

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA  
FILHO”**

**CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**JOSÉ AUGUSTO LIBERATO DE SOUZA**

**APLICAÇÃO DE AZOSPIRILLUM BRASILENSE E NITROGÊNIO NO  
SULCO DE PLANTIO E O EFEITO NOS COMPONENTES DE  
PRODUÇÃO E ESTADO NUTRICIONAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Ilha Solteira - SP

2024

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**JOSÉ AUGUSTO LIBERATO DE SOUZA**

**APLICAÇÃO DE AZOSPIRILLUM BRASILENSE E NITROGÊNIO NO  
SULCO DE PLANTIO E O EFEITO NOS COMPONENTES DE  
PRODUÇÃO E ESTADO NUTRICIONAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, como parte das exigências para obtenção do título de mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

**Orientador:** Reges Heinrichs

**Coorientadora:** Carolina dos Santos  
Batista Bonini

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

S729a Souza, José Augusto Liberato de.  
Aplicação de *Azospirillum brasilense* e nitrogênio no sulco de plantio e o efeito nos componentes de produção e estado nutricional da cana-de-açúcar / José Augusto Liberato de Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
53 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Reges Heinrichs

Coorientadora: Carolina dos Santos Batista Bonini

Inclui bibliografia

1. Adubação nitrogenada. 2. Inoculante. 3. *Saccharum Spp.*

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Este estudo tem o potencial de ampliar o conhecimento na área de nutrição de plantas e microbiologia, os resultados poderão contribuir para avanços nas estratégias de adubação, com enfoque no desenvolvimento sustentável. A pesquisa propõe contribuir em benefícios diretos para a sociedade, ao incentivar práticas agrícolas eficientes, viáveis e ecologicamente responsáveis na agricultura. Ao propor a utilização de *Azospirillum brasilense* nas estratégias de adubação, o estudo abre caminho para inovações no campo da fisiologia vegetal, biotecnologia e microbiologia. Os resultados gerados desta pesquisa podem impactar o consumo e reduzir a dependência de insumos agrícolas, propiciando redução de custos e uma produção mais sustentável. A pesquisa visa a conscientização de profissionais da área agrícola, produtores e comunidade acadêmica acerca de metodologias ecológicas.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This study has the potential to expand knowledge in the area of plant nutrition and microbiology, the results could contribute to advances in fertilization strategies, with an approach to sustainable development. The research proposes to contribute benefits to society by cultivating efficient, viable and ecologically responsible agricultural practices in agriculture. By proposing the use of *Azospirillum brasilense* in fertilization strategies, the study paves the way for innovations in the field of plant physiology, biotechnology and microbiology. The results generated from this research can impact consumption and reduce dependence on agricultural inputs, providing cost reduction and more sustainable production. The research aims to raise awareness among agricultural professionals, community producers and academics about ecological methodologies.


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Aplicação de *Azospirillum brasilense* e nitrogênio no sulco de plantio e o efeito nos componentes de produção e estado nutricional da cana-de-açúcar


**AUTOR: JOSÉ AUGUSTO LIBERATO DE SOUZA**

**ORIENTADOR: REGES HEINRICHS**


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **REGES HEINRICHS**  
Data: 04/12/2024 10:47:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Assoc. REGES HEINRICHS (Participação Virtual)  
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Documento assinado digitalmente  
 **ADONIS MOREIRA**  
Data: 27/01/2025 18:22:44-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. ADÔNIS MOREIRA (Participação Virtual)  
Departamento de Fertilização do Solo e Nutrição de Plantas / Embrapa Soja

Documento assinado digitalmente  
 **CECILIO VIEGA SOARES FILHO**  
Data: 27/01/2025 10:31:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CECILIO VIEGA SOARES FILHO (Participação Virtual)  
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - UNESP

Ilha Solteira, 29 de novembro de 2024

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que até aqui me sustentou, a minha família, meu orientador Prof. Dr. Reges Heinrichs e Coorientadora Dra. Carolina dos Santos Batista Bonini, aos meus amigos, a estrutura técnica/administrativa e acadêmica da FCAT e FEIS UNESP, a todos integrantes do Grupo de Experimentação em Nutrição e Adubação de Plantas (GENAP) e as unidades de produção sucroenergéticas fornecedoras das áreas para as pesquisas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Permita que eu fale não as minhas cicatrizes, se  
isso é sobre vivência me resumir a sobrevivência é  
roubar um pouco do bom que vivi” - Emicida

## RESUMO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) se destaca no cenário da produção agropecuária sustentável, devido a versatilidade de utilização e o potencial energético. No entanto, desafios de manejo necessitam do aprimoramento, como a adubação nitrogenada associada a ação microbiológica. Nesse contexto, a utilização da bactéria *Azospirillum brasilense* vem sendo estudada como alternativa para redução do uso de fertilizantes minerais. O objetivo do trabalho foi avaliar o uso de *Azospirillum brasilense* no sulco de plantio da cana-de-açúcar na diagnose foliar, concentração e extração de nutrientes na parte aérea, produtividade e qualidade tecnológica de colmos, e massa fresca e seca total da parte aérea das plantas. O experimento foi realizado em condições de campo em duas localidades, no ano agrícola 2022/23. Os solos nas áreas 1 e 2 foram classificados, respectivamente, como Latossolo Vermelho de textura média e Latossolo Vermelho Amarelo de textura arenosa. O delineamento foi em blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos foram: T1) 28 kg ha<sup>-1</sup> de N T2) 14 kg ha<sup>-1</sup> de N, T3) T2 + 0,2 L ha<sup>-1</sup> de inoculante T4) T2 + 0,4 L ha<sup>-1</sup> de inoculante, T5) T2+0,6 L ha<sup>-1</sup> de inoculante T6) T2 + 0,8 L ha<sup>-1</sup> de inoculante. Na área 1, o tratamento T5 apresentou produção de massa fresca total da parte aérea 34% maior em relação a T2. A massa seca total, perfilhamento, produtividade de colmos e as variáveis tecnológicas em ambas áreas não apresentaram diferença entre os tratamentos. Na extração de nutrientes, o tratamento T5 sempre estava entre os que apresentaram as maiores médias de P, K, Ca, Mg, S, Fe e Zn, o mesmo foi observado nas concentrações médias na parte aérea em K, Ca e Zn, nas duas áreas experimentais. O dendrograma apresentou resultados semelhantes entre os tratamentos T1 e T5.

**Palavras-chave:** adubação nitrogenada; inoculante; *Saccharum spp.*



## ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum* spp.) stands out in the context of sustainable agricultural production due to its versatility and energy potential. However, management challenges, such as nitrogen fertilization associated with microbiological action, require improvement. In this context, the use of the bacterium *Azospirillum brasilense* has been studied as an alternative to reducing the use of mineral fertilizers. The objective of this study was to evaluate the application of *Azospirillum brasilense* in the planting furrow of sugarcane in terms of leaf diagnosis, concentration and extraction of nutrients in the aerial part, yield and technological quality of the stalks, and total fresh and dry biomass of the aerial parts of the plants. The experiment was conducted under field conditions at two locations during the 2022/23 growing season. The soils in áreas 1 and 2 were classified as medium-textured Oxisoil and sandy-textured Oxisoil, respectively. The experimental design was a randomized block design with four replications. The treatments were: T1) 28 kg ha<sup>-1</sup> of N; T2) 1428 kg ha<sup>-1</sup> of N; T3) T2 + 0.2 L ha<sup>-1</sup> of inoculant; T4) T2 + 0.4 L ha<sup>-1</sup> of inoculant; T5) T2 + 0.6 L ha<sup>-1</sup> of inoculant; T6) T2 + 0.8 L ha<sup>-1</sup> of inoculant. In area 1, treatment T5 showed a total fresh biomass yield of the aerial parts that was 34% higher than T2. Total dry biomass, tillering, stalk yield, and technological parameters did not differ significantly between treatments in either area. In terms of nutrient uptake, treatment T5 consistently ranked among those with the highest averages for P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, and Zn, the same was observed in the average concentrations in the aerial part of K, Ca and Zn, in the two experimental areas. The dendrogram showed similar results between treatments T1 and T5.

**Keywords:** nitrogen fertilizer; inoculant; *Saccharum* spp

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Precipitação histórica e no período experimental, temperaturas mínima, média e máxima (abril/2022 a julho/2023) .....	21
Figura 2 - Instalação do experimento, aplicação das soluções inoculantes. A-) São João do Pau d’alho/SP, B-) Castilho/SP, 2022.....	23
Figura 3 - Adubação de cobertura, aos 120 DAP, São João do Pau d’alho/SP, 2022.....	23
Figura 4 - Adubação de cobertura, aos 120 DAP, Castilho/SP, 2022.....	24
Figura 5 - A-) Preparação das amostras de folha e planta para digestão. B-) Digestão sulfúrica do material (folha e planta inteira) .....	25
Figura 6 - A-) Destilação das amostras B-) Titulação pelo método micro Kjeldahl, para determinação de N em folha e planta inteira (folha + colmo + pendão) .....	25
Figura 7 - Digestão nitroperclórica do material (folha e planta inteira) .....	26
Figura 8 - Determinação de P e S (foliar e planta inteira) pelo espectrofotômetro de luz.....	26
Figura 9 - Determinação de Ca, Mg, K e Micro nutrientes (foliar e planta inteira) pelo espectrofotômetro de absorção atômica.....	27
Figura 10 - Colheita e pesagem de colmos em cada unidade experimental.....	28
Figura 11 - Rede de correlação ponderada, elaborada no programa estatístico R.....	40
Figura 12 - Representação hierárquica de agrupamentos (dendrograma), elaboradas no programa estatístico R.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado da análise química e granulométrica do solo, em amostras coletadas em 0 – 20 cm de profundidade, na instalação do experimento nas duas áreas.....	20
Tabela 2 - Umidade do solo e bactérias diazotróficas em amostra de solo coletada na instalação da pesquisa no campo na área 1 e 2.....	21
Tabela 3 - Tratamentos com adubação nitrogenada associada a inoculação com <i>Azospirillum brasilense</i> .....	22
Tabela 4 - Produção e perfilhamento de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano agrícola 2022/23.....	31
Tabela 5 - Análise tecnológica de colmos de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano agrícola 2022/23.....	32
Tabela 6 - Concentração de macro e micronutrientes na diagnose foliar de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano Agrícola, 2022/23.....	33
Tabela 7 - Concentração de macro e micronutrientes em planta inteira (folhas + colmos + pendão) de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano Agrícola, 2022/23.....	36
Tabela 8 - Extração de macro e micronutrientes pela cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano Agrícola, 2022/23.....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPCV	Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal
BPCP	Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas
UFC	Unidade Formadora de Colônias
pH	Potencial hidrogeniônico
V%	Saturação por base
m%	Saturação por Alumínio
MO	Matéria Orgânica
ATR	Açúcar Total Recuperável
SMP	Shoe - Maker, McLean e Pratt
DTPA	Ácido Dietileno Triamino Pentaacético
ANOVA	Análise de Variância
UR	Umidade Relativa do Ar
g	grama
kg	Quilo
t	Tonelada
m	metro
ha	Hectare
DAE	Dias Após a Emergência
RB	Rede Interuniversitária de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro –
Ridesa	
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	15
2.1	A cana-de-açúcar e sua importância para o Brasil .....	15
2.2	Demanda nutricional da cana-de-açúcar. ....	16
2.3	Bactérias promotoras de crescimento vegetal utilizadas na agricultura.....	17
2.4	Adubação nitrogenada da cana de açúcar e o <i>Azospirillum brasilense</i> .....	19
3.	MATERIAL E MÉTODOS .....	22
3.1	Estado nutricional das plantas por diagnose foliar.....	26
3.2	Número e produção de colmos.....	29
3.3	Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar .....	30
3.4	Produção de massa total, concentração e extração de nutrientes pela parte aérea da cana-de-açúcar.....	31
3.5	Análise Estatística .....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
5	CONCLUSÕES.....	43
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é líder mundial em produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), na safra de 2023/2024 estabeleceu um novo recorde, atingindo 713,2 milhões de toneladas processadas CONAB (2024). A cana-de-açúcar é uma das mais importantes culturas do mundo, utilizada na alimentação, produzindo açúcar líquido, refinado, cristal, demerara orgânico, bebidas, em biocombustíveis, como matéria-prima para o etanol, energia renovável, com a utilização de etanol e biogás (Heinrichs *et al.*, 2017) e a produção de biomateriais, utilizando a celulose bacteriana (Andrade *et al.*, 2021).

Diversos fatores podem interferir na produção de cana-de-açúcar, dentre eles, destaca-se o manejo nutricional e concomitante as taxas de assimilação dos nutrientes. Solos de textura média com baixo teor de matéria orgânica são característicos sob condições tropicais, apresentando características físicas muito favoráveis para a produção agrícola, no entanto quimicamente apresentam limitações (Martins; Hardoim; Martins, 2023) que podem ser superadas com estratégias de manejo e adubação.

A exigência nutricional da cana-de-açúcar varia de acordo com a produtividade esperada e ciclo. Segundo Rengel *et al.* (2011), o estágio de desenvolvimento da cultura influencia diretamente na maior extração de nutrientes, sendo essa fase compreendida entre 200 dias após o plantio. Na dinâmica solo/nutriente diversas reações podem interferir na disponibilidade, e na absorção dos nutrientes pelas plantas, influenciando diretamente na quantidade exigida na adubação mineral (Ferreira, 2024).

Entre os nutrientes mais exigidos pela cultura é o nitrogênio. Elemento vital para os processos metabólicos, sendo componente essencial de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, contribuindo diretamente para a biossíntese de clorofilas (Andrade *et al.*, 2003). No uso de ureia como fonte de N, podem ocorrer perdas significativas do elemento por volatilização, enquanto no uso de sulfato ou nitrato de amônio pode ocorrer lixiviação, resultando em deficiência de N.

Para atender a essa demanda do nutriente pela acultura, pode-se utilizar a adubação mineral, no entanto implica na elevação dos custos de produção. Além disso, o uso intensivo ao longo do tempo, esses insumos podem causar impactos ambientais adversos, como a acidificação do solo e a contaminação dos recursos hídricos pelos compostos químicos presentes nos fertilizantes, entre outros (Ferreira, 2024). Uma maneira para reduzir a dependência por fertilizantes nitrogenados minerais é a utilização de bactérias promotoras de

crescimento vegetal (BPCV), que vem trazendo resultados positivos nos sistemas de produção agrícola (Mariano *et al.*, 2013).

As BPCV têm potencial de estimular o crescimento das plantas por meio da fixação biológica de nitrogênio, contribuem diretamente para um maior desenvolvimento do sistema radicular, síntese de fitohormônios, atuam na solubilização de fosfatos e podem ainda aumentar a resistência dos vegetais a estresses bióticos e abióticos (Schultz *et al.* 2014).

A capacidade de fixação de nitrogênio por parte das bactérias, lhe atribuem a capacidade de diazotrofismo, e sua utilização na agricultura é considerada uma alternativa altamente sustentável, visto a redução na utilização de fertilizantes minerais e conseqüentemente na dependência de processos industriais não renováveis (Patel; Minocheherhomji, 2018).

O *Azospirillum* é um gênero de bactéria muito estudado devido a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>) e produzir fitohormônios que melhoram o desenvolvimento das plantas. Scudeletti *et al.* (2023) ao avaliar doses de *Azospirillum brasilense* em cana-de-açúcar, observaram aumento na produção de açúcar, energia e produtividade quando aplicado o inoculante nos estágios de brotação e perfilhamento. Silveira (2008); Ferreira (2018), ressaltam ainda a possibilidade de incremento na qualidade da matéria prima, o que pode ser refletivo em ganhos estratégicos na produtividade final dos canaviais.

O objetivo do estudo foi avaliar aplicação de *Azospirillum brasilense* no sulco de plantio da cana-de-açúcar, associado a redução da adubação nitrogenada, no estado nutricional das plantas, extração de nutrientes da parte aérea, na produtividade e qualidade tecnológica dos colmos e na produção de massa fresca e seca total da parte aérea.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cana-de-açúcar e sua importância para o Brasil

O Brasil é destaque na produção mundial de cana-de-açúcar, superando 700 milhões de toneladas, respondendo por aproximadamente 39% da produção global da cultura, seguido pela Índia, China e Tailândia (Silalertruksa; Gheewala, 2018). De acordo com a CONAB (2023), a área ocupada por cana-de-açúcar no Brasil gira em torno de 8,3 milhões de hectares, colocando a cultura em terceiro lugar, em primeira e segunda posição vem as a soja e o milho, ambas de ciclo perene.

Desempenhando um papel estratégico na economia brasileira, o setor sucroalcooleiro conta com um número significativo de agroindústrias distribuídas por todas as regiões do Brasil, é responsável pela geração de milhares de empregos diretos e indiretos. Nesse contexto, é fundamental analisar, sob a ótica do desenvolvimento sustentável, os impactos do setor na sociedade, na economia e no meio ambiente, bem como a gestão e destinação de seus resíduos e subprodutos (Silva *et al.*, 2021).

Segundo Santos Neto *et al.* (2014), as inovações no setor sucroenergético possibilitam a mitigação dos impactos ambientais por meio da destinação adequada dos subprodutos da cana-de-açúcar, a exemplo podemos citar o uso da vinhaça para fertirrigação e do bagaço para cogeração de energia. Essas práticas também promovem benefícios sociais, como a geração de empregos e a oferta de novos produtos à sociedade.

São notórias as mudanças que o setor passou ao longo dos últimos anos, principalmente no que diz respeito aos sistemas de produção da cana-de-açúcar (Cardoso *et al.*, 2019), devido a essas mudanças, fica cada vez mais evidente a diferença de desenvolvimento tecnológico nos diferentes polos produtores de cana do País. Devido a isso, os níveis de produtividade da cultura, tendem a apresentar uma certa oscilação de Norte a Sul do Brasil (Dias; Sentelhas, 2018).

A interação entre clima, solo e variedades da espécie *Saccharum officinarum* é determinante para a produtividade das lavouras de cana no país, hoje, a produção ocorre em praticamente todo o território nacional, gerando uma expressiva receita (Fontanetti; Bueno, 2017), já as maiores produções estão concentradas nas regiões Nordeste e Centro Sul (Signor *et al.*, 2013).

Uma das principais áreas de expansão para o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é o Cerrado, região tradicionalmente dedicada à produção de grãos, como soja e café, além da



pecuária, que agora integra também a produção de cana-de-açúcar (Zanzarini; Santos, 2008), entretanto, algumas regiões que pertencem a esse bioma, apresentam limitações de manejo, essas ligadas principalmente a dinâmica nutricional, aporte de água e oxigênio, processos mecânicos e estruturação, o que garante a resistência aos processos erosivos (Lumbreras *et al.*, 2015), entretanto, a cana de açúcar apresenta uma considerável rusticidade, quando responsiva a estratégia de manejo, a cultura pode proporcionar altas produtividades.

O setor sucroenergético tem direcionado esforços para otimizar tanto o incremento quantitativo quanto qualitativo da produção, com foco na sustentabilidade. Para isso, são realizados investimentos contínuos em inovações tecnológicas e no aprimoramento de práticas agrônomicas de alta eficiência, objetivando a maximização dos processos produtivos e a mitigação dos impactos ambientais (Nogueira; Garcia, 2014; Oliveira *et al.*, 2014).

## **2.2 Demanda nutricional da cana-de-açúcar**

Devido à elevada produção de biomassa, a cana-de-açúcar extrai uma quantidade significativa de nutrientes do solo para seu adequado crescimento e desenvolvimento (Bokhtiar & Sakurai, 2005). Conhecer as taxas de crescimento, assim como a dinâmica de aproveitamento e alocação dos nutrientes no decorrer do seu ciclo, seja ele vegetativo ou reprodutivo, é fundamental para otimizar e potencializar a capacidade produtiva das variedades, nos diferentes ambientes de produção. (Oliveira *et al.*, 2011).

O estado nutricional da cana-de-açúcar afeta diretamente a eficiência fotossintética e o metabolismo da sacarose, impactando a produtividade dos colmos, a longevidade do canavial e a viabilidade econômica da cultura.

A cultura pode atingir um alto potencial produtivo, podendo chegar a produzir mais de 100 t/ha (Oliveira, 2002), porém, para alcançar altos níveis de produtividade, a cana-de-açúcar extrai grandes quantidades de nutrientes do solo, especialmente nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). A manutenção desse rendimento de forma sustentável requer a reposição adequada dos nutrientes, visando tanto as necessidades da cultura quanto a preservação ambiental (Cardoso *et al.*, 2020). Para Traspadini (2024), as exigências nutricionais da cultura são maiores nas variedades que sofreram melhoramento genético, sendo essas, consideradas variedades modernas.

Dentro os macronutrientes citados anteriormente, a cana-de-açúcar apresenta uma alta demanda de N, esse macronutriente é um componente essencial de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, participando direta ou indiretamente de diversos processos bioquímicos,

com destaque para a ativação das enzimas PEPcase e RUBISCO (Lopes; Lima, 2015). Trivelin *et al.* 2002; Franco *et al.* 2008 ainda pontuam que, o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar são regulados diretamente pela disponibilidade de N no sistema, a demanda da cultura pode variar entre 0,5 a 0,9 de N a cada tonelada de colmo produzida.

Já o P, comparado a outros macronutrientes, é exigido em menor quantidade pelas plantas, no entanto, as doses de fertilização fosfatada são elevadas devido às propriedades dos diferentes tipos de solo, que promovem a fixação do P, tornando a maior parte do P aplicado indisponível para absorção pelas plantas (Rosa, 2021). Considerado um elemento essencial para a fisiologia dos vegetais, o P, atua na transferência de energia da célula, na respiração e no processo fotossintético dos vegetais (Fageria, 2009), além disso compõe a estrutura de diversos ácidos nucléicos, assim como coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos, presentes nas membranas celulares das plantas (Taiz; Zeiger, 2013). De maneira geral, os solos brasileiros apresentam uma deficiência em relação a esse nutriente, o que exige uma atenção quanto a estratégia de adubação adotada (Souza *et al.*, 2015). A demanda de P pela cana-de-açúcar necessita é aproximadamente 0,2 a 0,5 kg por tonelada de colmo, porém, esses valores são condicionados pelas condições de cultivo e pelo estágio de desenvolvimento das plantas (Korndörfer; Oliveira; Galvão, 2012).

O K destaca entre os macronutrientes de maior demanda por parte dos vegetais, o mesmo é essencial no desenvolvimento das plantas e exigido desde o crescimento até a fase reprodutiva, atuando diretamente no processo osmótico, na dinâmica dos estômatos, ativação de enzimas, fotossíntese, entre outros (Franzé, 2010). Raij, 2011, pondera que, em algumas culturas o K é o elemento exigido em maior quantidade. Na cultura da cana-de-açúcar, a extração média de potássio varia entre 150 e 250 kg de K<sub>2</sub>O por hectare por ciclo, em condições de elevado potencial produtivo (RAIJ *et al.*, 1996).

### **2.3 Bactérias promotoras de crescimento vegetal utilizadas na agricultura**

A demanda global de alimentos tem crescido exponencialmente com o aumento da população, isso tem exigido do setor agrícola mundial, uma expansão significativa a fim de garantir o suprimento das necessidades do homem, todavia, esse crescimento está ocorrendo em um cenário de restrição de recursos, como disponibilidade hídrica, áreas de solo cultivável e insumos agrícolas, agravado ainda pelas adversidades decorrentes das mudanças climáticas (FAO, 2022).

Com isso tem aumentado o interesse da sociedade por tecnologias alinhadas ao desenvolvimento sustentável, e que respondam às demandas urgentes da sociedade global, historicamente, os sistemas de produção agrícola têm definido sustentabilidade como a capacidade de manter a produtividade de forma contínua ao longo do tempo (Oliveira *et al.*, 2014).

As práticas de manejo desenvolvidas e consolidadas há algumas décadas, como rotação de culturas, desenvolvimento de cultivares resistentes, e uso de plantas de cobertura, quando aplicadas de forma isolada, não têm sido suficientes para mitigar os impactos negativos da degradação das áreas cultivadas sem práticas sustentáveis (Abhilash *et al.*, 2016). Para Lopes *et al.* (2020), essas metodologias necessitam ser complementadas com propostas ambientalmente seguras e fundamentadas, como o uso de microrganismos multifuncionais, especialmente bactérias promotoras de crescimento vegetal e fungos de solo.

As BPCV habitam a rizosfera das plantas, e são capazes de proporcionar benefícios diretos e indiretos na fisiologia dos vegetais, como por exemplo a fixação biológica do N atmosférico, a solubilização do fosfato, a produção de fitohormônios e sintetização dos sideróforos (Singh *et al.*, 2017), como também a ativação da resistência sistêmica induzida nas plantas (Compant; Clément; Sessitsch, 2010; Ahemad; Kibret, 2014). Diferentes gêneros de bactérias foram classificados com a capacidade de promover o crescimento das espécies vegetais, a exemplo temos, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Acetobacter*, *Burkholderia*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, entre outros (Kang *et al.*, 2019).

Os diversos mecanismos de ação das bactérias promotoras de crescimento vegetal, têm sido apontados como altamente eficientes no incremento da produtividade agrícola e na promoção da sustentabilidade no setor, estudos têm confirmado esses efeitos positivos, evidenciando resultados promissores em diferentes culturas (Gírio *et al.*, 2015; Spalaor *et al.*, 2016; Battistus, 2019).

Atualmente, há no mercado diferentes tipos de inoculantes, amplamente empregados pelos agricultores em culturas como soja (*Glycine max*), feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*) e cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), esses são formulados principalmente com bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) dos gêneros *Bradyrhizobium spp.*, e espécies como *Rhizobium tropici*, *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium* e *Nitrospirillum amazonense* (Ferreira, 2018). Esses bioinoculantes, além de gerar uma economia estimada entre R\$ 7 e 10 bilhões para os sistemas produtivos, promovem um crescimento anual de 46,9% na taxa de produtividade em culturas agrícolas no Brasil (Castro; Araújo, 2018).

As projeções para o uso sustentável de bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) na agricultura indicam alto potencial de desenvolvimento, é esperado que a pesquisas prossigam no aprofundamento da compreensão dos mecanismos de ação das bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV). Com isso será possível o desenvolvimento de cepas mais eficientes e adaptadas a condições específicas, o que promoverá o fortalecimento do uso e um melhor aproveitamento desses microrganismos, tendo em vista que a produção de bioinoculantes a base de BPCVs contribuem diretamente na mitigação de estresses abióticos, como salinidade e déficit hídrico, proporcionando soluções sustentáveis para a otimização da produção agrícola (Magalhães, 2023).

#### **2.4 Adubação nitrogenada da cana de açúcar e o *Azospirillum brasilense***

As condições climáticas adversas e a baixa disponibilidade de nutrientes nos solos tropicais, particularmente de N, são considerados os principais fatores que impactam negativamente a produtividade da cultura da cana-de-açúcar no Brasil (Prado; Pancelli, 2008; Schultz *et al.*, 2012; Abreu *et al.*, 2013).

O fornecimento de N é essencial para gramíneas, pois a falta desse elemento pode influenciar diretamente algumas características estruturais dessas plantas. Grande parte da demanda de N da cana-de-açúcar, é fornecida pela adubação mineral nitrogenada (Prado; Pancelli, 2008; Bastos *et al.*, 2017), como complementação à quantidade disponibilizada pelo solo ou pelo processo de fixação biológica do elemento (Urquiaga *et al.*, 2012; Schultz *et al.*, 2012).

Diversos são os resultados obtidos com a utilização da adubação nitrogenada em gramíneas forrageiras, como apontam trabalhos realizados em território brasileiro (Rosário, 2013; Bernardi *et al.*, 2018; Mariani *et al.*, 2018), esses ganhos podem ser principalmente em fitomassa, devido ao maior perfilhamento das lavouras, assim como número de folhas e um melhor desenvolvimento do sistema radicular (Galindo *et al.*, 2018).

A implementação de práticas de manejo que maximizem a extração de N pela cultura da cana-de-açúcar é crucial para o setor sucroenergético, devido ao elevado custo dos fertilizantes nitrogenados e às perdas de N no sistema solo-planta, que podem resultar em prejuízos para os agricultores e riscos ambientais relacionados à contaminação dos recursos naturais (Udvardi *et al.*, 2015).

Segundo Beche *et al.* (2014), é primordial buscar sempre o aumento na eficiência da utilização de nutrientes para assegurar produções mais sustentáveis. O N é um elemento

dinâmico, e uma parte considerável do que é aplicado no sistema produtivo, é perdido no ambiente. Essas perdas podem ser por volatilização, por desnitrificação e por lixiviação, isso sem sombra de dúvidas é uma grande preocupação, pois além de inferir diretamente na produtividade das lavouras, ainda gera impactos consideráveis ao meio ambiente. (Silva *et al.*, 2013; Rosário, 2013; Parreira *et al.*, 2015).

Nesse contexto, uma estratégia para aprimorar o uso de N e, assim como, reduzir a aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura, envolve a utilização de bactérias diazotróficas, que são capazes de promover a fixação biológica do nutriente. (Schultz *et al.*, 2012; Pereira *et al.*, 2013; Gírio *et al.*, 2015; Oliveira; Simões, 2016; Lopes *et al.*, 2019). A FBN envolve a conversão do N<sub>2</sub> presente na atmosfera em compostos nitrogenados na forma de amônia (NH<sub>3</sub>), certos procaríotos possuem a capacidade de transformar esse elemento em compostos assimiláveis pelas plantas (Marchetti; Barp, 2015).

Dentre tantos microrganismos conhecidos como eficientes na FBN, as bactérias do gênero *Azospirillum*, se destacam pela amplitude de ensaios, quando se trata da inoculação em gramíneas, e na cana-de-açúcar, diversos estudos têm demonstrado a eficácia da inoculação de *Azospirillum brasilense*, resultando num desenvolvimento das lavouras e conseqüentemente maiores produtividades (Moutia *et al.*, 2010; Serna-Cock *et al.*, 2011; Moura *et al.*, 2019).

O *Azospirillum brasilense* é considerado uma bactéria endofítica gram-negativa, que tem a capacidade de fixar N da atmosfera no solo, e colonizar todas as partes da planta, com ênfase nas raízes de diversas espécies de gramíneas (Bashan; Holguin, 1997), além disso são capazes de sintetizar diversas outras moléculas auxiliadoras no processo de crescimento dos vegetais, como os hormônios auxina, giberelina e citocinina, contribuem para a atividade de enzimas ajudando na mitigação de estresses, e na solubilização de fosfatos (Fukami *et al.*, 2018). Diferentemente do que acontece entre os rizóbios e as leguminosas, a associação entre o *Azospirillum brasilense* é do tipo associativa, ou seja, não depende do vegetal para sobreviver, por isso recebe o nome também de microrganismo de vida livre, essas não formam nódulos e atua diretamente na região da rizosfera dos vegetais. (Moreira *et al.*, 2010).

De acordo com Nakao *et al.* (2018), o *Azospirillum brasilense* é capaz de beneficiar as espécies gramíneas ao promover o desenvolvimento radicular, o que acaba por otimizar a exploração do solo e conseqüentemente melhora a absorção de água e nutrientes. Esses achados corroboram com os resultados de Aguirre *et al.* (2018), que observaram que o uso de *Azospirillum brasilense* promoveu o desenvolvimento de plantas de *Cynodon* (Coastcross) durante o verão da segunda safra, um ano após sua aplicação.

Urquiaga *et al.* (2012), apontam um incremento médio em torno 40 kg ha<sup>-1</sup> de N, nas lavouras de cana-de-açúcar, quando se faz uso das BPCV nos sistemas produtivos. Nesse contexto, a inoculação com BPCVs pode contribuir na produção de cana-de-açúcar de forma significativa, promovendo uma agricultura de menor impacto ambiental e maior rentabilidade ao possibilitar a redução do uso de fertilizantes nitrogenados (Gonçalves *et al.*, 2020).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em duas áreas experimentais de cana-de-açúcar, na região do Oeste do Estado de São Paulo, sendo a área 1 localizada na latitude 21°14'06.6''S, longitude 51°43'12.5''W com altitude de 359 m e a área 2 na latitude 21°00'20.0''S, longitude 51°33'09.9''W com altitude de 334 m. Os testes foram realizados no ano agrícola 2022/2023. O solo na área 1 foi classificado previamente como Latossolo Vermelho Amarelo de textura média e na área 2 como Latossolo Vermelho de textura arenosa (Santos *et al.*, 2018), ambos correspondendo a um Oxisoil (Soil Survey Division, 2014).

Para a caracterização inicial dos solos (Tabela 1) foram determinados os teores de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, pH e matéria orgânica (Raij *et al.*, 2001). Já as variáveis físicas consistiram na determinação da granulometria pelo método da sedimentação (Teixeira, 2017) os resultados estão descritos na Tabela 1. Ainda nesse momento, foram realizadas contagens da população microbiana, considerando os microrganismos diazotróficos presentes no solo, os resultados dessa contagem (área 1 e 2) estão na Tabela 2.

**Tabela 1** - Resultado da análise química e granulométrica do solo, em amostras coletadas em 0 – 20 cm de profundidade, na instalação do experimento nas duas áreas

Local	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC		
		g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>								
Área 1	5,8	25	3,4	0,6	21	8	16	0	29,6	45,6		
Área 2	5,2	19	3,4	1,5	25	7	19	0	31,5	50,5		
	V	m	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	areia	silte	argila	
	-----%-----		-----mg dm <sup>-3</sup> -----							----- g kg <sup>-1</sup> -----		
Área 1	65	0	14	0,4	1,9	23,9	24	0,8	806	29	165	
Área 2	62	0	14	0,3	1,6	35,3	29	1,2	837	42	121	

P, Ca, Mg e K: resina; S-SO<sub>4</sub>: Ca (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>; B: BaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O 0,125% micro-ondas. Cu, Fe, Mn e Zn; MO: matéria orgânica; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio.

Fonte: elaboração do próprio autor.

**Tabela 2** – Umidade do solo e bactérias diazotróficas em amostra de solo coletada na instalação da pesquisa no campo nas áreas 1 e 2.

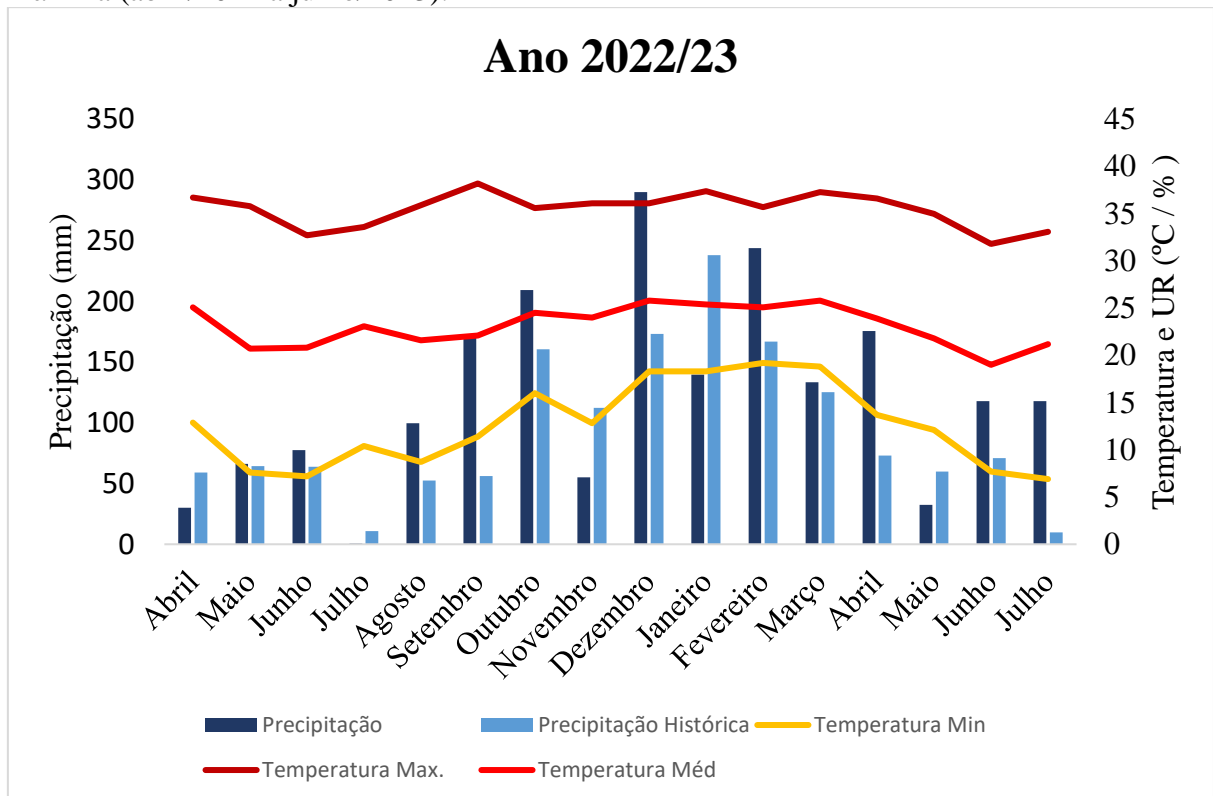
Identificação da amostra	Umidade do solo	Bactérias diazotróficas
	%	UFC g <sup>-1</sup> solo seco
Área 1	9,37	9,38 x 10 <sup>4</sup>
Área 2	9,05	2,63 x 10 <sup>5</sup>

UFC - Unidades Formadoras de Colônias; Kuykindall, 2005.

Fonte: elaboração do próprio autor.

O clima das duas localidades foi classificado como do tipo Aw conforme a classificação de Köppen (Alvares, 2013). Esse tipo de clima é caracterizado por estações de clima tropical, com inverno seco. As médias anuais de temperatura e precipitação são respectivamente, 24°C e 1.300 mm, os dados meteorológicos do período estão contidos na Figura 1.

**Figura 1** – Precipitação histórica e no período experimental, temperaturas mínima, média e máxima (abril/2022 a julho/2023).



Fonte: adaptado pelo próprio autor. Estação meteorológica da Unidade Sucoenergética Paulicéia-SP.

A instalação do experimento foi realizada nos meses de abril e junho de 2022. O delineamento experimental de ambas as áreas foi distribuído em blocos casualizados com 4 repetições. As variedades pesquisadas foram, RB 97 - 5242 na Área 1 e CTC 4 na área 2. A primeira apresenta uma alta produção de colmos por hectare, com expressivas taxas de conversão de açúcar, concentrando o maior teor de sacarose no final de safra. Além disso é uma variedade de ciclo médio-tardio, com adaptabilidade e considerável rusticidade. A variedade CTC 4, também tem como característica, uma boa produção de biomassa e açúcar por área plantada, entretanto essa é considerada de ciclo precoce, sendo indicada para colheitas no início de safra. Considerada uma variedade altamente versátil, é tolerante a ferrugem



alaranjada e a broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*), ela se destaca ainda pela qualidade de suas fibras, o que é uma característica desejada pela indústria, devido a facilidade no processamento (AFCRC, 2023).

As parcelas experimentais foram de 90 m<sup>2</sup>, formadas por 6 linhas de cana-de-açúcar, com 1,5 m nas entre linhas e 10 m de comprimento. Entre as parcelas houve o espaço de 2,0 m e entre blocos, a distância equivalente a duas linhas, que foi destinado como carreador.

Os tratamentos foram formados por cinco doses de uma solução inoculante contendo *Azospirillum brasilense*, cepas Ab-V5 e Ab-V6, na concentração de 2x10<sup>8</sup> UFC/mL, associados a 14 kg ha<sup>-1</sup> de N mineral e um tratamento controle (T1) com 28 kg ha<sup>-1</sup> de N mineral. As fontes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O no plantio utilizadas em T2, T3, T4, T5 e T6 foram, NPK 05-25-25 (275 kg ha<sup>-1</sup>) e Hiphós 28 (357 kg ha<sup>-1</sup>), o que forneceu a esses tratamentos 14 kg/ha de N e 169 kg/há de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Já em (T1), foram utilizadas as mesmas fontes e doses anteriores com a adição da ureia (31 kg ha<sup>-1</sup>) para o complemento de N, o que garantiu 28 kg/ha de N, e os mesmos 169 kg/há de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Em cobertura, aos 120 dias, foram aplicados 114,58 kg ha<sup>-1</sup> de KCl em todas as unidades experimentais. Essas doses foram adaptadas seguindo os padrões de recomendação para o plantio de cana-de-açúcar. Os dados mencionados estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Tratamentos com adubação nitrogenada associada a inoculação com *Azospirillum brasilense*.

Tratamentos	Fonte	Dose
T1	Controle	28 kg ha <sup>-1</sup> N; 0 Inoculante
T2	50% Nitrogênio/Sem Inoculante	14 kg ha <sup>-1</sup> de N; 0 Inoculante
T3	50% Nitrogênio + Inoculante	14 kg ha <sup>-1</sup> de N; 0,2 L ha <sup>-1</sup> Inoculante*
T4	50% Nitrogênio + Inoculante	14 kg ha <sup>-1</sup> de N; 0,4 L ha <sup>-1</sup> Inoculante*
T5	50% Nitrogênio + Inoculante	14 kg ha <sup>-1</sup> de N; 0,6 L ha <sup>-1</sup> Inoculante*
T6	50% Nitrogênio + Inoculante	14 kg ha <sup>-1</sup> de N; 0,8 L ha <sup>-1</sup> Inoculante*

Nota: \*Concentração de *Azospirillum brasilense* por mL 2x10<sup>8</sup> UFC/mL. UFC = Unidades Formadoras de Colônia.

Fonte: elaboração do próprio autor.

Os fertilizantes minerais foram aplicados manualmente no momento do plantio da cana-de-açúcar, logo em seguida foi realizada a aplicação da solução contendo o microrganismo, de forma manual, sobre os sulcos de plantio ainda abertos, com o auxílio de uma pisseta e imediatamente após cobertos com terra.

**Figura 2** – Instalação do experimento, aplicação das soluções inoculantes. A-) São João do Pau d’alho/SP, B-) Castilho/SP, 2022.



Fonte: foto do próprio autor.

**Figura 3** – Adubação de cobertura, aos 120 DAP, São João do Pau d’alho/SP, 2022.



Fonte: foto do próprio autor.

**Figura 4** – Adubação de cobertura, aos 120 DAP, Castilho/SP, 2022.



Fonte: foto do próprio autor.

As avaliações consistiram na interpretação do estado nutricional das plantas, concentração de macro e micronutrientes da parte aérea, estratificados em folha e planta inteira (folhas + colmo + pendão), extração de nutrientes, produção de massa fresca e seca total, produtividade de colmos, qualidade tecnológica da cultura, e avaliações visuais no decorrer do crescimento da cultura, descritos nos tópicos a seguir.

### **3.1 Estado nutricional das plantas por diagnose foliar**

O estado nutricional das plantas foi realizado por meio da análise foliar dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn). Foram coletadas 20 folhas +1 por parcela, utilizando-se os 30 cm centrais sem a nervura central, essa folha é definida como a primeira folha totalmente desenvolvida, abaixo de um ponto de referência na planta, a exemplo da cultura da cana-de-açúcar, é a folha completamente aberta com a extremidade do limbo bem destacada.

O teor de N foi determinado com digestão sulfúrica, seguido por titulação pelo método micro Kjeldahl e os teores de P, K, Ca, Mg e S por digestão nitroperclórica. As concentrações de P e S foram avaliadas com um espectrofotômetro de luz e as concentrações de K, Ca, Mg e e micronutrientes com um espectrofotômetro de absorção atômica, ambas análises desenvolvidas no laboratório de solos e fertilizantes da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas UNESP Dracena.

**Figura 5** – A-) Preparação das amostras de folha e planta para digestão. B-) Digestão sulfúrica do material (folha e planta inteira).



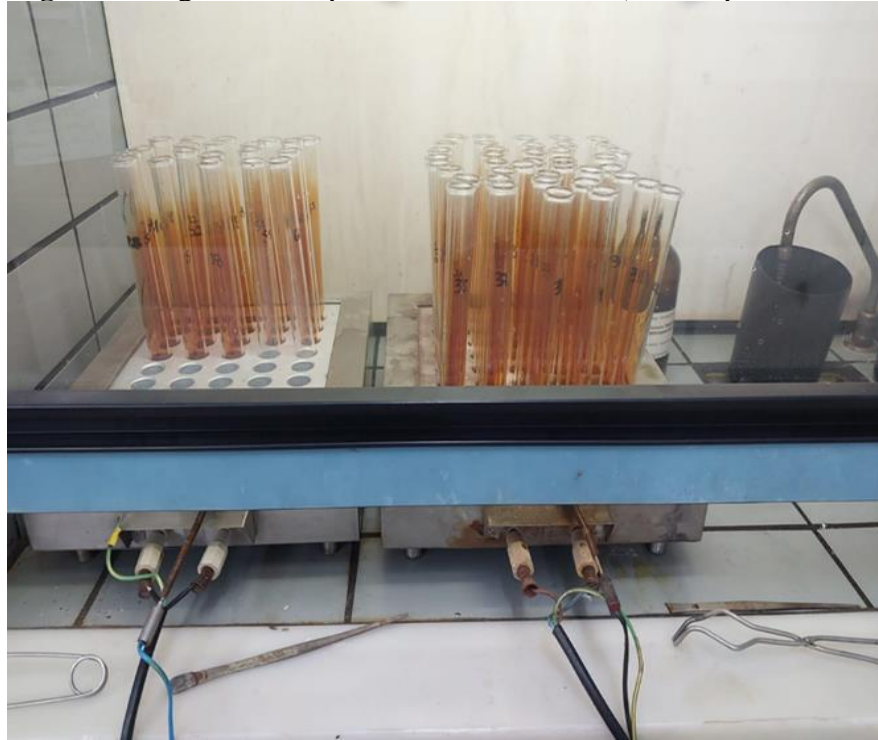
Fonte: foto do próprio autor.

**Figura 6** – A-) Destilação das amostras B-) Titulação pelo método micro Kjeldahl, para determinação de N em folha e planta inteira (folha + colmo + pendão).



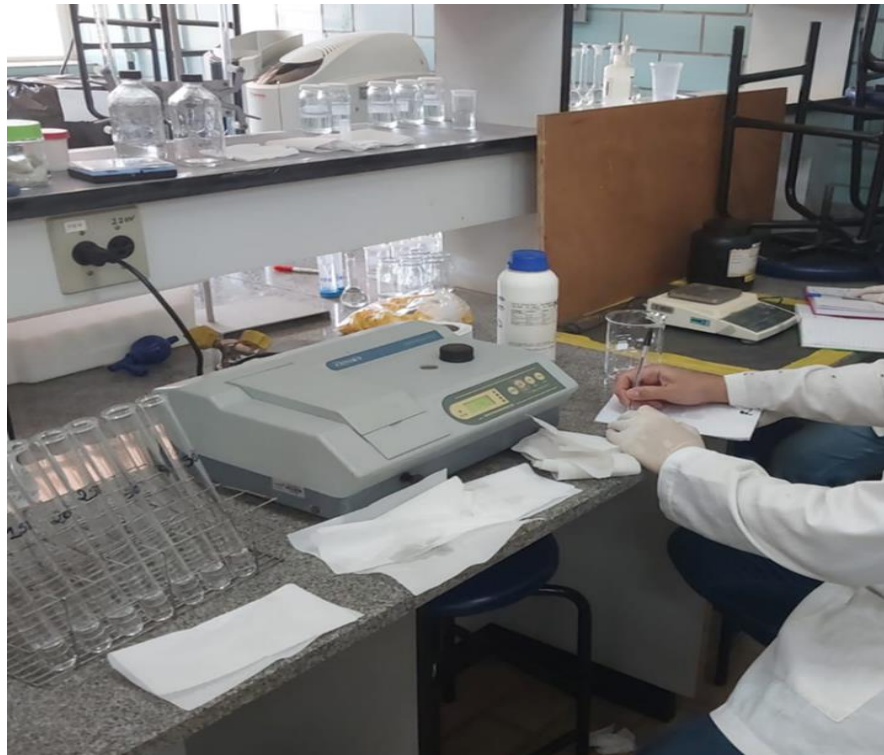
Fonte: foto do próprio autor.

**Figura 7-** Digestão nitroperclórica do material (folha e planta inteira).



Fonte: foto do próprio autor.

**Figura 8-** Determinação de P e S (foliar e planta inteira) pelo espectrofotômetro de luz.



Fonte: foto do próprio autor.

**Figura 9-** Determinação de Ca, Mg, K e Micro nutrientes (foliar e planta inteira) pelo espectro fotômetro de absorção atômica.



Fonte: foto do próprio autor.

### 3.2 Número e produção de colmos

As avaliações do número de colmos consistiram na contagem aos 90 e 150 dias, foram contados os colmos em três metros, nas quatro linhas centrais, descartando-se dois metros de bordadura sendo posteriormente calculado o número de colmos por hectare. A recomendação para a contagem de perfilhos de cana-de-açúcar aos 90 e 150 dias após o plantio fundamenta-se em estudos que apontam esses intervalos como fases-chave no ciclo de desenvolvimento da cultura, sendo que aos 90 dias, ocorre o perfilhamento ativo, fase em que a planta atinge o ápice na emissão e no desenvolvimento de perfilhos, já aos 150 dias, ocorre a estabilização do número de perfilhos, momento em que os perfilhos dominantes, funcionalmente viáveis, são mantidos, enquanto os não produtivos são naturalmente eliminados pela planta (Silva *et al.*, 2008).

A produção de colmos foi determinada pelo método da pesagem de 10 colmos cortados em sequência, nas quatro linhas centrais, totalizando 40 colmos por parcela, desconsiderando-se dois metros de bordadura, sendo posteriormente os valores transformados para toneladas por hectare.

**Figura 10** – Colheita e pesagem de colmos em cada unidade experimental.



Fonte: foto do próprio autor.

### 3.3 Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar

Foram separados 12 colmos de cana-de-açúcar por parcela, eliminando-se o palmito e folhas secas. As amostras foram encaminhadas ao laboratório das unidades sucroenergéticas para análise das condições tecnológicas. Foram determinadas as concentrações de Brix cana (Brx); Pol cana; Pureza cana (Prz), Fibra cana e ATR (Fernandes, 2011). Sendo:

Brix (Bj): a determinação do brix (teor de sólidos solúveis por cento, em peso, de caldo) foi realizada através de um refratômetro digital de leitura automática.

Fibra (F): a fibra da cana foi calculada através da equação:  $F = 0,08 \times PBU + 0,876$ . Onde: PBU = Peso úmido do bagaço da prensa.

Umidade % (U): foi calculada através da equação:  $U = (Pmu - Pms) / Pmu \times 100$ . Onde: Pmu= peso da massa úmida; Pms= peso da massa seca.

Pol do caldo (S): foi determinada através de sacarímetro digital automático. A pol do caldo (teor de sacarose aparente por cento, em peso, de caldo) foi calculada pela seguinte equação:  $S = LPol \times (0,26047 - 0,0009882 \times Bj)$ . Onde: LPol = Leitura sacarimétrica do caldo clarificado; e, Bj = Brix do caldo.

Pol da cana (PC): A pol da cana foi calculada através da equação:  $POL = S \times (1 - 0,01 \times F) \times C$ . Onde: S= Pol no caldo; F = Fibra; C = Coeficiente utilizado para a transformação da pol do caldo extraído pela prensa (S) em pol de cana (PC).

Pureza no caldo (Q): A pureza aparente do caldo (Q) por ser definida como a porcentagem de pol em relação ao brix, foi calculada pela equação:  $Q = 100 \times S/Bj$ . Onde: S= Pol do caldo; Bj= Brix no caldo.

Açúcares redutores do caldo % (AR): O teor de açúcares redutores (AR) por cento, em peso, de caldo foi calculado pela equação:  $AR = 3,641 - 0,0343 \times Q$ . Onde: Q = pureza no caldo.

Açúcar total recuperável (ATR): Obtidos a pol da cana (PC) e os açúcares redutores da cana (ARC), o ATR foi calculado pela equação:  $ATR = 9,526 \times PC + 9,05 \times AR$ .

#### 3.4 Produção de massa total, concentração e extração de nutrientes pela parte aérea da cana-de-açúcar

Para a determinação de massa fresca e seca total (MFT e MST) da parte aérea da cana-de-açúcar (folhas + colmo + pendão), foram coletadas seis plantas por parcela, essas subamostras também foram utilizadas para determinação do teor de nutrientes extraído com a produção de massa de planta inteira. O material foi previamente colhido, pesado e triturado em picador tipo noqueira. Em seguida, retirou-se uma subamostra por parcela, as mesmas foram pesadas e levadas para secagem em ventilação forçada (estufa a 65°C) até o peso constante. A partir desses resultados calculou-se a massa produzida por hectare.

As subamostras secas da planta inteira foram moídas em moinho tipo Willey para determinar as concentrações dos macros (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997). A extração de nutrientes da parte aérea se deu pela multiplicação dos resultados de massa seca pela concentração obtida de cada nutriente na planta inteira (folha + colmo + pendão).

#### 3.5 Análise Estatística

Os resultados obtidos foram testados quanto a sua normalidade (Shapiro Wilk) e posteriormente submetidos a análise de variância, quando houve efeito significativo as médias foram comparadas pelo teste Scott Knott com significância  $p \leq 0,01$ ,  $p \leq 0,05$  e  $p \leq 0,1$ .



Para as análises multivariadas foi utilizado o software |R (versão 4.3.2). Uma rede de correlação foi gerada usando a função “qgraph” do pacote “qgraph”, enquanto a análise de dendrograma foi realizada utilizando a técnica de clusterização (método de Ward), a partir dos pacotes “factorextra” e “gplot”.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4 estão descritas as médias de produção de matéria fresca e seca total, perfilhamento aos 90 e 150 dias e produtividade de colmos nas duas áreas experimentais. Houve diferença significativa na produção de matéria fresca e matéria seca total (área 1). Na produção de massa fresca total da parte aérea (MFTPA), a aplicação de 0,6 L ha<sup>-1</sup> da solução inoculante apresentou a maior produção, atingindo 216,3 t ha<sup>-1</sup>. Esses resultados corroboram com a literatura, que aponta o uso de inoculantes à base de bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) como uma prática eficaz para aumentar a produtividade em culturas como a cana-de-açúcar (Castro; Araújo, 2018).

A produção de massa fresca no tratamento T5 foi 34% superior ao tratamento T2, o *Azospirillum* pode estimular o crescimento vegetal por meio de mecanismos como a fixação biológica de N, produção de fitohormônios e solubilização de fosfatos (Bashan; Bashan, 2005; Hungria *et al.*, 2020). Na produção de massa seca total da parte aérea a maior produção foi em T1. Esses resultados são similares aos encontrados por Fukami *et al.* (2018), que relatam que doses excessivas de inoculantes podem ter efeitos antagônicos devido ao desequilíbrio na microbiota do solo ou ao aumento de substâncias inibidoras resultando em efeitos negativos na produção.

A produtividade de colmos nas duas áreas experimentais foi superior a média regional, que na safra 2022/2023 foi de 80,47.719 TCH (Toneladas de Colmos por Hectare) em cana planta (Estado, 2024), como já esperado a cana planta tende a apresentar os melhores resultados em produtividade, o que tende a decrescer nas demais safras (Casaroli *et al.*, 2015).

**Tabela 4** - Produção e perfilhamento de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano agrícola 2022-2023.

Trat.	MF total	MS total	Perf. 90 dias	Perf. 150 dias	Prod. Colmos	Incremento em TCH em relação a T1
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----		-----Nº/m-----		TCH	%
	Área 1					
T1	190,67b	63,07a	22,44	13,69	150,15	-
T2	160,42b	39,84c	21,31	13,52	151,67	1,01
T3	185,17b	49,73b	21,86	14,12	161,06	7,23
T4	186,40b	49,70b	21,29	12,90	171,00	13,89
T5	216,33a	52,20b	19,69	13,06	156,29	4,09
T6	177,42b	43,65c	20,81	13,81	157,21	4,70
Pr > Fc	°	**	ns	ns	ns	
Média	186,04	49,70	21,23	13,52	157,90	
CV %	10,31	5,45	6,24	6,42	6,80	
	Área 2					
T1	171,72	40,52	26,52	20,04	158,96	-
T2	175,27	38,20	25,04	20,46	163,34	2,76
T3	180,99	40,69	26,02	21,29	172,92	8,78
T4	186,75	42,45	23,19	19,54	178,96	12,58
T5	184,67	40,21	24,60	19,46	175,21	10,22
T6	201,43	39,06	23,96	18,35	180,83	13,76
Pr > Fc	ns	ns	ns	ns	ns	
Média	183,47	40,19	24,89	19,86	171,70	
CV %	8,38	8,21	9,22	7,86	11,75	

Letras diferentes indicam significância entre os tratamentos. (Scott-Knott) \*\*, °, e ns indicam  $p < 0,01$ ,  $p < 0,1$  e não significativo respectivamente. Fonte: elaboração do próprio autor.

Na Tabela 5 estão descritos os resultados das análises tecnológicas da cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. As variáveis tecnológicas (Tabela 5), não responderam em função dos tratamentos em nenhuma das áreas estudadas. Esses resultados são reforçados por Scudeletti *et al.* (2023), que ao avaliar a aplicação de *Azospirillum brasilense* em cana planta e primeira soca não observou incremento significativo nas variáveis tecnológicas da cultura. Todavia os dados relacionados as variáveis tecnológicas, estão de acordo com o os recomendados por (Ripoli; Ripoli, 2004).

Na análise das variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar, a inoculação com *Azospirillum brasilense* revela efeitos variados, com frequência sem impacto expressivo em indicadores como teor de sacarose, ° Brix ou eficiência na recuperação de açúcar (Bashan *et al.*, 2014). Esse desempenho inconsistente pode estar relacionado as condições edafoclimática das áreas, além de práticas de manejo que influenciam o desempenho do inoculante (Souza; Ambrosini, 2015). Pesquisas indicam que o efeito de *Azospirillum* pode ser restrito pela disponibilidade de nutrientes e pela interação com microrganismos nativos, que afetam a absorção e a eficiência nutricional da planta (Cassán *et al.*, 2020).

**Tabela 5** - Análise tecnológica de colmos de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano agrícola 2022-2023.

Trat.	Brix °	Pol -----	Pureza %	Fibra -----	ATR kg t <sup>-1</sup>	ATR t ha <sup>-1</sup>
Área 1						
T1	14,53	14,57	86,22	11,11	126,06	18,93
T2	14,61	14,28	83,79	11,24	124,00	18,74
T3	13,62	13,15	83,18	10,89	115,47	18,55
T4	14,62	14,10	83,47	10,72	123,66	21,15
T5	14,21	14,16	85,65	11,15	122,71	19,15
T6	14,37	14,36	85,87	11,07	124,06	19,66
Pr > Fc	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Média	14,32	14,10	84,70	11,03	122,72	19,36
CV %	4,71	6,72	2,45	3,38	5,71	9,75
Área 2						
T1	18,32	13,44	86,38	11,26	135,01	21,48
T2	18,78	13,77	85,93	11,54	138,05	22,55
T3	18,10	13,18	85,42	11,62	132,43	23,08
T4	18,94	13,77	85,97	12,06	137,99	24,67
T5	18,71	13,71	85,83	11,58	137,48	23,99
T6	18,12	13,34	86,58	11,75	133,67	24,19
Pr > Fc	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Média	18,49	13,53	86,02	11,64	135,77	23,33
CV %	6,70	6,75	1,83	5,56	6,28	14,41

Comparação de médias por Scott-Knott, ns indica Pr > Fc não significativo.

Fonte: elaboração do próprio autor.

Na Tabela 6 estão apresentadas as concentrações médias de nutrientes na diagnose foliar da cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Na área 1, responderam significativamente a solução inoculante os nutrientes P, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn, já na área 2, as respostas foram encontradas em P, Cu, Fe e Mn (Tabela 6). As respostas obtidas com o P em ambas as áreas podem ser atribuídas à habilidade do *Azospirillum* de promover o crescimento radicular, o que aumenta a área de exploração do solo e, conseqüentemente, a absorção de P, que é um nutriente relativamente imobilizado no solo (Pii *et al.*, 2015). Além disso, *Azospirillum* pode liberar ácidos orgânicos e fosfatases que solubilizam o P do solo, tornando-o mais disponível para a planta (Rodriguez *et al.*, 2006). Alguns autores relatam, que o *Azospirillum* pode atuar de maneira sinérgica com fertilizantes fosfatados, potencializando a eficiência de uso do P aplicado, o que é crucial para culturas como a cana-de-açúcar, que têm alta demanda por este nutriente (Hungria *et al.*, 2015).

**Tabela 6** - Concentração de macro e micronutrientes na diagnose foliar (folha +1) de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano Agrícola, 2022-2023.

Trat.	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>			
	Área 1									
T1	15,61	1,64a	7,97	4,57b	1,62a	1,44a	5,72a	77,02b	67,32a	16,71b
T2	15,61	1,64a	8,33	4,35b	1,72a	1,35a	1,29e	82,21a	62,11a	19,15b
T3	16,61	1,52b	8,48	4,92a	1,83a	1,39a	2,01d	84,92a	63,26a	19,75b
T4	16,05	1,48b	8,19	4,35b	1,77a	1,20a	3,43b	81,38a	55,19a	15,50b
T5	16,64	1,54b	8,73	4,73a	1,63a	1,42a	3,85b	85,65a	63,73a	26,76a
T6	16,48	1,74a	8,43	4,93a	1,87a	1,29a	2,77c	73,05b	62,48a	17,35b
Pr > Fc	ns	°	ns	°	**	*	**	°	*	**
Média	16,17	1,59	8,36	4,64	1,74	1,35	3,18	80,82	62,35	19,20
CV %	5,18	7,53	4,46	7,48	4,87	7,52	9,44	7,73	7,24	11,65
	Área 2									
T1	15,36	1,78b	6,47	5,09	2,60	1,05	4,18a	108,29a	98,95a	16,92
T2	15,12	1,84b	5,86	4,51	2,63	0,97	4,59a	84,88b	61,35b	14,97
T3	14,75	1,98a	7,24	4,88	2,71	1,07	4,88a	101,85a	86,76a	18,60
T4	14,83	1,70b	6,06	4,65	2,38	1,40	2,38b	82,71b	67,86b	16,05
T5	14,88	2,06a	6,74	4,06	2,43	1,14	3,04b	107,70a	65,93b	16,00
T6	15,18	1,96a	6,82	4,28	2,56	1,24	2,30b	89,68b	69,86b	13,24
Pr > Fc	ns	°	ns	ns	ns	ns	**	**	**	ns
Média	15,02	1,89	6,53	4,58	2,55	1,15	3,56	95,85	75,12	15,96
CV %	6,15	9,50	12,61	21,13	8,26	23,49	15,74	9,98	13,67	18,35

Letras diferentes indicam significância entre os tratamentos. (Scott-Knott) \*\*, \*, °, e ns indicam p <0,01, p <0,05, p <0,1 e não significativo respectivamente.

Fonte: elaboração do próprio autor.

As concentrações de Ca na área 1, foram estatisticamente superiores a T1, em T3, T5 e T6. Já em Mg e S não foi possível observar diferença significativa entre os tratamentos, (Tabela 6). Ainda na área 1, a concentração de Cu em folha em T1 foi significativamente superior a todos os demais tratamentos, já na área 2, T1 se igualou estatisticamente a T2 T3. O comportamento observado para o Cu, pode ser explicado pela possível saturação dos sítios de absorção ou pela alteração na disponibilidade do Cu no solo em função das atividades microbianas induzidas pelo *Azospirillum brasilense*, esse tem a capacidade de influenciar a disponibilidade de Cu em menor escala do que o N mineral, exercendo um impacto direto na absorção de vários micronutrientes (Rengel, 2015). A diminuição da concentração de Cu em doses superiores pode indicar que o aumento da população microbiana pode ter levado à imobilização do Cu no solo ou à competição entre microrganismos e plantas pelo elemento, o que diminui sua disponibilidade para as plantas (Pii *et al.*, 2015). Além disso, o Cu é um micronutriente essencial para muitas funções enzimáticas, mas sua absorção pode ser limitada pela presença de altos níveis de P ou outros elementos antagonistas (Marschner, 2012).

O Fe apresentou diferença significativa em ambas as áreas estudadas, sendo na área 1 os tratamentos T2, T3 T4 e T5 superiores a T1 e T6, já na área 2 as maiores concentrações foram observadas nos tratamentos T1, T3 e T5, diferindo estatisticamente dos demais. É observado que o T6 respondeu abaixo dos demais nas duas áreas, isso demonstra que doses elevadas do inoculante podem reduzir a concentração do elemento nas folhas da cana-de-açúcar, esse padrão pode estar relacionado à produção de sideróforos pelo *Azospirillum*, que quando produzidos excessivamente, podem limitar a disponibilidade do nutriente para as plantas (Bashan *et al.*, 2014). O Mn respondeu significativamente a aplicação do inoculante em ambas áreas. Na área 1 não houve diferença entre os tratamentos, já na área 2 os tratamentos T1 e T3 diferenciaram estatisticamente dos demais. Já para o Zn, a única resposta significativa foi observada em T5 (0,6 L ha + meia dose da adubação mineral) na área 1.

A concentração foliar de Fe e Zn ficaram dentro da faixa adequada para cana-de-açúcar, sendo estas defendidas por outros autores em: Fe (40,0 – 250,0 mg kg<sup>-1</sup>) e Zn (10,0 – 50,0 mg kg<sup>-1</sup>), para o Mn, as concentrações ficaram acima da faixa adequada sendo essa de (10,0 – 50,0 mg kg<sup>-1</sup>), já o Cu esteve abaixo em todas as situações (6,0 – 15,0 mg kg<sup>-1</sup>); Cantarella *et al.*, 1997).

Na Tabela 7 estão apresentadas as concentrações médias de nutrientes em planta inteira (folhas + colmos + pendão) de cana-de-açúcar nas duas áreas experimentais. Em relação a concentração de macro e micronutrientes na planta inteira na área 1, todos os elementos analisados responderam de forma significativa a utilização de BPCV, já na área 2, somente N e Cu não responderam a utilização da solução inoculante (Tabela 7).

Na área 1 a concentração de N foi significativamente ( $p \leq 0,1$ ) superior a T1, em T3, T5 e T6, sendo os dois últimos, as maiores doses da solução inoculante, resultados que estão em consonância com estudos recentes que indicam que a inoculação com *Azospirillum* pode promover o crescimento e a nutrição das plantas, especialmente em culturas de importância econômica como a cana-de-açúcar (Hungria *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2020).

Nas concentrações de P área 1, não houve diferença significativa entre os tratamentos, já na área 2, foi possível observar respostas significativas ( $p \leq 0,05$ ) com a aplicação da BPCV. A maior concentração na área 2 foi em T5, demonstrando que a BPCV favorece a absorção desse importante nutriente. K foi influenciado positivamente por T5 (0,6 L ha<sup>-1</sup> da solução inoculante) na área 1, e por T5 e T6 (0,6 e 0,8 L ha<sup>-1</sup> da solução inoculante), na área 2. Em ambos os casos, concentrações maiores do que o verificado no controle.

O efeito positivo observado em T5 e T6 para P e K são consistentes com estudos que mostram que *Azospirillum* pode promover o crescimento radicular e melhorar a solubilização

de nutrientes no solo, facilitando sua absorção (Cassán *et al.*, 2020). A habilidade do *Azospirillum* em aumentar a eficiência de uso de P, em particular, é bem documentada, sendo atribuída à produção de fitohormônios e à facilitação da absorção de nutrientes (Hungria *et al.*, 2015).

Na área 1, Ca em planta inteira não foi influenciado pela utilização da solução inoculante com *Azospirillum brasilense*, com as estratégias adotadas em T2, T3, T4 e T6 em relação a T1, já na área 2, as concentrações médias observadas em T3, T5 e T6 se igualaram estatisticamente a T1. Isso sugere que o efeito do *Azospirillum* sobre a absorção de Ca pode ser limitado ou dependente de outros fatores, como a disponibilidade do nutriente no solo ou a interação com outros microrganismos presentes (Bashan *et al.*, 2014). Analisando as respostas de Ca na área 2, onde na ausência de BPCV (T2) e na aplicação de T4 (0,4 L ha<sup>-1</sup> do inoculante), verificou-se redução na concentração dos elementos na comparação com T1, reforçando outros resultados encontrados até aqui, possivelmente em T4 ocorreu algum fator externo que interferiu nos resultados.

Mg sofreu influência significativa nas duas áreas estudadas, entretanto na área 2, não foram observadas diferenças entre os tratamentos. Já na área 1, T5 condicionou a maior concentração para esse elemento, sendo essa estratégia, significativamente superior a todas demais. Estes resultados corroboram estudos que mostram que a inoculação com *Azospirillum* pode melhorar a absorção de nutrientes secundários, como o Mg, possivelmente através de alterações na microbiota do solo ou na rizosfera (Rashid *et al.*, 2016).

Na área 1, as concentrações de S observadas na planta inteira, foram estatisticamente iguais a T1 em todas as doses da solução, já na área 2, o T2 (metade da dose nitrogenada) foi o único a responder de maneira inferior aos demais tratamentos. Isso pode indicar que a disponibilidade de S no solo não foi limitante ou que *Azospirillum* tem uma influência limitada na absorção deste nutriente específico. Essa constatação é apoiada por estudos que mostram que, embora *Azospirillum* possa melhorar a absorção de alguns nutrientes, sua eficácia pode variar conforme o nutriente e as condições edafoclimáticas (Calvo *et al.*, 2014).

Considerando os teores de micronutrientes observados em planta inteira nas áreas 1, Cu e Zn responderam de maneira semelhante, sendo observada as maiores concentrações médias desses elementos em T1 e T5, novamente T5 sendo o único a se igualar a T1. Com relação ao Fe, os tratamentos não diferiram entre si, já em Mn, a concentração em planta observada em T5, foi significativamente superior aos demais.

**Tabela 7** - Concentração de macro e micronutrientes em planta inteira (folhas + colmos + pendão) de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano Agrícola, 2022-2023.

Trat.	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>			
Área 1										
T1	5,85b	1,07a	2,18c	2,29a	1,16b	0,83a	4,58a	88,99a	101,45b	15,33a
T2	5,56b	0,98a	3,35b	1,48b	1,01b	0,63a	2,86b	82,53a	67,99b	12,13b
T3	7,02a	0,90a	1,60d	1,49b	0,97b	0,75a	2,87b	74,42a	86,63b	13,04b
T4	5,45b	1,19a	2,77b	1,68b	0,93b	0,87a	2,83b	92,17a	80,64b	13,06b
T5	8,16a	1,41a	6,44a	2,28a	1,51a	0,86a	4,88a	84,29a	131,34a	17,85a
T6	6,94a	1,18a	2,87b	1,85b	1,07b	0,79a	2,89b	90,35a	92,74b	14,02b
Pr > Fc	0,068 <sup>o</sup>	0,0015**	0,00**	0,00**	0,00**	0,005**	0,00**	0,008**	0,00**	0,00**
Média	6,50	1,12	3,20	1,84	1,11	0,79	3,48	85,46	93,46	14,24
CV %	20,21	12,25	8,56	11,92	12,12	10,15	11,19	6,97	9,04	10,34
Área 2										
T1	5,25	1,18b	3,44b	1,73a	1,19a	0,80a	3,52	136,96a	72,29a	12,11a
T2	4,60	1,15b	3,14b	1,10b	0,94a	0,58b	2,99	99,24b	48,812a	13,58a
T3	4,98	1,29b	3,57b	1,78a	1,23a	0,85a	3,90	122,23a	66,56a	12,75a
T4	4,75	1,09b	2,52b	1,23b	0,85a	0,91a	2,80	97,90b	39,69a	7,97b
T5	5,05	1,58a	4,87a	1,67a	1,06a	0,92a	3,50	126,75a	52,99a	12,25a
T6	5,35	1,27b	4,24a	1,82a	1,26a	0,94a	4,03	128,91a	59,52a	13,58a
Pr > Fc	0,8164 <sup>ns</sup>	0,018*	0,00**	0,03*	0,012**	0,0471*	0,168 <sup>ns</sup>	0,00**	0,014**	0,00**
Média	4,99	1,26	3,63	1,55	1,09	0,83	3,46	118,67	56,64	12,00
CV %	17,22	13,91	15,50	21,75	14,62	19,03	20,83	7,30	20,69	12,23

Letras diferentes indicam significância entre os tratamentos. (Scott-Knott) \*\*, \*, °, e ns indicam p <0,01, p <0,05, p <0,1 e não significativo respectivamente.

Fonte: elaboração do próprio autor.

Para os micronutrientes em planta inteira analisados na área 2, somente o Cu não respondeu de maneira significativa a aplicação do inoculante. No que tange o Mn, não foi observada diferença entre os tratamentos. Em contrapartida, a concentração de Fe em planta inteira, foi influenciada pela utilização das BPCV, as respostas obtidas em T3, T5 e T6 foram estatisticamente iguais a T1, esse elemento tem uma dinâmica complexa no solo, assim como uma baixa mobilidade, o que torna sua absorção dependente de fatores como o pH do solo e a presença de sideróforos produzidos por microrganismos (Pii *et al.*, 2015).

Já para o Zn, a concentração obtida em T4 foi a única a performar significativamente abaixo das demais, A absorção de Zn pode ser favorecida pela exsudação de compostos que aumentam sua disponibilidade no solo, mas essa resposta limitada também sugere que o *Azospirillum* pode ter uma influência específica e dose-dependente na mobilização e absorção de Zn (Rengel, 2015). As respostas obtidas nesses metais, são reforçadas por alguns estudos, onde foi relatado que o *Azospirillum* pode melhorar a disponibilidade de micronutrientes

através da produção de sideróforos, moléculas que quelatam metais no solo e facilitam sua absorção pela planta (Spaepen *et al.*, 2009).

Na Tabela 8 estão descritas as extrações médias de macro e micronutrientes da parte aérea da cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. A extração de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn na área 1 foram responsivas a aplicação conjunta de microrganismos + metade da adubação mineral nitrogenada, o mesmo aconteceu na área 2 com exceção do N e Cu (Tabela 7).

**Tabela 8** - Extração de macro e micronutrientes pela cana-de-açúcar em duas áreas experimentais. Ano Agrícola, 2022-2023.

Trat.	kg ha <sup>-1</sup>					g ha <sup>-1</sup>				
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
Área 1										
T1	290,25a	52,87c	108,22c	113,48b	57,59b	41,30a	227,19a	4412,04a	5029,36b	759,27a
T2	222,98a	39,03c	133,11b	58,86c	40,13b	24,99b	114,00b	3291,48a	2719,98c	485,01b
T3	351,78a	44,60c	80,49c	74,67c	48,37b	37,08a	143,66b	3720,77a	4322,43b	649,73b
T4	269,59a	59,79b	137,32b	83,16c	46,29b	43,30a	140,82b	4583,85a	4009,41b	651,68b
T5	425,68a	73,41a	336,19a	119,36a	79,37a	44,87a	256,04a	4404,02a	6861,64a	932,90a
T6	304,19a	51,33c	124,95b	80,35c	46,45b	34,53a	126,01b	3942,82a	4034,48b	611,39b
Pr > Fc	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Média	310,74	53,34	153,38	88,31	53,03	37,68	167,95	4059,16	4496,22	681,66
CV %	21,22	11,34	8,88	13,72	16,57	11,11	15,66	10,82	11,59	13,34
Área 2										
T1	213,97	47,59b	139,67a	70,27a	48,00a	32,34a	143,06	5543,46a	2931,63a	491,55a
T2	175,99	44,07b	119,51a	41,70b	35,37b	21,91b	115,27	3786,44b	1846,33b	511,317a
T3	202,35	52,66b	145,34a	72,75a	49,96a	34,61a	160,93	4990,86a	2727,80a	520,05a
T4	201,00	46,31b	106,32a	51,39b	35,87b	38,68a	117,05	4148,90b	1666,84b	335,96b
T5	202,82	63,27a	194,97a	68,04a	42,87a	36,83a	140,10	5122,23a	2176,21b	492,48a
T6	209,23	49,29b	165,48a	70,96a	48,82a	36,80a	157,69	5029,46a	2309,04b	531,60a
Pr > Fc	ns	°	**	*	*	*	ns	**	*	*
Média	200,89	50,53	145,22	62,52	43,48	33,53	139,02	4770,22	2276,31	480,49
CV %	20,15	16,93	15,70	23,80	15,57	21,06	23,87	11,70	23,56	16,05

Nota: Letras diferentes indicam significância entre os tratamentos. (Scott-Knott) \*\*, \*, °, e ns indicam p <0,01, p <0,05, p <0,1 e não significativo respectivamente. Fonte: elaboração do próprio autor.

Para o N, não foi observada diferença significativa entre os tratamentos, no entanto o T5, contribuiu de maneira significativa nas extrações de P, K, Ca, Mg, sendo as médias desse tratamento superiores a T1 em ambas as áreas para a extração de P, demonstrando o potencial do *Azospirillum* em aumentar a eficiência do uso de fertilizantes. Esta combinação sugere que o *Azospirillum* pode melhorar a disponibilidade e absorção de P, possivelmente através da promoção do crescimento radicular, melhor exploração do solo e potencial aumento na solubilização (Teixeira Filho; Galindo, 2019; Almeida *et al.*, 2022). Pesquisa realizada por



Hungria *et al.* (2015) mostrou que o uso de *Azospirillum* em culturas como o milho e a cana-de-açúcar pode aumentar a eficiência na extração de N e P, reduzindo os custos com fertilizantes e os impactos ambientais

Na área 1, para o K, Ca e Mg a maior extração foi com a aplicação de T5, essa diferindo dos demais. Na área 2 não houve diferença significativa entre os tratamentos para o K, já para o Ca e Mg as maiores extrações foram em T1, T3, T5 e T6 (Tabela 7). Essa maior extração de K na área 1 pode estar relacionada à capacidade do *Azospirillum brasilense* de promover o crescimento radicular e aumentar a superfície de absorção, o que é particularmente importante para a absorção de K, um nutriente móvel no solo e essencial para várias funções fisiológicas, incluindo a regulação osmótica e a ativação enzimática (Cassán *et al.*, 2014). Não houve diferenças significativas entre os tratamentos na extração de S, em nenhuma das áreas.

Embora o comportamento das respostas observadas para Ca, Mg e S sejam consistentes com as tendências de concentrações observadas, a capacidade do microrganismo de sustentar esses níveis de extração sugere que o inoculante pode ser utilizado como uma ferramenta para estabilizar a nutrição das plantas, mesmo em cenários onde a disponibilidade de nutrientes no solo é limitante (Dourado *et al.*, 2020).

Quanto a extração de micronutrientes, as respostas foram significativas em Cu, Fe, Mn e Zn na área 1, e Fe, Mn e Zn na área 2. Na área 1 a extração de Cu e Zn, apresentaram comportamentos semelhantes, sendo o T5, o único a responder igualmente a T1 (controle). Já na área 2 para a extração de Zn, o T4 foi o único a responder de maneira diferente e inferior aos demais.

Na extração de Mn área 1, o tratamento T5 foi estatisticamente superior a todos os demais, já na área 2, o T3 respondeu estatisticamente igual a T1, sendo nesse observado as maiores extrações. Na extração de Fe, não foi encontrada diferença significativa entre os tratamentos na área 1, em compensação, na área 2, as menores extrações para esse elemento foram observadas em T2 e T4. Os resultados referentes ao Fe nas duas áreas, sugere que embora o *Azospirillum* possa melhorar a extração de Fe, a sua eficácia pode ser limitada em comparação com fertilizantes minerais tradicionais, essa limitação pode estar associada à forma como o Fe está disponível no solo e à capacidade da planta de translocá-lo após a absorção (Rengel, 2015). Os resultados para Fe e Zn são particularmente relevantes, uma vez que esses micronutrientes desempenham papéis cruciais em processos bioquímicos e fisiológicos, como a fotossíntese e a síntese de clorofila, que são vitais para o crescimento saudável da cana-de-açúcar (Broadley *et al.*, 2012).

Para a análise multivariada, não foram consideradas a divisão e as características das áreas, somente as variáveis analisadas em questão e suas relações com os tratamentos aplicados. Os resultados estão descritos nas Figuras 11 e 12.

Na rede de correlações, Figura 11, nota-se a concretização de situações já esperadas, como na relação entre ATR kg ha<sup>-1</sup>, Brix e Pol, essas variáveis apresentaram, respectivamente, uma correlação forte positiva (ATR kg ha<sup>-1</sup> – Brix 0,92; ATR kg ha<sup>-1</sup> - POL 0,99 e Brix – POL 0,86). Essa correlação sugere que, melhorias em uma podem influenciar positivamente as outras, refletindo na eficiência da produção, onde o aumento do teor de sólidos solúveis e a pureza aumentam a recuperação de açúcar (ATR). Esses dados são reforçados pela literatura, que aponta uma relação direta entre essas variáveis para a eficiência da produção de açúcar (Cantarella *et al.*, 2007).

A produtividade de colmos e ATR t ha<sup>-1</sup>, também estiveram fortemente ligados com uma relação positiva de 0,86, indicando que a quantidade de biomassa está diretamente relacionada ao ATR ha<sup>-1</sup> (Figura 2). Segundo Prado, Caione e Campos (2011), essa sinergia pode ser maximizada por meio de manejos adequados de nutrientes e práticas agrícolas que promovam o desenvolvimento da planta.

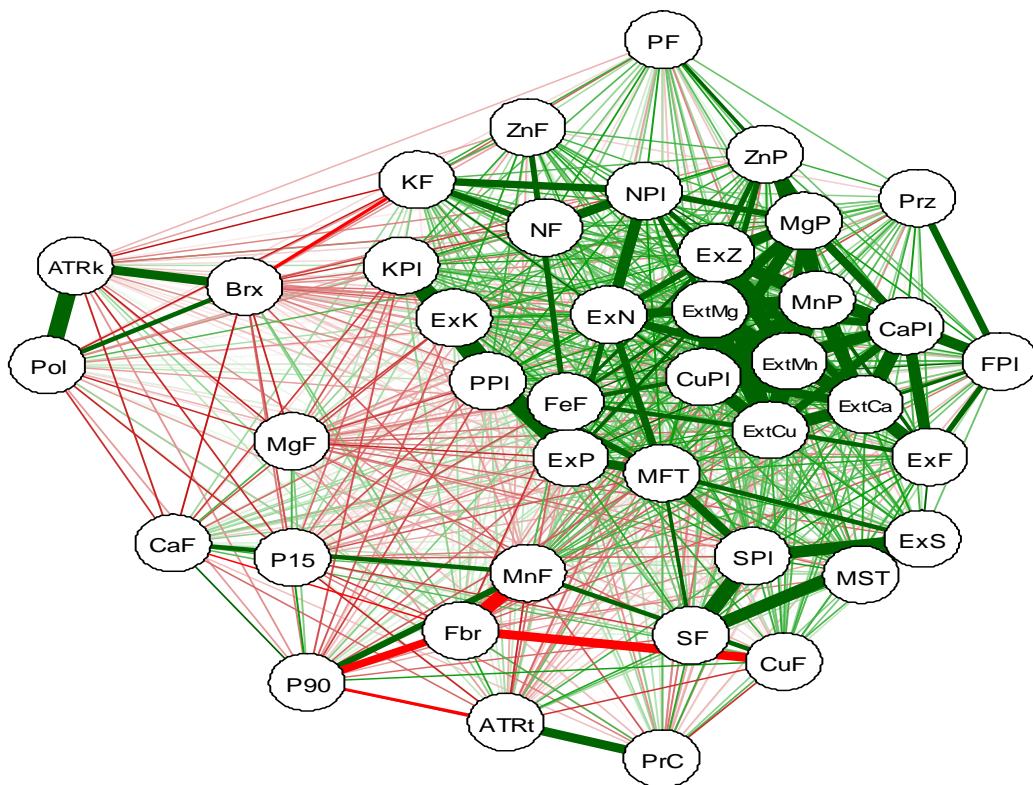
Relações negativas foram observadas em fibra cana (Fbr), sendo desfavorável ao acúmulo de Cu e Mn nas folhas (CuF e MnF) com valores de correlação de -0,96 e -0,91 respectivamente, e no perfilhamento de colmos aos 90 dias (P90) com correlação de -0,90, ambos os casos, correlações fortes e negativas (Figura 2). Isso indica que o aumento da fibra pode estar associado a uma menor disponibilidade ou absorção desses micronutrientes, o que pode impactar o desenvolvimento das plantas, entretanto o excesso de fibra é um fator limitante na qualidade da matéria-prima para fins industriais (Souza *et al.* 2017).

Em relação ao N, o comportamento NF - K folha (KF) fortemente correlacionados (0,88). A extração de N (ExN) mostrou-se fortemente associada à extração de diversos micronutrientes (Figura 2), evidenciando uma relação benéfica, condizente com o papel do N na promoção da absorção e mobilização de outros nutrientes essenciais.

O dendrograma resultante, apresentado na Figura 12, demonstra a estrutura hierárquica dos agrupamentos. As observações foram agrupadas em 2 clusters, definidos de acordo com o ponto de corte estabelecido pela análise. Esse ponto de corte foi determinado com base na inspeção visual do dendrograma e na análise da consistência dos agrupamentos. Os grupos que exibiram maior incidência de padrões claros foram tratamentos T2 e T4 (meia dose de N mineral e meia dose de N mineral + 0,4 L da solução inoculante respectivamente), com outro corte para os tratamentos T5, T1 e T3.

Destaca-se a proximidade entre T1 (controle) e T5 (aplicação de 0,6 L ha<sup>-1</sup> da solução inoculante) como um agrupamento superior aos demais. Esse resultado indica que a aplicação de inoculante cria condições muito semelhantes às obtidas com a aplicação convencional de fertilizantes minerais, sugerindo que os inoculantes podem ser tão eficazes quanto os fertilizantes minerais, apontando para práticas mais sustentáveis (Prado; Caione; Campos, 2011).

**Figura 11** - Rede de correlação ponderada, elaborada no programa estatístico R. Conexões vermelhas representam relações negativas, e as verdes, relações positivas. As diferentes espessuras das conexões indicam a intensidade da relação entre as variáveis.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

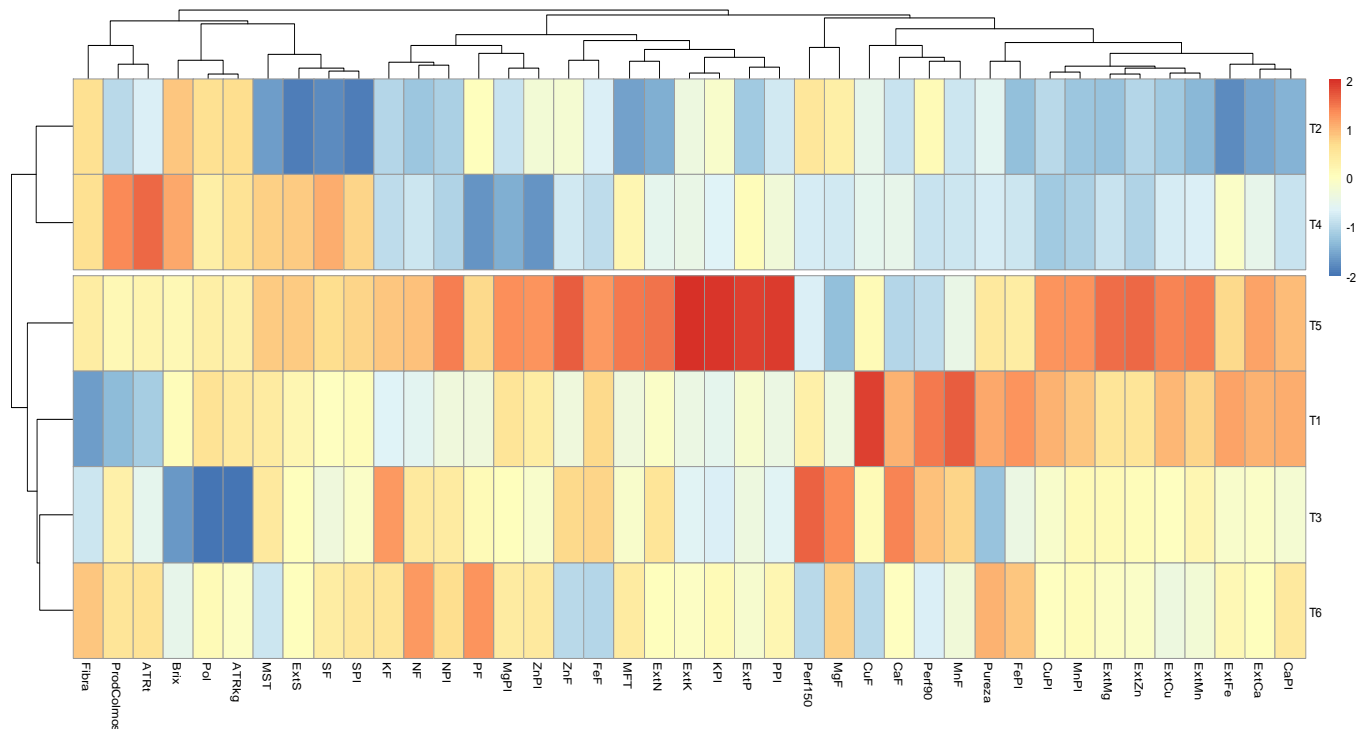
O dendrograma resultante, apresentado na Figura 5, demonstra a estrutura hierárquica dos agrupamentos. As observações foram agrupadas em dois clusters, definidos de acordo com o ponto de corte estabelecido pela análise. Esse ponto de corte foi determinado com base na inspeção visual do dendrograma e na análise da consistência dos agrupamentos.

Os grupos formados, exibem padrões claros em T2 e T4 (18 kg ha<sup>-1</sup> de N mineral e 18 kg ha<sup>-1</sup> de N mineral + 0,4 L da solução inoculante respectivamente), com outro corte para os

demais tratamentos. Evidenciando novamente a influência de fatores externos em T4, que possivelmente condicionou as respostas nesse tratamento.

Destaca-se a proximidade entre T1 (controle) e T5 (aplicação de 0,6 L ha<sup>-1</sup> da solução inoculante) como um agrupamento superior aos demais. Esse resultado indica que a aplicação de inoculante cria condições muito semelhantes às obtidas com a aplicação convencional de fertilizantes minerais, sugerindo que os inoculantes podem ser tão eficazes quanto os fertilizantes minerais, apontando para práticas mais sustentáveis (Prado; Caione; Campos, 2011).

**Figura 12** - Representação hierárquica de agrupamentos (dendrograma), elaboradas no programa estatístico R. A proximidade entre pontos indica similaridade, já as ramificações representam a formação de clusters ou grupos, com a altura das conexões indicando a distância entre os elementos agrupados. Cores mais quentes indicam maior influência do tratamento em questão na variável analisada.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Essas observações corroboram com outros estudos que evidenciam o potencial de inoculantes à base de *Azospirillum brasilense* em incrementar a eficiência no uso do nitrogênio e a absorção de nutrientes, o que pode contribuir para a promoção da sustentabilidade na produção agrícola (Hungria *et al.*, 2010).

Rodrigues *et al.* (2019) destacam o papel do *Azospirillum brasilense* na mitigação das emissões de gases de efeito estufa relacionadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados, além de reduzir as perdas de nitrogênio por lixiviação, configurando-se como uma estratégia essencial para a implementação da agricultura de baixo carbono. Tais contribuições, estão diretamente alinhadas com alguns dos objetivos do desenvolvimento sustentável, principalmente no que tange as ODS 12 e 13, que tratam sobre produção e consumo sustentável e alterações climáticas.

O presente trabalho evidencia que a aplicação de doses reduzidas de fertilizantes minerais associadas à solução inoculante apresenta potencial para maximizar a produtividade e aprimorar a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, alinhando-se a práticas agrícolas sustentáveis. A análise multivariada revelou padrões relevantes nas interações entre tratamentos e variáveis, oferecendo bases sólidas para o planejamento estratégico no manejo da cultura.

## 5 CONCLUSÕES

- A aplicação de  $0,6 \text{ L ha}^{-1}$  da solução com *Azospirillum brasilense* no sulco de plantio da cana-de-açúcar, associada a 50% da dose nitrogenada ( $18 \text{ kg/ha}$  de NPK 05-25-25) aumentou a produção de massa fresca total na área 1. A massa seca total, produtividade de colmos, perfilhamento e as variáveis tecnológicas da cultura não foram alterados pela presença da bactéria.
- As concentrações de nutrientes na diagnose foliar não apresentaram diferença com a aplicação do *Azospirillum* e adubação nitrogenada completa ou meia dose.
- Na concentração e extração de nutrientes da parte aérea, o tratamento com  $0,6 \text{ L ha}^{-1}$  da solução inoculante, associada a 50% da dose nitrogenada, sempre estava entre os que apresentaram as maiores médias de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn e Zn, o mesmo foi observado nas médias da concentração na parte aérea em K, Ca e Zn, nas duas áreas experimentais,
- Pelo dendrograma, os tratamentos T1 (adubação N completa) e T5 (aplicação de  $0,6 \text{ L ha}^{-1}$  da solução inoculante + meia dose N mineral) apresentaram agrupamento superior aos demais e com coloração semelhante, indicando condições muito semelhantes entre os dois tratamentos.

## REFERÊNCIAS

- ABHILASH, P. C. *et al.* Plant Growth-Promoting Microorganisms for Environmental Sustainability. **Trends in Biotechnology**, Cambridge, v. 34, n. 11, p. 847–850, 1 nov. 2016.
- ABREU, M. L. DE. *et al.* Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p. 262–270, 2013.
- ASSOCIAÇÃO DOS FORNECEDORES DE CANA DA REGIÃO DE CATANDUVA (AFCRC). **Tabela de variedades 2023**. Catanduva, 2023. Disponível em: [https://afcrc.com.br/wp-content/uploads/2023/07/TABELA\\_DE\\_VARIEDADES\\_2023.pdf](https://afcrc.com.br/wp-content/uploads/2023/07/TABELA_DE_VARIEDADES_2023.pdf). Acesso em: 22 jan. 2025.
- AGUIRRE, P. F. *et al.* Forage yield of Coastcross-1 pastures inoculated with *Azospirillum brasilense*. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 40, p. e36392, 2018.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDRADE, A. C. *et al.* Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, Edição especial, p. 1643- 1651, 2003.
- ANDRADE, C. A. *et al.* Biomateriais baseados em celulose bacteriana obtidos da cana-de-açúcar para aplicações médicas. In: SILVA NETO, B. R. (org.). Práticas preventivas e prática curativas na medicina. 2 ed. Ponta Grossa: Atena, 2021. p. 16-25.
- AHEMAD, M.; KIBRET, M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. **Journal of King Saud University - Science**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 1–20, jan. 2014.
- BASI, S. *et al.* Nutrient management in sugarcane for sustainable productivity. **Sugar Tech**, [s. l.], v. 21, p. 678-694, 2019.
- BATTISTUS, A. G. **Modulações anatômicas, bioquímicas e fotossintéticas mediadas por *Azospirillum brasilense* inoculado via semente e pulverização foliar em milho**. 2019, 170 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2019.
- BASHAN, Y. *et al.* Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 378, n. 1–2, p. 1–33, maio 2014.
- BASHAN, Y.; HOLGUIN, G. *Azospirillum*-plant relationships: environmental and physiological advances. **Canadian Journal of Microbiology**, Ottawa, v.43, n.2, p.103-121,
- BENEDUZI, A.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L. M. P.. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. **Genetics and Molecular Biology**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 1044–1051, 2012.
- BERNARDI, A.; SILVA, A. W. L.; BARETTA, D. Estudo metanalítico da resposta de gramíneas perenes de verão à adubação nitrogenada. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 70, n. 2, p. 545–553, mar. 2018.

BOKHTIAR, S. M.; SAKURAI, K. Effect of application of inorganic and organic fertilizers on growth, yield and quality of sugarcane. **Sugar Tech**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 33–37, 1 mar. 2005.

BRASIL, M.S *et al.* Efeitos da inoculação de bactérias diazotróficas em gramíneas forrageiras do Pantanal. **Revista Pasturas Tropicales**, Seropédica, v. 27, n. 3, p. 22-33, 2005.

BROADLEY, M. R. *et al.* Zinc in plants. **New Phytologist**, Cambridge, v. 173, n. 4, p. 677–702, 2007.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo; Fundação IAC, 1997. 285 p.

CANTARELLA, H. *et al.* Adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, Campinas, n. 118, p. 20-34, 2007.

CARDOSO, T. F. *et al.* A regional approach to determine economic, environmental and social impacts of different sugarcane production systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 9–20, jan. 2019.

CARDOSO, B. C. *et al.* Rendimento de cana-de-açúcar e graus Brix em função de diferentes formas de adubação. **Scientific Electronic Archives**, [s. l.], v. 14, n. 4, 2021.

CASSÁN, F.; DIAZ-ZORITA, M.; FERRARIS, G. *Azospirillum brasilense* promotes root development and modulates nutrient absorption in plants. **Agronomy**, Madison, v. 10, n. 3, p. 423, 2020.

CASSÁN, F.; DIAZ-ZORITA, M. *Azospirillum sp.* na agricultura atual: Do laboratório ao campo. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 103, p. 117–130, 1 dez. 2016.

CASTRO, J. R. P.; ARAUJO, S. A importância dos inoculantes para a economia brasileira. **ANPII**, [s. l.], v. especial, p. 39, 2018.

COMPANT, S.; CLÉMENT, C.; SESSITSCH, A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 42, n. 5, p. 669–678, 1 maio 2010.

CONAB. **Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5489-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie-historica>. Acesso em: 6 mar. 2025.

DE OLIVEIRA, M. W. *et al.* **Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar**. 2007.

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil - A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **The Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 637–638, p. 1127–1136, 1 out. 2018.

DOBBELAERE, S. *et al.* Responses of agronomically important crops to inoculation with *Azospirillum*. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 28, p. 871–879, 26 set. 2001.

DOURADO, M. N. *et al.* Plant growth-promoting bacteria: A case of sugarcane. **Microbiological Research**, Jena, v. 234, p. 126421, 2020.

DUARTE, C. F. D. *et al.* Inoculação de bactérias promotoras do crescimento vegetal em *Urochloa Ruziziensis*. Research, **Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 8, 21 jul. 2020.

DUARTE, F. C. **Cana-de-açúcar: do plantio à alimentação de bovinos**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

ESTADO, A. **Safra de cana 2022/23 em São Paulo foi 2,46% maior, de 431,11 mi t, relata IEA-Apta**. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/safra-cana-2022-23-sao-paulo-2-46-maior-431-11-mi-t-iea-apta-110324>. Acesso em: 7 out. 2024.

FAGERIA, N. K. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

THE FUTURE OF FOOD AND AGRICULTURE. Drivers and triggers for transformation. FAO, 2022.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 3. ed. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2011.

FERREIRA, A. L. Inoculante para a fixação de nitrogênio para cana é lançado pela Basf e Embrapa. 2018.

FERREIRA, A. S. *et al.* Implications of *Azospirillum brasilense* inoculation and nutrient addition on maize in soils of the Brazilian Cerrado under greenhouse and field conditions. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 72, p. 103–108, 1 out. 2013.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, nov. 2011.

FERREIRA, L. F. Redução na adubação nitrogenada e potássica associada a inoculação de bactérias promotoras de crescimento de plantas em variedades de cana-de-açúcar. 2024.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. **Brazilian Journal of Biometrics**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019.

FICAGNA, T.; GAI, T. Adubação nitrogenada e inoculante de gramínea em tifton 85. **Cultivando o Saber**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 113-119, 2012.

FLORIANO, P. H. P. **Aspectos nutricionais e adubação nitrogenada para cana-de-açúcar**. 2022.

FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Bauru: Canal, v. 6, p. 275, 2017.

FRANCO, H. C. J. **Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada de cana-planta**. Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 25 fev. 2008.

FRANZÉ, R. V. **Qualidade tecnológica e teores de nutrientes da cana-de-açúcar sob efeito de maturadores**. 2010. ix, 53 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2010.

FUKAMI, J.; CERZINI, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**, [s. l.], v. 8, n. 73, p. 1-12, 2018.



FUKAMI, J. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria: What's new? *Advances in Agronomy*, Madison, v. 147, p. 143-179, 2018.

GALINDO, F. S. *et al.* Manejo da adubação nitrogenada no capim-mombaça em função de fontes e doses de nitrogênio. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 41, n. 4, p. 900-913, 2018.

GÍRIO, L. A. *et al.* Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré-brotadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, n. 1, p. 33-43, 2015.

GONÇALVES, M. C. *et al.* Nitrogênio e *Azospirillum brasilense* no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar. **Colloquium Agrariae**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 72–81, 2020.

GOSAL, S.K. *et al.* Assessing the benefits of Azotobacter bacterization in sugarcane: a field appraisal. **Sugar Tech**, [s. l.], v.14, p.61-67, 2012.

HEINRICHS, R. *et al.* **Importance of sugarcane in Brazilian and world bioeconomy. Knowledge-driven developments in the bioeconomy: technological and economic perspectives.** In: Economic complexity and evolution. New York: Springer, 2017. p. 205-217.

HUNGRIA, M., *et al.* Inoculantes microbianos: inovação para a sustentabilidade na agricultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 1435-1443. 2010.

HUNGRIA, M. **Inoculação com Azospirillum brasilense: inovação em rendimento a baixo custo.** Londrina: Embrapa Soja, 2011. 36 p.

HUNGRIA, M., *et al.* Seed co-inoculation with Bradyrhizobium spp. and Azospirillum brasilense improves yield and quality of soybean and maize. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 202, p. 45-54, 2015.

KANG, S. M. *et al.* Integrated phytohormone production by the plant growth-promoting rhizobacterium Bacillus tequilensis SSB07 induced thermotolerance in soybean. **Journal of Plant Interactions**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 416-423, 2019.

KORNDÖRFER, G. H.; OLIVEIRA, A. M.; GALRÃO, E. Z. **Nutrição mineral da cana-de-açúcar.** 2012.

LOPES, N. F.; LIMA, M. G. S. **Fisiologia da produção.** Viçosa, MG: Editora UFV, 2015. 492 p.

LOPES, V. R. *et al.* Interaction between sugarcane families and plant growth-promoting bacteria in two crop cycles. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 2, p. 527-538, 2019.

LOPES, R. *et al.* A look into a multifunctional toolbox: endophytic *Bacillus* species provide broad and underexploited benefits for plants. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], v. 34, n. 7, p. 94-102, 2020.

LUMBRERAS, J. F. *et al.* **Potencialidades e limitações ao uso agrícola de solos do Matopiba.** 2015.

MAGALHÃES, S. P. de. *et al.* **Bactérias promotoras de crescimento vegetal na atenuação do estresse salino e déficit hídrico na agricultura.** 2023.

- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p.
- MALAVOLTA, E. **Potássio**: absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 179-230.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MARCHETTI, M. M.; BARP, E. A. **Efeito rizosfera**: a importância de bactérias fixadoras de nitrogênio para o solo/planta – revisão. *Ignis, Caçador*, v. 4, n. 1, p. 61-71, jan./dez. 2015.
- MARIANI, L. *et al.* Produtividade da forrageira *Panicum maximum* cv. MG12 Paredão submetido a diferentes níveis de adubação nitrogenada e de diferentes fontes. **Connectoin**, [s. l.], n. 18, p. 111-117, 2018.
- MARIANO, R. L. R. *et al.* Importância de bactérias promotoras de crescimento e de biocontrole de doenças de plantas para uma agricultura sustentável. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, Recife, v. 1, p. 89-111, 2004.
- MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R.; MARTINS, E. de S. **Efeito da aplicação dos remineralizadores no solo**. 2023.
- MATSUMURA, E. E.; SECCO, V. A.; MOREIRA, R. S. Composition and activity of endophytic bacterial communities in field-grown maize plants inoculated with *Azospirillum brasilense*. **Annals of Microbiology**, [s. l.], First published online: April 01, 2015, p. 1-14.
- MOREIRA, V. *et al.* Características adaptativas da associação simbiótica e da fixação biológica do nitrogênio molecular em plantas jovens de *Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl., uma leguminosa arbórea nativa do Cerrado. **Rodriguésia**, [s. l.], v. 65, n. 2, p. 517–525, abr. 2014.
- MOURA FILHO, G. *et al.* Diagnose nutricional de variedades de cana-de-açúcar em argissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 18, n. 11, p. 1102–1109, nov. 2014.
- MOURA, J. *et al.* Influence of nitrogen fixing bacteria in the establishment of pre-broken sugar cane. *Asian Journal of Microbiology*, **Biotechnology and Environmental Sciences**, v. 21, p. 22–26, 1 jan. 2019.
- MOUTIA, Y. *et al.* Plant growth promotion by *Azospirillum* sp. in sugarcane is influenced by genotype and drought stress. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 337, p. 233–242, 1 dez. 2010.
- NAKAO, A. H. *et al.* Intercropping *Urochloa brizantha* and sorghum inoculated with *Azospirillum brasilense* for silage. **Revista Ciência Agronômica**, Jaboticabal, v. 49, n. 3, p. 501–511, jul. 2018.
- SANTOS NETO, J. B. S. *et al.* Innovation in the use of residual from the sugar-alcohol sector. *Revista GEINTEC: Gestão, Inovação e Tecnologias*, [s. l.], v. 4, p. 1536-1549, 2014.
- NOGUEIRA, M. A. F. S.; GARCIA, M. S. **Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético**: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul. 2014.

- OLIVEIRA, B. G. *et al.* Fluxos de gases de efeito estufa no solo provenientes da aplicação de vinhaça em áreas brasileiras de cana-de-açúcar. **Geoderma**, Amsterdam, v. 200–201, p. 77-84, jun. 2014.
- OKON, Y.; KAPULNIK, Y. Development and function of Azospirillum-inoculated roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 90, p. 3-16, 1986.
- OLIVEIRA, A. L. M. DE *et al.* Aplicações da biodiversidade bacteriana do solo para a sustentabilidade da agricultura. **BBR - Biochemistry and Biotechnology Reports**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 56–77, 22 set. 2014.
- OLIVEIRA, P. P. A.; OLIVEIRA, W. S. DE; BARIONI JUNIOR, W. **Produção de forragem e qualidade de Brachiaria brizantha cv. Marandu com Azospirillum brasilense e fertilizada com nitrogênio**. Circular técnica / Embrapa Pecuária Sudeste; 54, 2007.
- OLIVEIRA, E. C. A. DE. *et al.* Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Jaboticabal, v. 42, n. 3, p. 579–588, jul. 2011.
- OLIVEIRA, R. C.; PINTO, F. A. *et al.* Uso de *Azospirillum brasilense* no aumento da eficiência de absorção de água e de fósforo por plantas de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 56, p. e01436, 2021.
- OLIVEIRA, A. R. D.; SIMÕES, W. L. Cultivares de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas em condições irrigadas no semiárido brasileiro. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 31, n. 2, p. 154, 31 maio 2016.
- PARREIRA, L. H. M. *et al.* Efeito da bactéria *Azospirillum brasilense* na adubação química e orgânica em pastagens constituídas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Enciclopédia Biosfera**, [s. l.], v.11, n.21, p. 838-850, 2015.
- PATEL, T. S.; MINOCHEHERHOMJI, F. P. Plant growth promoting Rhizobacteria: blessing to agriculture. **Int J Pure App Biosci**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 481-492, 2018.
- PRADO, R. de M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar. **Ceres**, v. 58, n. 4, p. 535-551, 2011.
- PRADO, R. DE M.; PANCELLI, M. A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 951–959, out. 2008.
- PEREIRA, W. *et al.* Acúmulo de biomassa em variedades de cana-de-açúcar inoculadas com diferentes estirpes de bactérias diazotróficas. **Revista Ciência Agronômica**, Jaboticabal, v. 44, n. 2, p. 363–370, abr. 2013.
- PEREIRA, L. M. P. F.; ZANCAN, W. L.; COTRIM, D. A. Metodologia da pesquisa científica: a construção do conhecimento. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020.
- PÉREZ-MONTAÑO, F. *et al.* Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: from microorganism capacities to crop production. **Microbiological Research**, [s. l.], v. 169, n. 5-6, p. 325-336, maio-jun. 2014.
- R: The R Project for Statistical Computing. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 6 mar. 2025.

RODRIGUES, A. A. *et al.* Impacto ambiental e econômico da redução do uso de fertilizantes nitrogenados com inoculantes. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 111, n. 3, p. 1245-125, 2019.

RODRÍGUEZ, C. E. *et al.* Biofertilizers and their role in plant growth stimulation and sustainability. **Chilean Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 79, n. 3, p. 330-343, 2019.

ROSÁRIO, J. G. D. *et al.* Inoculação com *Azospirillum brasilense* associada à redução na adubação nitrogenada de cobertura em cultivares de trigo. Guarapuava, 2013.

SCHULTZ, N. *et al.* Avaliação agronômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 2, p. 261–268, fev. 2012.

SCHULTZ, N. *et al.* Inoculation of sugarcane with diazotrophic bacteria. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 407–414, mar. 2014.

SCUDELETTI, D. *et al.* Inoculation with *Azospirillum brasilense* as a strategy to enhance sugarcane biomass production and bioenergy potential. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 144, p. 126749, 2023.

SERNA-COCK, L.; ARIAS-GARCÍA, C.; VALENCIA HERNANDEZ, L. J. Efecto de la biofertilización sobre el crecimiento en maceta de plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). **Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 85–95, dez. 2011.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P.; CONANT, R. N<sub>2</sub> O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 015013, 1 mar. 2013.

SINGH, S.; SINGH, V.; PAL, K. Importance of microorganisms in agriculture. In: **Climate and Environmental Changes: Impact, Challenges and Solutions**, v. 1, p. 93-117, 2017.

SHARMA, A. *et al.* Microbial iron cycling and the balance between primary and secondary mineral precipitation. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 7, p. 253, 2016.

SHIVAPUTR, D.; GEETHA, G. S.; KULKARNI, S. Effects of *Azospirillum* and herbicides on dry matter yield and yield components of sugarcane. **Karnataka Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 17, p. 86-89, 2004.

SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S. H. Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 182, p. 521-528, 2018.

SILVA, M. A. da; COSTA, J. P. V. da; FERREIRA JÚNIOR, R. A.; OLIVEIRA, M. W. de. Perfilhamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes épocas de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 3, p. 266-273, 2008.

SILVA, J. A. G. S. *et al.* *Azospirillum brasilense* Ab-V5 and Ab-V6 increase the yield of sugarcane in a field trial. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 11, p. 1-17, 2020.

SILVA, R. B. *et al.* Inoculação de bactérias promotoras de crescimento em *Urochloa ruziziensis* em solos com diferentes fertilidades. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 68, p. 249-258, 2021.

SOIL SURVEY DIVISION. **Keys to Soil Taxonomy**. 12. ed. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014.

SOUZA, R.; AMBROSINI, A. Mechanisms of plant growth promotion by *Azospirillum* and its application in agriculture. **Annals of Applied Biology**, [s. l.], v. 167, n. 2, p. 269-284, 2015.

GOMES DE SOUSA, S. F. *et al.* Produtividade da cultura de cana de açúcar com e sem a aplicação de fósforo em profundidade utilizando equipamento de preparo profundo mecanizado. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 3, p. 276, 5 nov. 2015.

SOUZA, S. R. *et al.* Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

SOMBRA, J. A. *et al.* Um estudo sobre a viabilidade técnica e econômica do uso de *Azospirillum brasilense* e da aplicação de nitrogênio em milho. **Synergismus Scientifica UTFPR, Medianeira**, v. 2, n. 1, p. 1-16, 2007.

SOUTO, S. M. Bactérias diazotróficas em consórcio com a adubação mineral na produtividade e nos componentes tecnológicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 353-358, 2015.

SPALAOR, L. T. *et al.* Plant growth-promoting bacteria associated with nitrogen fertilization at topdressing in popcorn agronomic performance. **Bragantia**, Campinas, v. 75, n. 1, p. 33-40, 2016.

STOLLER. **Masterfix**: inoculante biológico para gramíneas e leguminosas. 2020. Disponível em: <https://www.stoller.com.br/produtos/biologicos/masterfix/>. Acesso em: 24 jan. 2025.

TAIZ, L. *et al.* **Fundamentos de fisiologia vegetal**. São Paulo: Artmed Editora, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5 ed. Porto Alegre: Artemed, 2013. 954p.

TOMAZ, M. A. *et al.* Bactérias diazotróficas associativas como promotoras de crescimento de cana-de-açúcar e eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 5, p. 528-536, 2013.

TRIVELIN, P. C. O. *et al.* Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 637-646, jul. 2002.

UDVARDI, M. *et al.* A Research Road Map for Responsible Use of Agricultural Nitrogen. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 660155, 31 maio 2021.

URQUIAGA, S. *et al.* Evidence from field nitrogen balance and <sup>15</sup>N natural abundance data for the contribution of biological N<sub>2</sub> fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 356, n. 1-2, p. 5-21, jul. 2012.

VAN RAIJ, B. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

VESSEY, J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 255, n. 2, p. 571-586, 2003.

ZANZARINI, R. M; SANTOS, R. J.; ALBINO, K. G. **A expansão da cana-de-açúcar no cerrado brasileiro**. XIII SBGFA: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. UFV 06 a, v. 10, p. 07-09, 2008.

YADAV, R. K. *et al.* Potential of *Azospirillum* for sustainable agriculture. In: MAHESHWARI, Dinesh K. (org.). **Bacteria in Agrobiolgy**: Plant Probiotics. Berlin: Springer, 2012. p. 83-109.