrigação 4:2 refere-se ao tratamento referência, com maior quantidade de nutriente aplicada.

Admitindo-se como referência os acúmulos de nutrientes obtidos no experimento 1 (Tabela 6), verifica-se que a fertirrigação com os nutrientes P, Ca, S e Zn poderia ser dispensada (Tabela 15), visto que seu fornecimento foi acima da

necessidade das mudas. Por outro lado, para o N seria interessante realizar a fertirrigação 1:2, de maneira a fornecer às MPBs a quantidade de N necessária ao desenvolvimento. Além disso, a fertirrigação 4:2 atende às necessidades das MPBs no fornecimento de Mg, e parcialmente (63%) no fornecimento de K. Vale ressaltar que a cana-de-açúcar apresenta consumo de luxo do K, o que pode ter resultado na alta demanda pelas mudas durante a condução do experimento 1.

Tabela 15. Contribuição nutricional das formas de fertirrigação, tendo o acúmulo de nutrientes do experimento de marcha de absorção como referência.

Fertirrigação	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn
	%						
4:2*	117	254	63	189	94	700	738
3:2	109	225	56	189	68	560	625
2:2	104	197	53	189	58	471	513
1:2	98	168	50	189	47	383	399
Sem	81	142	49	100	53	342	296

* Fertirrigação 4:2 refere-se ao tratamento referência, com maior quantidade de nutriente aplicada

Houve diferenças entre cultivares em todos os atributos de desenvolvimento radicular (Tabela 16). As formas de fertirrigação influenciaram significativamente a área e o comprimento de raízes, não ocorrendo efeito desse fator na matéria seca e volume de raízes. Não houve interação CxF para os atributos do sistema radicular.

Tabela 16. Efeitos das cultivares e formas de fertirrigação nos atributos do sistema radicular de MPBs de cana-de-açúcar.

	MSR (g/planta)	Área (cm ²)	Comprimento (cm)	Volume (cm ³)
Cultivares				
CTC2994	0,572 a	309,93 ab	5.281,71 b	26,55 a
CTC4	0,398 b	256,10 b	4.378,17 b	21,30 b
IACSP95-5094	0,585 a	340,73 a	6.415,13 a	24,83 ab
CV%	23,92	23,42	24,63	25,45
Formas de fertirrigação				
4:2*	0,515 a	273,96 b	4.638,19 b	22,83 a
3:2	0,511 a	282,02 ab	4.867,28 b	23,05 a
2:2	0,476 a	282,73 ab	4.924,67 b	23,26 a
1:2	0,494 a	308,23 ab	5.467,02 ab	24,88 a
Sem	0,596 a	364,33 a	6.894,51 a	27,12 a
CV%	23,38	21,36	23,53	21,66
Teste F				
Cultivares (C)	14,13**	7,32**	11,96**	3,77*
Fornecimento (F)	1,74ns	3,94*	6,26**	1,43ns
Interação (CxF)	0,86ns	0,54ns	0,59ns	0,48ns
Média	0,518	302,25	5.358,33	24,23

NS – Não Significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade

* Fertirrigação 4:2 refere-se ao tratamento referência, com maior quantidade de nutriente aplicada.

As cultivares IACSP95-5094 e CTC2994 apresentaram a maior MSR. O maior comprimento de raiz foi obtido para a cultivar IACSP95-5094, que se diferenciou das cultivares CTC4 e CTC2994. A maior área de raízes foi obtida para a cultivar IACSP95-5094, no entanto, ela não se diferenciou da cultivar CTC2994. O maior volume de raízes foi obtido para a CTC2994, que não se diferenciou da IACSP95-5094.

Considerando o efeito da fertirrigação, o maior comprimento de raízes foi obtido quando as mudas não receberam fertirrigação, que não se diferenciou do tratamento fertirrigação 1:2. No entanto, todos os tratamentos com fertirrigação 4:2, 3:2, 2:2 e 1:2 não tiveram diferenças significativas entre si. A maior área de raízes foi obtida sem fertirrigação, seguido pelos tratamentos 3:2, 2:2 e 1:2. Estudos conduzidos por Ma et al. (2001), com *Arabidopsis* indicam que, sob condições de baixa disponibilidade de P, os pelos radiculares tornam-se mais longos e mais densos, devido ao aumento no número de células epidérmicas que se diferenciam em tricoblastos. Os pelos radiculares representam 70% da superfície da raiz, por isso sua importância na absorção de nutrientes. Em *Arabidopsis*, o aumento da disponibilidade de nitrato ocasiona a redução no alongamento da raiz primária, mas dependendo da quantidade de nitrato no solo a densidade das raízes laterais permanece constante. Além disso, altas concentrações de nitrato e fosfato suprimem o alongamento lateral da raiz (Linkohr et al., 2002).

Diante do exposto, quando comparados os tratamentos com fertirrigação, é possível recomendar a forma de fertirrigação 2:2 na produção de MPBs em viveiros, visto que esse tratamento apresentou os maiores acúmulos de matéria seca e nutrientes na parte aérea e não houve efeitos significativos prejudiciais à matéria seca, área, comprimento e volume de raízes. Além disso, este tratamento proporciona diminuição no consumo de insumos, visto que reduz pela metade a quantidade de fertilizantes necessária para produção de MPBs em viveiros.

4.4. Experimento 4: Emissão de raízes em função de tempos de rustificação e de adubação de substrato

No experimento 4 houve efeito significativo dos tempos de rustificação e da adubação de substrato na MSR, área, comprimento e volume de raízes (Tabela 17), não havendo efeito significativo da interação. Os tempos de 10 e 20 dias de rustificação apresentaram os maiores valores para os atributos de crescimento de raízes. Para o fator fornecimento de nutrientes, os tratamentos sem adubação e 1/3 da adubação completa resultaram em maiores valores de área, comprimento e volume de raízes. A adubação completa teve os menores valores para as variáveis relacionadas ao sistema radicular. Na Figura 11 foi possível observar a emissão das novas raízes em cada um dos tratamentos.

Tabela 17. Efeitos dos tempos de rustificação e formas de fornecimento de nutrientes, via adubação de substrato, nos atributos de raízes de plantas conduzidas em vaso com Latossolo Vermelho eutrófico típico textura argilosa.

	MSR (g/planta)	Área raiz (cm ²)	Comprimento raiz (cm)	Volume raiz (cm ³)
Tempo de rustificação				
10 dias	0,20 a	61,93 a	957,80 a	5,17 a
20 dias	0,16 a	50,09 a	797,95 a	4,08 a
30 dias	0,03 b	8,62 b	144,88 b	0,66 b
CV%	32,30	44,92	48,38	40,86
Formas de fornecimento de nutrientes				
Sem adubo	0,14 ab	48,04 a	775,45 a	3,71 a
1/3 adubação	0,16 a	50,26 a	791,69 a	4,11 a
2/3 adubação	0,13 ab	39,42 ab	617,00 ab	3,32 ab
Adubação completa	0,10 b	23,14 b	350,02 b	2,07 b
CV%	33,22	41,55	45,26	38,07
Teste F				
Tempo (T)	69,21**	38,42**	31,59**	48,70**
Fornecimento nutrientes (FN)	3,94*	6,51**	6,12**	5,92**
Interação (TxFN)	1,06ns	1,51ns	1,44ns	1,49ns
Média	0,13	40,21	633,54	3,30

NS – Não significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade.

Os resultados obtidos indicam que conforme aumentou a fertilidade do substrato, a MSR, área, comprimento e o volume de raízes diminuíram, o que se deve a uma possível inibição do crescimento e desenvolvimento radicular. Shukla et al. (2017), relacionaram diretamente dose excessiva de P inorgânico em *Arabidopsis thaliana* ao maior metabolismo do hormônio etileno, capaz de diminuir o comprimento de raízes primárias e o tamanho do meristema apical de raízes.

Além disso, estudo de Tian et al. (2014) indica que as raízes laterais são mais sensíveis às variações no teor de nutrientes do que as raízes primárias.



Figura 11. Emissão das novas raízes em MPBs de cana-de-açúcar em função de adubação e de tempos de rustificação.

Há carência de estudos que ajudem na definição do melhor tempo de rustificação das MPBs conduzidas em viveiros. Além disso, poucos são os relatos na literatura sobre a adubação de MPBs e a consequência direta desse manejo no ciclo de desenvolvimento das mudas, em especial, a possibilidade de redução de dias para produção das mudas. Por isso, estudos que avancem nesse sentido podem auxiliar na produção de mudas de qualidade em menor tempo.

As informações obtidas neste experimento, com a cultivar CTC2994 em Latossolo Vermelho eutrófico típico textura argilosa, indicam que o tempo de rustificação e a quantidade de nutrientes utilizados na produção de MPBs, devem

ser reduzidos em relação ao sugerido no protocolo de produção de mudas (Xavier et al., 2014).

4.5. Experimento 5: Multiplicação de MPBs, no campo, obtidas com variação nos tempos de rustificação

Houve efeito significativo de cultivares e do tempo de rustificação (Tabela 18) para todos os atributos avaliados, exceto para número de gemas por colmo. Não houve efeito significativo para a interação cultivares e tempos. A cultivar CTC4 apresentou o maior número de perfilhos por metro, superando em 1,42 e 1,63 perfilhos por metro as cultivares IACSP95-5094 e CTC2994, respectivamente. Por outro lado, a cultivar CTC2994 apresentou o maior número de gemas por colmo, acrescentando 1,28 e 1,77 gemas por colmo em comparação a IACSP95-5094 e CTC4, respectivamente. As cultivares CTC2994 e CTC4 apresentaram as maiores alturas de plantas, com 0,22 e 0,20 m a mais do que a IACSP95-5094.

Tabela 18. Perfilhos por metro, número de gemas por colmo, altura de plantas e taxa de desdobra de cana-de-açúcar produzidas em Meiosi, em função das cultivares e dos tempos de rustificação.

	Perfilho/metro	Gemas/colmo	Altura (m)	Taxa desdobra
Cultivares				
CTC2994	9,29 b	8,83 a	1,28 a	1 : 6,8 a
CTC4	10,92 a	7,06 b	1,26 a	1 : 6,4 ab
IACSP95-5094	9,50 b	7,55 b	1,06 b	1 : 6,0 b
Tempos de rustificação				
10 dias	8,81 b	7,54 a	1,10 b	1 : 5,5 b
20 dias	10,48 a	7,94 a	1,24 ab	1 : 6,8 a
30 dias	10,42 a	7,98 a	1,25 a	1 : 6,8 a
Teste F				
Cultivares (C)	5,79**	27,78**	10,64**	3,51*
Tempo (T)	6,61**	1,97ns	4,23*	12,85**
Interação (CxT)	0,96ns	2,74ns	0,86ns	0,79ns
CV%	12,86	7,7	20,52	11,53
Média	9,90	7,82	1,20	1:6,42

NS – Não significativo; * e ** significativo, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade
Os dados de altura foram transformados por meio de Box-Cox ($y+1$), $\lambda= 2$

A taxa da desdobra foi maior para a cultivar CTC2994, que não diferenciou significativamente da CTC4. O menor resultado obtido pela cultivar IACSP95-5094 para taxa de desdobra pode ter sido influenciado pelo ambiente de produção em

que as plantas se desenvolveram, caracterizado como C, segundo AMBICANA (Prado, 2011). Esse ambiente é classificado como médio, por apresentar potencial produtivo entre 80 e 88 t ha⁻¹, CTC do solo e água disponível médias, o que pode ter conduzido ao menor crescimento e desenvolvimento dessa cultivar, considerada exigente em relação ao ambiente (Assocana, 2020). Os critérios usados no cálculo da taxa de desdobra, em área de Meiosi, são número de perfilhos por metro, número de gemas por colmo e quantidade de gemas desejadas por metro de sulco, no plantio. A taxa de desdobra é utilizada como referência do momento em que as plantas das linhas-mãe estão aptas para serem colhidas e plantadas nos sulcos localizados entre as linhas-mãe, de forma a garantir quantidade de gemas por metro suficientes nesse processo.

Os tempos de rustificação 20 e 30 dias apresentaram a maior quantidade de perfilhos por metro em relação aos 10 dias de rustificação. Não houve diferenças entre os tempos de rustificação para o número de gemas por colmo. Os tempos de rustificação de 20 e 30 dias não apresentaram diferenças significativas entre si para a altura de plantas. Os valores observados para esta variável, nos tempos 20 e 30 dias, foram 0,14 e 0,15 m maiores do que para 10 dias de rustificação, respectivamente. A taxa de desdobra foi maior para os tempos 20 e 30 dias de rustificação, que não foram diferentes entre si. Esses resultados podem ser suportados por aqueles obtidos no experimento 4 (tempos de rustificação e adubação de substrato), em que o tempo de rustificação de 20 dias esteve entre os tratamentos com maior crescimento do sistema radicular.

A ausência de diferenças entre 20 e 30 dias de rustificação no experimento de campo, é bastante interessante visto que, dentro das condições experimentais, a rustificação de 20 dias permite obter mudas com qualidade num ciclo menor (redução de 10 dias no ciclo da muda no viveiro), resultando em menores custos por MPB produzida. A redução no ciclo e nos custos de desenvolvimento das MPBs se deu também devido a adequação do manejo de adubação definidos nos experimentos anteriores.

5. CONCLUSÕES

O acúmulo de nutrientes para mudas de cana-de-açúcar é dependente da cultivar. A ordem de acúmulo para a cultivar IACSP95-5094 é K>N>Ca>Mg>P>S>Mn>Zn>Fe>B>Cu; para a cultivar CTC2994 é K>N>Mg>Ca>P>S>Mn>Fe>Zn>B>Cu; e para a cultivar CTC4 é K>N>Ca>Mg>P>S>Mn>Fe>Zn>B>Cu.

O substrato constituído por bagaço de cana, torta de filtro e húmus de torta de filtro na proporção, em volume, 8:1:1, não fornece as quantidades de nutrientes exigidas pelas MPBs, com exceção do Fe, sendo indispensável fazer suplementação via adubação de substrato e fertirrigação. Por outro lado, a adubação de substrato associada a fertirrigação, conforme proposto no protocolo de adubação de MPBs em uso, ultrapassa a necessidade das mudas em relação aos nutrientes K, Mg e Mn.

A fertirrigação 2:2 (4 aplicações semanais, 2 com adubação completa e duas com N e Ca) apresenta os maiores acúmulos de matéria seca e de nutrientes na parte aérea, sem efeitos negativos nos atributos de raízes.

As MPBs submetidas a 10 e 20 dias de rustificação, na ausência de adubação e com 1/3 da adubação praticada no viveiro, têm a maior emissão de raízes.

As MPBs com tempos de rustificação de 20 e 30 dias têm melhor desempenho no campo do que as mudas produzidas com 10 dias de rustificação, sendo que o tempo de 20 dias representa flexibilidade no uso das instalações e economia no manejo de produção de MPBs.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Viveiristas de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar que utilizam substratos orgânicos precisam conhecer as características de seus componentes,

bem como da mistura final, de maneira a manejar a adubação de forma mais adequada. O estudo sobre a marcha de absorção das MPBs, apesar de conduzido em vasos com solo, foi um importante balizador na adequação da adubação das MPBs em substrato. Vale ressaltar que, para as condições deste trabalho, pode-se propor um novo protocolo de adubação, com diminuição da fertirrigação pela metade, e é possível reavaliar a necessidade de uso de alguns fertilizantes sólidos na adubação de substrato. Além disso, com esta pesquisa ficou claramente demonstrada a necessidade de redução do tempo de rustificação de 30 para 20 dias quando a produção das MPBs for feita em tubetes com volume menor ou igual a 140 mL, para evitar o envelhecimento das raízes e aumentar a velocidade de emissão de novas raízes após o transplante no campo. Com isso, o número de irrigações das mudas transplantadas pode ser diminuído, sem redução na taxa de pegamento. Há necessidade de prosseguir nas pesquisas com adubação de MPBs e, nessa linha, sugerem-se estudos dos efeitos da aplicação de molibdênio, visando aumento na eficiência da adubação nitrogenada, e das respostas ao fornecimento de zinco, micronutriente que, de modo geral, com mais frequência limita o crescimento da cana.

6. REFERÊNCIAS

Adorna JC, Crusciol CAC, Rossato OB (2013) Fertilization with filter cake and micronutrients in plant cane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37:649-657.

Araya T, Miyamoto M, Wibowo J, Suzuki A, Kojima S, Tsuchiya YN, Fukuda H, Wiren N, Takahashi H (2014a) CLE-CLAVATA1 peptide-receptor signaling module regulates the expansion of plant root systems in a nitrogen-dependent manner. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 111: 2029–2034.

Assocana - Associação Rural dos Fornecedores e Plantadores de Cana da Média Sorocabana (2020) Disponível em: <http://www.assocana.com.br/arquivos/upload/files/documentos/variedades_2020.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2022.

- Carmo CAFS, Araujo WS, Bernardi ACC, Saldanha MFC (2000) **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa p. 47
- Castro PRC (2016) Fisiologia Aplicada à Cana-de-Açúcar. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil (STAB), 208p.
- Chen DL, Delatorre CA, Bakker A, Abel S (2000) Conditional identification of phosphate-starvation-response mutants in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Plant Biology** 211: 13-22
- CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento (2024): Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, 2024. p.53
- CTC (org.). Bula técnica CTC2994: produtividade elevada no final da safra. Ribeirão Preto: CTC, 2022. 5p.
- CTC (org.). Bula técnica variedades. Ribeirão Preto: CTC4, 2018. 5p
- De Marco E, Silva DAS, Peres MM, Matoso ES, Tatto FR, Boelter JH, Campos ADS (2017) Uso de substratos alternativos na produção de mudas de cana-de-açúcar. **Revista da Jornada da Pós-graduação e Pesquisa Congrega** 1: 2677-2690.
- Dickson A, Leaf AL, Hosner JF (1960). Quality appraisal of white spruce white pine seedling stock in nurseries. **The Forest Chronicle** 36: 10-13.
- Dolan L, Davies J (2004) Cell expansion in roots. **Journal Current Opinion in Plant Biology** 7: 33–39.
- Dos Santos AF, Auer CG, Dedecek RA, Dos Santos PET, Da Silva HD (2008) **Morte de Árvores Resultante de Práticas Inadequadas durante a Implantação Florestal** Paraná: Embrapa, 5p. (Circular Técnica n.158)
- Drew MC (1975) Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. **New Phytol Journal** 75: 479–490.
- Fermino MH, Kämpf NA (2012) Densidade de substratos dependendo dos métodos de análise e níveis de umidade. **Revista Horticultura Brasileira** 30: 75-79.
- Figueirêdo AA, Júnior VO, Bernardes JVS, Charlo HCO (2020) Tamanho e posição do entrenó do minitolete no crescimento inicial da cana-de-açúcar. **Revista Inova Ciência e Tecnologia** 6: 2-17.
- Fonseca EP, Valéri SV, Miglioranza E, Fonseca NAN Couto L (2002) Padrão de qualidade de mudas de *Tremamicrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. **Revista Árvore** 26: 515-523

Fonteno WC (2007) A common misconception about substrates. Disponível em: http://www2.ncsu.edu/unity/lockers/project/hortsublab/pdf/Grower_Article.PM.pdf. Acesso em: 20 jul. 2007

Forde BG (2014). Nitrogen signaling pathways shaping root system architecture: an update. **Journal Current Opinion in Plant Biology** 21: 30–36.

Forde B, Lorenzo H (2001). The nutritional control of root development. **Journal of Plant & Soil Science** 232: 51–68.

Galkovskyi T, Mileyko Y, Bucksch A, Moore B, Symonova O, Price CA, Topp CN, Iyer-Pascuzz A, Zurek PR, Fang S, Harer J, Benfey PN, Weitz JS (2012) GiA Roots: software for the high throughput analysis of plant root system architecture. **Journal BMC Plant Biology** 12:116.

Gazola T, Cipola Filho ML, Franco Júnior NC (2017) Avaliação de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar provenientes de substratos submetidos a adubação química e orgânica. **Científica** 45: 300-306.

Gruber BD, Giehl RF, Friedel S, von Wirén N (2013). Plasticity of the Arabidopsis root system under nutrient deficiencies. **Journal of Plant Physiology** 163: 161–179.

Hoarau J, Caro Y, Grondin I, Petit T (2018) Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. **Journal of Water Process Engineering** 24: 1-25.

Hodge A (2004) The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients. **New Phytologist Journal** 162: 9-24.

Hunt GA (1990) Effect of styroblock design and cooper treatment on morphology of conifer seedlings. In: Target Seedling Symposium, Meeting of the Western Forest Nursery Associations, 1990, Roseburg. Proceedings Collins: USDA, p. 218-222

Jacobs DF, Landis TD. Hardening. In: Dumroese RK, Luna T, Landis TD (Eds.) (2009) Nursery manual for native plants: a guide for tribal nurseries. United States: Department of Agriculture, Forest Service, 309p.

Landell MGA (1998) Plantio com Meiosi: redução de custos na lavoura canavieira. São Paulo: 2º seminário IDEA, 1998. p. 54-62.

Landell MGA, Pinto LR, Creste S, Xavier MA, Dos Santos IA, Vasconcelos AC, Bidóia MAP, Da Silva DN, Silva MA (2005) Seleção de novas variedades de cana-de-açúcar e seu manejo de produção. **Informações Agrômicas (Encarte Técnico)**, Piracicaba, 110: 18-24

Landell MGA, Bressiani JÁ (2008) Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. In: Miranda LLD, Vasconcelos ACM, Landell MGA (Eds.) **Cana-de-açúcar**. Campina: IAC, p. 101- 156.

Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Xavier MA, Anjos IA, Dinardo Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Bidóia MAP, Silva DN, Mendonça JR, Kathak RA, Campos MF, Brancalião SR, Petri RH, Miguel PEM (2012) **Sistema de multiplicação de muda de cana de açúcar com o uso de mudas pré-brotadas (MPB) oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: IAC – Instituto Agrônomo de Campinas, 16 p. (Documento 109)

Leigh RA, Wyn Jones RG (1984) A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. **New Phytologist Journal** 97:1–13.

Lerene SD, Sierra NH, Manzano IC, Bueno LO, Rubira JLP, Mexal JG (2006) Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. **Forest Ecology and Management** 221: 63-71

Lima PR, Horbach MA, Dranski JAL, Ecco M, Malavasi MM, Malavasi UC (2014) Avaliação Morfofisiológica em Mudanças de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos Durante a Rustificação. **Revista Floresta e Ambiente** 21:316-326

Linkohr BI, Williamson LC, Fitter AH, Leyser HMO (2002) Nitrate and phosphate availability and distribution have different effects on root system architecture of *Arabidopsis*. **Plant Journal** 29: 751-760.

López-Bucio J, Cruz-Ramirez A, Herrera-Estrella L (2003) The role of nutrient availability in regulating root architecture. **Current Opinion in Plant Biology** 6: 280-287.

Luz, PHC, Vitti GC (2008) Manejo e uso de fertilizantes para cana-de-açúcar. Tecnologias na agroindústria canavieira. Jaboticabal: FCAV-UNESP, 2008.

Ma W, Li J, Qu B, He X, Zhao X, Li B, Fu X, Tong Y (2014). Auxin biosynthetic gene *TAR₂* is involved in low nitrogen-mediated reprogramming of root architecture in *Arabidopsis*. **Plant Journal** 78: 70–79.

Ma Z, Bielenberg DG, Brown KM, Lynch JP (2001) Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. **Plant, Cell and Environment Journal** 24: 459–467.

Matos PF, Marafon GJ (2020) Dinâmica territorial do setor sucroenergético em Santa Vitória, Minas Gerais. **Revista Campo-Território** 15: 1-18.

McConnughay KDM, Bazzar FA (1991) Is physical space a soil resource? **Ecology** 72: 94–103.

Mello TF (2018) **Enraizamento de mudas pré-brotadas de cana de- açúcar após transplante em função de adubação com nitrogênio e fósforo**. 47 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Unesp, Jaboticabal.

Mounier E, Pervent M, Ljung K, Gojon A, Nacry P (2014) Auxin-mediated nitrate signaling by NRT1. 1 participates in the adaptive response of *Arabidopsis* root architecture to the spatial heterogeneity of nitrate availability. **Plant Cell Environment** 37: 162–174.

Nastari PM (2015) Perspectivas para o setor canavieiro. Análise e perspectivas do setor para o Brasil. In: Beraldo GC, Cassia MT, Silva RP (Eds.) Processos Agrícolas e Mecanização da cana-de-açúcar. Jaboticabal, SBEA, p. 31-71.

Noronha RHF (2018) **Plantio de mudas pré-brotadas (MPB) de cana de açúcar em sistemas de manejo conservacionista de solo**. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Oliveira Bordonal R, Carvalho JLN, Lal R, de Figueiredo EB, de Oliveira BG, La Scala N (2018) Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development** 38: 1–23.

Oliveira, ECA, Freire J, Oliveira RI, Oliveira AC, Freire MBGS (2011) Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica** 42: 579-588

Orlando Filho J (1993) Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: Câmara GMS, Oliveira EAM (Eds.) Produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: FEALQ/USP p. 133-146

Orlando Filho J, Rosseto R, Casagrande AA (2001) Cana-de-açúcar: In: Ferreira ME, Cruz MCP, Raij B Van, Abreu CA (Eds.) Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal: CNPq/ Fapesp/Potafos, p.335-369.

Prado H (2011) Pedologia fácil: aplicações. Piracicaba: Fundag, 180p.

Raij B Van, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JÁ (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 285 p.

Reis Junior RA (2001) Probability of sugarcane response to potassium fertilizer as a function of soil K^+ ($Ca^{2+}+Mg^{2+}$)-0,5ratio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 36:1175-1183.

Rogers ED, Benfey PN (2015) Regulation of plant root system architecture: implications for crop advancement. **Current Opinion in Biotechnology** 32:93-98.

Sanchez-Calderon L, Bucio JL, López AC, Ramírez AC, Jacobo FN, Dubrovsky JG, Estrella LH (2005) Phosphate starvation induces a determinate developmental program in the roots of *Arabidopsis thaliana*. **Plant and Cell Physiology**, 46: 81-104.

Santana CTC, Santis A, Dallacort R, Lustosa M, Menezes CB (2012) Desempenho de cultivares de alface americana em resposta a diferentes doses de torta de filtro. **Revista Ciência Agronômica** 43: 22-29.

Santos, F Borém (2016) A. Cana-de-açúcar: do plantio à colheita. In: Santos HF dos, Castillo R (Eds) **Vulnerabilidade territorial do agronegócio globalizado no Brasil: crise do setor sucroenergético e implicações locais**. Viçosa: GEOUSP p. 508-532

Santos HF, Castillo R (2020) Vulnerabilidade territorial do agronegócio globalizado no Brasil: crise do setor sucroenergético e implicações locais. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)** 24: 508-532.

Sebrae (2022) **Relatório de Inteligência de Agronegócio** – Polo Sebrae Agro 10p.

Shukla D, Rinehart CA, Sahi SV (2017) Comprehensive study of excess phosphate response reveals ethylene mediated signaling that negatively regulates plant growth and development. **Scientific Reports** 7: 30-74.

Silva AA, Delatorre CA (2009) Alterações na arquitetura de raiz em resposta à disponibilidade de fósforo e nitrogênio. **Revista de Ciências Agroveterinárias** 8: 152-163.

Sun CH, Yu JQ, Hu DG (2017) Nitrate: A Crucial Signal during Lateral Roots Development. **Front Plant Science** 8: 485-494

Tatagiba SD, Pezzopane JEM, Dos Reis EF, Dardengo MCJD, Effgen TAM (2007) Comportamento fisiológico de dois clones de Eucalyptus na época seca e chuvosa. **Revista Cerne** 13: 149-159.

Tian H, De Smet I, Ding Z (2014) Shaping a root system: regulating lateral versus primary root growth. **Trends in Plant Science** 19: 426–431.

Walker DJ, Black CR, Miller AJ (1998) The role of cytosolic potassium and pH in the growth of barley roots. **Plant Physiol** 118: 957–964.

Wang Y, Wu W.-H (2013) Potassium transport and signaling in higher plants. **Annual Review of Plant Biology** 64:451–476.

Wanke M, Cierieszko I, Podbielkowska M, Rychter AM (1998) Response to phosphate deficiency in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) roots. Respiratory metabolism, sugar localization and changes in ultrastructure of bean root cells. **Annals of Botany** 82: 809-819.

Wheeler RM, Cargin JMR, Dutra ARA, Cubas ALV, Moecke EHS, João JJ (2021) Potenciais aplicações da vinhaça da cana-de-açúcar visando a produção mais limpa: uma revisão integrativa. IX ENSUS – Encontro de Sustentabilidade em Projeto – UFSC – Florianópolis, p. 316- 327.

Xavier MA, Landell MGA, Campana MP, Figueiredo P, Mendonça JR, Dinardo-Miranda LL, Scarpari MS, Garcia JC, Anjos IA, Azania CAM, Brancalião SR, Kanthack RAD, Aferri G, Silva DN, Bidóia MAP, Campos MF, Perruco D, Matsuo RS, Neves JCT, Cassaneli Junior JR, Perruco L, Petri RH, Silva TN, Silva VHP,

Thomazinho Junior JR, Miguel PEM, Lorenzato CM (2014) **Fatores de desuniformidade e kit de pré-brotação IAC para sistema de multiplicação de cana-de-açúcar – mudas pré-brotadas (MPB)** Campinas: Instituto Agronômico, 22 p (Documentos IAC, n.º 113)

Zorzeto TQ (2011) **Caracterização física e química de substratos para plantas e sua avaliação no rendimento do morangueiro (*Fragaria* x *ananassa* Duch.)** (Monografia). Instituto Agronômico, Campinas. 110 p. 2011.

Zhao S, Zhang ML, Ma TL, Wang Y (2016) Phosphorylation of ARF2 relieves its repression of transcription of the K⁺ transporter gene HAK5 in response to low potassium stress. **Plant Cell** 28:3005–3019.