

**PARÂMETROS NUTRICIONAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA COM
CARBONATITO FOSFÁTICO E MICRORGANISMOS
BIOSSOLUBILIZADORES DE FÓSFORO**

por

BRENO CAIRES CANDIDO PEREIRA LEMES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Bioenergia e Grãos.

Rio Verde - GO

Abril – 2026

**PARÂMETROS NUTRICIONAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA COM
CARBONATITO FOSFÁTICO E MICRORGANISMOS
BIOSSOLUBILIZADORES DE FÓSFORO**

Por

BRENO CAIRES CANDIDO PEREIRA LEMES

Orientação:

Romano Roberto Valicheski, Prof. Dr - IF Goiano – Campus Iporá

Rio Verde - GO

Abril – 2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

L552p LEMES, BRENO CAIRES CANDIDO PEREIRA
PARÂMETROS NUTRICIONAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR
CULTIVADA COM CARBONATITO FOSFÁTICO E
MICROORGANISMOS BISSOLUBILIZADORES DE
FÓSFORO / BRENO CAIRES CANDIDO PEREIRA LEMES.
Rio Verde 2026.

37f. il.

Orientador: Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski.
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de
0233154 - Mestrado Profissional em Bioenergia e Grãos -
Integral (Campus Rio Verde).

I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 8/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PARÂMETROS NUTRICIONAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA COM CARBONATITO FOSFÁTICO E MICRORGANISMOS BISSOLUBILIZADORES DE FÓSFORO

Autor: Breno Caires Candido Pereira Lemes
Orientador: Romano Roberto Valicheski

TITULAÇÃO: Mestre em Bioenergia e Grãos - Área de Concentração Agroenergia

APROVADA em 15 de abril de 2026.

Assinado eletronicamente
Prof. Dr. Estenio Moreira Alves
Avaliador externo - IF Goiano Campus
Iporá

Assinado eletronicamente
Prof.^a Dr.^a Amanda Abdallah Chaibub
Avaliadora interna - IF Goiano Campus
Iporá

Assinado eletronicamente
Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski
Presidente da Banca - IF Goiano Campus Iporá

Documento assinado eletronicamente por:

- **Romano Roberto Valicheski**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 15/04/2026 10:29:46.
- **Amanda Abdallah Chaibub**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 15/04/2026 10:42:34.
- **Estenio Moreira Alves**, ENGENHEIRO AGRONOMO, em 15/04/2026 10:46:18.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/04/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 810524
Código de Autenticação: be4921c6d6





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 11/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

**ATA Nº 124 (CENTO E VINTE E QUATRO)
BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Aos quinze dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e seis, às 08h00min (oito horas), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada na Sala 3, Setor de Mecanização do Campus Iporá do Instituto Federal Goiano, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **BRENO CAIRES CANDIDO PEREIRA LEMES**, discente do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da Dissertação que, em 30 min, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos, e procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM BIOENERGIA E GRÃOS**, na área de concentração Agroenergia, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGBG da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade, se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

Membros da Banca Examinadora

Nome	Instituição	Situação no Programa
Romano Roberto Valicheski	IF Goiano – Campus Iporá	Presidente
Amanda Abdallah Chaibub	IF Goiano – Campus Iporá	Membro interno
Estenio Moreira Alves	IF Goiano – Campus Iporá	Membro externo

Documento assinado eletronicamente por:

- **Romano Roberto Valicheski**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/04/2026 10:26:09.
- **Amanda Abdallah Chaibub**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/04/2026 10:43:22.
- **Estenio Moreira Alves**, ENGENHEIRO AGRONOMO, em 15/04/2026 10:46:25.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/04/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar_documento/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 810517
Código de Autenticação: e375ab924d



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo: _____

Nome completo do autor:

BRENO CAIRES CANDIDO PEREIRA LEMES

Matrícula:

2024202331540002

Título do trabalho:

PARÂMETROS NUTRICIONAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA COM CARBONATITO FOSFÁTICO E MICRORGANISMOS BISSOLUBILIZADORES DE FÓSFORO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 31 / 05 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
gov.br BRENO CAIRES CANDIDO PEREIRA LEMES
Data: 31/05/2026 21:55:17 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Iporá-GO

Local

31 / 05 / 2026

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente
gov.br ROMANO ROBERTO VALICHESKI
Data: 31/05/2026 21:18:02 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar a Deus, que por meio de sua graça permitiu vida e saúde todos os dias, e sem ele nada poderia acontecer.

A coordenação do Programa de Mestrado Profissional em Bioenergia e Grãos do IFGoiano, a qual permitiu o meu aperfeiçoamento acadêmico e profissional.

Ao meu orientador Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski – IFGoiano Campus Iporá, por compartilhar seu conhecimento, pela disponibilidade e paciência de orientação ao longo do mestrado, obrigado.

A todos os meus colegas e servidores da Instituição, que não mediram esforços em contribuir na implantação, condução e coleta deste trabalho de pesquisa, permitindo que o mesmo fosse realizado dentro do programado, muita gratidão.

Agradeço a minha família por todo o apoio, que foram fonte de sustentação para chegar até aqui, obrigado.

Sumário

Capítulo 1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	6
1 INTRODUÇÃO	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Capítulo 2 - Parâmetros nutricionais da cana-de-açúcar cultivada com carbonatito fosfático e microrganismos biossolubilizadores de fósforo.....	20
RESUMO.....	20
4 INTRODUÇÃO.....	22
5 MATERIAL E METODOS	23
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
7 CONCLUSÃO.....	44
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

Capítulo 1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa a quarta posição mundial no consumo de fertilizantes, destacando-se como um expressivo consumidor. Conforme dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2025), no período de 2024 em relação a 2023, houve aumento de 4,8% na importação de fertilizantes. Este fato faz com que, apesar da relevância do agronegócio brasileiro, um dos mais promissores quanto a produção de alimentos, também faz com que seja fortemente dependente da importação de insumos, expondo o setor a vulnerabilidade de preços, à disponibilidade internacional, dando destaque para os fertilizantes.

No cenário brasileiro, os fertilizantes potássicos representam 38%, os fosfáticos 33% e os nitrogenados 29% do total consumido. E a soja, o milho e a cana-de-açúcar respondem por mais de 73% do que é consumido em uma safra no país (BRASIL, 2021). A cana-de-açúcar ocupa posição de destaque no contexto do consumo de fertilizantes no Brasil. Pois o país está entre os maiores produtores mundiais da cultura, com produção estimada em 676,96 milhões de toneladas na safra 2024/2025, segundo o 4º Levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025), resultado que representa o segundo maior volume colhido na série histórica do país, sendo o setor de alta importância estratégica e econômica.

Esta situação remete a necessidade eminente e constante por novas fontes de fertilizantes extraídas em território nacional, bem como em maximizar a eficiência destes fertilizantes na agricultura (Felix & Walter, 2021). Assim nos últimos anos tem se destacado a aplicação de fertilizantes de baixa solubilidade como o uso de remineralizadores do solo (Moraes, 2021) e o uso de microrganismos solubilizadores de nutrientes (Oliveira-Paiva *et al*, 2022), os quais associados podem tornar o Brasil menos dependente da importação. Estes autores também ressaltam que a disponibilidade de nutrientes para as plantas está estreitamente relacionada com a microbiota do solo, uma vez que existe vasta diversidade de microrganismos

com potencial de solubilizar minerais primários do solo, contribuindo para maior disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Os microrganismos biossolubilizadores vem como promissora e eficiente ferramenta em disponibilizar nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Atuando por meio de diferentes mecanismo, como a dissolução direta, reações de oxirredução e produção enzimática, além de promover o crescimento vegetal por meio do desenvolvimento radicular, modulação de fitormônios, produção de sideróforos e aumento das atividades enzimáticas das plantas (Mumtaz *et al.*, 2024). Entre os microrganismos solubilizadores de fósforo (P) mais estudados estão os *Bacillus* spp., cujas cepas são capazes de originar sideróforos que convertem formas menos solúveis de P em fosfato disponíveis às plantas. Nesse sentido, Liu *et al.* (2021) demonstraram que cepas de *Bacillus thuringiensis* e *Pantoea ananatis* promovem a solubilização de compostos insolúveis de fósforo no solo, incluindo $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, FePO_4 e AlPO_4 , por meio da redução do pH do meio, mecanismo central na disponibilização desse nutriente. Para a solubilização do potássio, microrganismos como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Aspergillus terreus*, *Bacillus circulans*, *Bacillus edaphicus*, *Bacillus mucilaginosus* e *Paenibacillus* spp. atuam na liberação de formas minerais de potássio no solo por mecanismos semelhantes aos utilizados para o fósforo (Kaur *et al.*, 2024).

Diante desses estudos fica claro que à aplicação de remineralizadores/pó de rocha no solo, associada ao uso de microrganismos solubilizadores, surge como uma alternativa promissora para reduzir a demanda por fertilizantes importados. Nesse sentido, a empresa NeoFertil implantou uma mina para extração de carbonatito fosfático, que possui composição química de 4,93% de K_2O e 8,21% de P_2O_5 , podendo vir a ser uma alternativa de relevante importância para o suprimento destes nutrientes as culturas. Esta rocha, finamente moída, pelo baixo valor agregado e por localizar-se na região, além de ser um produto natural, pode

efetivamente contribuir no atendimento da demanda das propriedades por fertilizantes, sejam elas grandes, médias ou pequenos estabelecimentos rurais.

Apesar deste potencial e promissor uso, até o momento, poucas informações existem sobre os efeitos desse material no desenvolvimento vegetal e nutrição mineral das plantas que podem ser potencializadas com o uso de microrganismos biossolubilizadores. Diante dessa lacuna, torna-se necessária a realização de estudos que avaliem o potencial agrônomo do carbonatito como remineralizador de solo, bem como a eficiência de microrganismos biossolubilizadores na disponibilização de nutrientes e na melhoria do estado nutricional das plantas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil, considerando suas características edafoclimáticas e de relevo, é um dos países que apresenta grande potencial de expansão agrícola, podendo tornar-se um dos maiores exportadores de alimentos do planeta. Contini e Aragão (2021), destacam que, entre 2011 e 2020, enquanto a produção mundial de grãos cresceu 2,05% ao ano, a produção do agronegócio brasileiro avançou 5,33%, ou seja, mais que o dobro da taxa global.

Entre as culturas de maior relevância neste setor, destaca-se a cana-de-açúcar. Atualmente o país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol de primeira geração, respondendo por aproximadamente 23% da produção global de açúcar. Na safra 2025/26, segundo o 4º levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento, a produção brasileira foi estimada em 673,25 milhões de toneladas, em uma área colhida de aproximadamente 8,79 milhões de hectares e produtividade média de 75,18 t ha⁻¹, e a região Sudeste mantém-se como principal produtora, com 430,1 milhões de toneladas, seguida pelo Centro-Oeste, com 148,4 milhões de toneladas, sendo Goiás o segundo maior estado produtor do país (CONAB, 2026; USDA, 2025).

A importância socioeconômica da cana-de-açúcar transcende a produção agrícola. O setor sucroenergético é responsável pela geração de milhões de empregos diretos e indiretos, pela produção de biocombustíveis renováveis e pela cogeração de energia elétrica a partir do “bagaço”, configurando-se como pilar estratégico da matriz energética e da pauta exportadora brasileira. Na safra 2024/25, a produção brasileira atingiu a cerca de 44 milhões de toneladas de açúcar e aproximadamente 36 bilhões de litros de etanol, dos quais a cerca de 29 bilhões oriundos da cana-de-açúcar e 7 bilhões do milho (UNICA, 2025). Para 2025/26, a fabricação total de etanol foi estimada em 37,5 bilhões de litros, configurando-se como a maior da série histórica da CONAB (CONAB, 2026).

Do ponto de vista nutricional, a cana-de-açúcar é uma cultura altamente exigente. Durante seu ciclo anual, extrai em média 191,8 kg de N; 49,1 kg de P; 441,7 kg de K; 89,4 kg de Ca; 20,1 kg de Mg e 36,7 kg de S, dos quais 124,7 kg de N; 36,9 kg de P; 332,6 kg de K; 44,7 kg de Ca; 13,15 kg de Mg e 25,85 kg de S são exportados via colheita dos colmos (Salviano *et al*, 2017). Dentre esses nutrientes, o fósforo (P), embora extraído em menores quantidades absolutas que N e K, exerce papel central no estabelecimento da cultura, atuando na formação de proteínas, na divisão celular, na fotossíntese, na síntese de ATP e sacarose, na respiração e na promoção do enraizamento, do perfilhamento e da produtividade final, sendo também essencial para a longevidade e produtividade das soqueiras (Bachiega, 2021).

Tarumoto *et al.* (2022), em estudo conduzido com variedades de cana submetidas a baixa disponibilidade de P, demonstraram que a deficiência desse nutriente compromete severamente a partição de carboidratos, a atividade de enzimas antioxidantes e o crescimento da parte aérea, evidenciando que a eficiência genotípica de uso do P está diretamente associada ao desempenho produtivo da cultura. Adicionalmente, Yi *et al.* (2022) verificaram que, sob deficiência de P, a cana-de-açúcar reorganiza espacialmente seu sistema radicular, concentrando raízes nas camadas superficiais como estratégia adaptativa de exploração de fósforo lábil,

fenômeno que corrobora a importância de uma adequada disponibilidade do nutriente já no momento do plantio. Reforçando dependência de uma adubação intensiva, tornando esta cultura juntamente com a soja e o milho, protagonistas no consumo de fertilizantes do país, e juntas respondem por mais de 72% do consumo total de fertilizante utilizado.

Conforme dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2025), a cerca de 70% dos fertilizantes utilizados pela agricultura brasileira são oriundos de outros países, totalizando, em 2024, o montante de 41,34 milhões de toneladas importadas para o mercado brasileiro, com aumento de 4,8% em relação ao ano anterior. Essa dependência é crítica, principalmente para os fosfatados, dos quais aproximadamente 60% do que é utilizado provém do mercado externo.

Essa realidade é agravada uma vez que a maioria dos solos brasileiros são fortemente intemperizados e naturalmente pobre em fósforo (P), e remete à necessidade de frequentes aplicações em altas doses de fertilizantes fosfatados, sejam minerais, orgânicos ou organominerais (De Oliveira *et al*, 2021). Para a reposição/adição de P no solo, utilizam-se comumente o superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP) e fosfato monoamônico (MAP), tendo nas concentrações, respectivamente 17% - 21%, 36% e 54% de P_2O_5 solúvel em água.

Para superar a baixa disponibilidade natural de P nos solos tropicais, em especial nos Latossolos do Cerrado, característicos da região Centro-Oeste. Adota-se a prática da adubação fosfatada corretiva, também denominada fosfatagem. Trata-se de uma estratégia de manejo cujo objetivo é elevar o teor de P do solo a níveis considerados adequados, saturando parte dos sítios de adsorção e aumentando a eficiência das adubações fosfatadas subsequentes de manutenção. Tecnicamente, recomenda-se que a fosfatagem seja realizada após a calagem, uma vez que a correção da acidez aumenta as cargas negativas dos colóides do solo, neutraliza Al^{3+} e Fe^{3+}

tóxicos e reduz a precipitação do P em formas indisponíveis (Sousa e Lobato, 2004; Nunes *et al.*, 2020).

A fosfatagem pode ser conduzida de forma total ou gradual. Na fosfatagem total, o fertilizante é aplicado a lanço e incorporado na camada de 0–20 cm, sendo particularmente recomendada antes da implantação de sistemas conservacionistas, como o plantio direto, em que o revolvimento do solo é restrito, após a instalação. Já na fosfatagem gradual, a dose corretiva é parcelada e aplicada no sulco de plantio ao longo de quatro a seis cultivos, sendo mais indicada para produtores com restrição de capital de giro (Nunes *et al.*, 2020). Em ambos os casos, a prática não dispensa a adubação fosfatada de manutenção, pois o objetivo é justamente potencializar o aproveitamento do P aplicado nos cultivos sucessivos. Estudos de longo prazo em Latossolos do Cerrado demonstram que sistemas de manejo que combinam fosfatagem inicial, plantio direto e rotação de culturas resultam em maior acúmulo de P em frações lábeis, aumentando a fração disponível ao longo do tempo (Nunes *et al.*, 2020).

Apesar dessas estratégias, o P geralmente é o nutriente que mais tem limitado o crescimento das plantas em solos tropicais. Pois, apesar de o P total estar em altas concentrações nas maiorias das áreas cultivadas, por causa das elevadas doses de fertilizantes sintéticos aplicados, o P disponível para as plantas, geralmente é muito baixo, uma vez que parte deste nutriente é rapidamente fixado por óxidos e argilominerais, formando precipitados de baixa solubilidade. Havlin *et al.* (1999), Rengel e Marschner (2005), ressaltam que após a aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis, a fixação de P pode ocorrer na superfície dos argilominerais e/ou formar precipitados na forma de fosfato de Al^{3+} , fosfato de Fe^{3+} e fosfato de Ca^{2+} , íons que se encontram livres no solo.

Zhou *et al.* (1992) relatam que menos de 0,1% do P total do solo esteja prontamente disponível para ser absorvido pelas plantas, resultando na necessidade de que elevada quantidade de fertilizante fosfatado seja aplicado para atender a demanda das plantas. Pavinato

et al. (2020) estimam que mais de 70% dos fertilizantes fosfatados aplicados permaneçam no solo retidos em formas não assimiláveis pelas plantas.

Diante desse cenário, a utilização de microrganismos solubilizares de P tem se consolidado como alternativa biotecnológica promissora para aumentar a eficiência de uso do P aplicado e mobilizar o fósforo legado retido no solo (Alori *et al.*, 2017; Timofeeva *et al.*, 2022). Esses microrganismos compreendem um grupo funcionalmente diverso de bactérias, fungos, actinobactérias e leveduras capazes de converter formas insolúveis de P, tanto inorgânicas (Ca-P, Al-P, Fe-P) quanto orgânicas (fitato, fosfolipídios, ácidos nucleicos), em P disponível para as plantas (Rawat *et al.*, 2021; Pang *et al.*, 2024).

Os mecanismos pelos quais os microrganismos atuam são distintos para o P inorgânico (Pi) e o P orgânico (Po). Para o Pi, o principal mecanismo é a produção e excreção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como os ácidos glucônico, 2-cetoglucônico, cítrico, oxálico, láctico, succínico, málico e acético. Esses ácidos atuam por dois caminhos complementares: (i) acidificação do meio rizosférico, que promove a dissolução de fosfatos minerais; e (ii) quelação de cátions metálicos (Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+}) ligados ao P, liberando o ortofosfato em solução (Paredes-Mendoza e Espinosa-Victoria, 2010; Rawat *et al.*, 2021; Pang *et al.*, 2024). Já a transformação do P orgânico em Pi disponível ocorre por mineralização enzimática, processo conhecido como “mineralização biológica”, no qual o P orgânico do solo (proveniente de resíduos vegetais, microbianos e animais) é hidrolisado por enzimas microbianas extracelulares e convertido em formas inorgânicas (Po → Pi) que podem ser absorvidas pelas plantas (Rawat *et al.*, 2021; Pang *et al.*, 2024).

Alzate Castaño (2023) aponta que bactérias pertencentes ao gênero *Bacillus* spp., conseguem solubilizar fósforo de maneira satisfatória, sendo *B. subtilis* e *B. cereus* as que mais se destacaram quanto a capacidade de solubilizar minerais contendo P. Corrales Ramírez *et al.* (2014), também identificaram que a cepa de *B. brevis* e *B. pumilus* foram as espécies que mais

se destacaram quanto a eficiência na solubilização de fosfatos, apresentando potencial agronômico relevante para solubilizar fósforo. Mendes *et al.* (2022), ao avaliarem a solubilização de rocha fosfática por meio de ácido oxálico produzido por fungos, demonstraram que a eficiência do processo depende fortemente do tipo de mineral presente e das condições de reação, evidenciando que a disponibilidade de P está diretamente ligada à interação entre a rocha e o microrganismo solubilizador.

O mercado brasileiro de bioinsumos vem crescendo de forma acelerada e o país lidera mundialmente a adoção desses produtos. Segundo a CropLife Brasil (2024), o mercado de bioinsumos cresceu 15% na safra 2023/2024, movimentando R\$ 5 bilhões e cobrindo aproximadamente 156 milhões de hectares; entre 2022/23 e 2023/24, a taxa de adoção dos solubilizadores de nutrientes nos principais cultivos passou de 3% para 4%. O primeiro inoculante comercial brasileiro com atividade comprovada de solubilização de fosfato foi o BiomaPhos®, lançado em 2019 a partir de parceria entre a Embrapa Milho e Sorgo e a empresa Bioma, após mais de 19 anos de pesquisa.

O produto contém duas cepas selecionadas da Coleção de Microrganismos Multifuncionais e Fitopatógenos da Embrapa: *Bacillus megaterium* CNPMS B119, isolada da rizosfera de milho, com capacidade de solubilizar fosfatos de cálcio e de rocha e de produzir fosfatase, além de *Bacillus subtilis* CNPMS B2084, endofítica, solubilizadora de fosfatos de cálcio e ferro e com elevada produção de ácido glucônico e da enzima fitase (De Oliveira-Paiva *et al.*, 2024). Posteriormente, novas formulações comerciais foram desenvolvidas com base na mesma tecnologia ou em cepas próprias, ampliando a oferta de produtos no mercado nacional.

Atualmente, encontram-se disponíveis, entre outros, o Omsugo P e o Omsugo ECO (Corteva Agriscience), o Biagro Energia (Biagro), o Solubphos (Simbiose), e o Mbio Phos (Mosaic Biosciences) este último com formulação à base de cepas selecionadas de *Bacillus*. O Omsugo ECO destaca-se por ser o primeiro inoculante solubilizador de fósforo do país com

recomendações agronômicas validadas para a cultura da cana-de-açúcar. Segundo levantamento de Policarpo *et al.* (2025), com base no aplicativo Bioinsumos do Ministério da Agricultura e Pecuária, em agosto de 2024 havia 701 inoculantes registrados no MAPA, distribuídos para 40 culturas, dos quais 415 (59,2%) destinados à soja.

Apesar dos avanços, o uso de microrganismos solubilizadores de P na cultura da cana-de-açúcar ainda é incipiente em comparação com soja e milho. Nascimento (2020), Soave (2023) e Vasconcelos (2023) destacam que a cana-de-açúcar apresenta elevada interação com diversos microrganismos do solo. Rosa *et al.* (2022), em um dos poucos estudos de campo conduzidos no Brasil, demonstraram que a inoculação da cana-de-açúcar com bactérias promotoras de crescimento permitiu reduzir em até 50% a dose de P aplicada sem perdas significativas de produtividade, com melhoria simultânea da qualidade tecnológica do colmo. Tais resultados indicam que essa estratégia pode representar importante alternativa para reduzir a dependência por fertilizantes fosfatados importados, com menor impacto ambiental e maior sustentabilidade do agronegócio sucroenergético.

Visando atenuar a dependência de fertilizantes importados, os remineralizadores de solo vêm ganhando destaque como fontes alternativas e promissoras de fertilizantes naturais, uma vez que muitas formações geológicas apresentam potencial agronômico para esse uso. Estes materiais, também conhecidos como pó de rocha ou rochagem são utilizados como fonte de macro e micronutrientes para as culturas e/ou condicionadores de solo (Richard *et al.*, 2023). Entretanto, Moraes (2021) relata que a disponibilidade dos nutrientes dessa rochagem em um curto espaço de tempo é limitada, e como forma de contornar essa limitação, faz-se necessário o uso associado a microrganismos solubilizadores de nutrientes.

Neste contexto, visando atender a demanda por fertilizante fosfatado da região, no município de Mundo Novo - GO, encontra-se implantada uma mina extratora de carbonatito fosfático. Esta rocha finamente moída é comercializada como remineralizador do solo.

Conforme laudo mineralógico emitido pelo Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), o material apresenta na composição química 28,18% de SiO₂, 2,48 % de TiO₂, 11,04 % de Al₂O₃, 20,84 % de Fe₂O₃, 1,2 % de MnO, 4,34 % de MgO, 12,27 % de CaO, 0,13 % de Na₂O, 4,93 % de K₂O e 8,21 % de P₂O₅. Considerando os teores de óxidos de cálcio e magnésio e, principalmente, de potássio e fósforo, este material possui elevado potencial agronômico para ser utilizado como remineralizador do solo e como fonte destes nutrientes para as plantas. Entretanto, não há informações científicas sobre os efeitos na nutrição e desenvolvimento das plantas, quando aplicado ao solo como remineralizador.

Neste sentido, o uso deste carbonatito fosfático como remineralizador, associado a inoculação de microrganismos solubilizadores de nutrientes, caso eficiente, poderá ser uma importante alternativa para suprir a demanda nutricional da cana-de-açúcar e contribuir no atendimento da demanda por fertilizantes da agricultura regional de forma sustentável. Por se tratar de um produto natural, rico em nutrientes e com baixo valor agregado, torna-se acessível tanto para o pequeno, quanto para o grande produtor que buscam por maior sustentabilidade no processo produtivo.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in microbiology*, v. 8, p, 971, DOI: 10.3389/fmicb.2017.00971.

Alzate, C. F. (2023). Evaluación de la solubilización del fósforo mediante el uso de bacterias del género *Bacillus* spp en condiciones de laboratorio, 1997 - 2003 [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, El Carmen de Viboral, Colombia.

Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) (2025). Relatório sobre o mercado de fertilizantes – janeiro a dezembro/2024, São Paulo-SP. ANDA, 2025. Disponível em: <https://anda.org.br/wp-content/uploads/2025/03/Comentarios.pdf> Acesso em 12 set. 2025.

Bachiega Z. F. C. (2021). Phosphorus fertilizer reapplication on sugarcane ratoon: opportunities and challenges for improvements in nutrient efficiency. *Sugar Tech*, 23(3), 704-708.

- BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos.** Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília: SAE, 2021. 195 p. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2026.
- Companhia Nacional de Abastecimento, CONAB. (2025).** Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, quarto levantamento, safra 2024/25. Brasília: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/4o-levantamento-safra-2024-25/boletim-cana-de-acucar-4o-levantamento-2024-25> . Acesso em 11 set. 2025.
- Companhia Nacional de Abastecimento, CONAB. (2026).** Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2025/26. V. 13, n. 4, p 63. Brasília: Conab, 2026.
- Contini, E. & Aragão, A. (2021).** O Agro Brasileiro alimenta 800 milhões de pessoas. *Brasília: Embrapa*.
- Corrales, R. L. C., Sánchez, L. L. C., Arévalo, G. Z. Y., & Moreno, B. V. E. (2014).** *Bacillus*: género bacteriano que demuestra ser un importante solubilizador de fosfato. Nova vol.12 no.22, Bogotá July/Dec. 2014. ISSN 1794-2470.
- Croplife Brasil. (2024).** Mercado de bioinsumos cresceu 15% na safra 2023/2024. São Paulo, 25 mar. 2024. Disponível em: <https://croplifebrasil.org>. Acesso em: abril 2026.
- De Oliveira, L. C. A., Carneiro, M. D. A., Litter, F. A., De Carvalho, M. A. C., Yamashita, O. M., & Caione, G. (2021).** Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n.4, p. 1 - 15. DOI: 10.17765/2176-9168.2021v14n4e8921.
- De Oliveira-Paiva, C. A., Bini, D., de Sousa, S. M., Ribeiro, V. P., Dos Santos, F. C., de Paula Lana, U. G., ... & Marriel, I. E. (2024).** Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil. *Frontiers in Microbiology*, v. 15, art. 1426166, 2024. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1426166.
- Felix, F. C., Wlater, L. S. (2021).** Fertilizante de liberação controlada reduz perdas nas mudas. *Campos & Negócios*. 2021. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/fertilizante-de-liberacao-controlada-reduz-erdas-nas-mudas/>. Acessado em 07 de dez. 2023.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1999).** Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 499 p.
- Kaur, H., Mir, R. A., Hussain, S. J., Prasad, B., Kumar, P., Aloo, B. N., ... & Dubey, R. C. (2024).** Prospects of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 40(10), 291.

- Liu, X., Chen, C., Wang, J., Zou, S., & Long, X. (2021).** Phosphorus solubilizing bacteria *Bacillus thuringiensis* and *Pantoea ananatis* simultaneously promote soil inorganic phosphate dissolution and soil Pb immobilization. *Rhizosphere*, 20, 100448.
- Mendes, T. D., Stuart, R. M., Alves, P. R. L., Moreira, F. M. S., Silva, I. R. (2022).** Rock phosphate solubilization by abiotic and fungal-produced oxalic acid: reaction parameters and bioleaching potential. *Microbial Biotechnology*, v. 15, n. 6, p. 1576-1591, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13792>. Acesso em 07 dez. 2023.
- Moraes, L. N. D. (2021).** Uso de pó de rocha na agricultura brasileira. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2021, 40 p. Trabalho de conclusão de curso.
- Mumtaz, M. Z., Ahmad, M., Etesami, H., & Mustafa, A. (2024).** Migrorganismos solubilizantes minerais (MSM) e suas aplicações em biodisponibilidade de nutrientes, biometeorização e biorremediação, volume II. *Fronteiras em Microbiologia*, 14, 1345161.
- Nascimento, F. C. D. (2020).** Absorção de nitrogênio e fósforo em milho, soja e cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas em diferentes níveis de adubação. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2020, 89 p. Tese (doutorado).
- Nunes, R. D. S., de Sousa, D. M. G., Goedert, W. J., de Oliveira, L. E. Z., Pavinato, P. S., & Pinheiro, T. D. (2020).** Distribuição das frações de fósforo do solo em função do cultivo prolongado do solo e manejo da fertilização com fosfato. *Fronteiras em Ciências da Terra*, v. 8, art. 350, 2020. DOI: 10.3389/feart.2020.00350.
- Oliveira-Paiva, C. A., Alves, V. M. C., Gomes, E. A., Sousa, S. M., Paula, L. U. G., Marriel, I. E. (2022).** Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. IN: Meyer, Mauricio Conrado. Bioinsumos na cultura da soja. Embrapa. Brasília-DF.
- Pang, F.; LI, Q.; Solanki, M. K.; Wang, Z.; Xing, Y. X.; Dong, D. F. (2024).** Soil phosphorus transformation and plant uptake driven by phosphate-solubilizing microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, v. 15, art. 1383813, 2024. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1383813.
- Paredes-Mendoza, M., & Espinosa-Victoria, D. (2010).** Ácidos orgânicos produzidos por rizobactérias que solubilizam fosfato: una revisión crítica. *Terra Latinoamericana*, v. 28, n. 1, p. 61-70, 2010.
- Pavinato, P. S., Cherubin, M. R., Soltangheis, A., Rocha, G. C., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. (2020).** Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. *Scientific Reports*, v. 10, article 15615, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-72302-1.
- Policarpo, M. A., Sambuichi, R. H. R., Alves, F., Pacífico, D. A., Gualdani, C., Bratz, F. (2025).** Desafios e oportunidades para o avanço da produção de bioinsumos no Brasil. Brasília, DF: IPEA, junho de 2025. 68 p. (Texto para Discussão, n. 3133). DOI: <https://dx.doi.org/10.38116/td3133-port>.

- Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2021).** Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, p. 49-68, 2021. DOI: 10.1007/s42729-020-00342-7.
- Rengel, Z., & Marschner, P. (2005).** Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. *New Phytologist*, v. 168, n. 2, p. 305-312, 2005. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01558.
- Richardi, M. M., Dos Santos, W. O. L., Sousa, H. M., Da Silva, C. D. T., & Da Silva, J. W. F. (2023).** Uso de rocha carbonática e microrganismos como suprimento alternativo de fósforo. *Nativa*, Sinop, v. 11, n.1, p. 82-89. ISSN: 2318-7670. DOI: 10.31413/nativa.v11i1.13863.
- Rosa, P. A. L., Galindo, F. S., Oliveira, C. E. D. S., Jalal, A., Mortinho, E. S., Fernandes, G. C., ... & Teixeira Filho, M. C. M. (2022).** Inoculation with plant growth-promoting bacteria to reduce phosphate fertilization requirement and enhance technological quality and yield of sugarcane. *Microorganisms*, v. 10, n. 1, art. 192, 2022. DOI: 10.3390/microorganisms10010192.
- Salviano, A. M., Moura, M. S. B., Silva T. G. F., Carmo J. F. A., & Brandão E. O. (2017).** Acúmulo e exportação de macronutrientes pela cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Científica Intelletto*. v.2, n.2, p.16-27. ISSN 2525-9075.
- Soave, J. M. (2023).** *Bacillus spp.* e a promoção de crescimento vegetal: um enfoque na solubilização e mineralização de fosfato durante interação com cana-de-açúcar. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2023, 127 p. Dissertação (Mestrado).
- SOUSA, D. M. G., & Lobato, E. (2004).** Cerrado: correção do solo e adubação. ed. 2. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. p 416. ISBN 85-383-230-4.
- Tarumoto, M. B., de Campos, M., Momesso, L., do Nascimento, C. A. C., Garcia, A., Coscolin, R. B. D. S., ... & Crusciol, C. A. C. (2022).** Carbohydrate partitioning and antioxidant substances synthesis clarify the differences between sugarcane varieties on facing low phosphorus availability. *Frontiers in Plant Science*, 13, 888432.
- Timofeeva, A., Galyamova, M., & Sedykh, S. (2022).** Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. *Plants*, v. 11, n. 16, art. 2119, 2022. DOI: 10.3390/plants11162119.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA, UNICA (2025).** *UNICAdata: Observatório da Cana e Bioenergia*. São Paulo: UNICA. Disponível em: <https://unicadata.com.br/>. Acesso em: 02 maio 2026.
- United States Department of Agriculture, USDA. (2025).** *Sugar: World Markets and Trade*. Washington, DC: Foreign Agricultural Service, December. 7 p. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/sugar.pdf>. Acesso em: 02 maio 2026.

- Vasconcelos, F. I. C. (2023).** Fertilizantes Organominerais em interação com microrganismos e a produção de biomassa da cana-de-açúcar. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 34 p. Trabalho de conclusão de curso.
- Yi, K., Li, X., Chen, D., Yang, S., Liu, Y., Tang, X., ... & Zhao, Z. (2022).** Shallower root spatial distribution induced by phosphorus deficiency contributes to topsoil foraging and low phosphorus adaption in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 12, 797635.
- Zhou, K., Binkley, D., & Doxtader, K. G. (1992).** A new method for estimating gross phosphorus mineralization and immobilization rates in soils. *Plant and Soil*, v. 147, p. 243-250, 1992. DOI: 10.1007/BF00029076.

Capítulo 2 - Parâmetros nutricionais da cana-de-açúcar cultivada com carbonatito fosfático e microrganismos biossolubilizadores de fósforo

Nutritional parameters of sugarcane grown with phosphate carbonatite and phosphorus-solubilizing microorganisms

Parámetros nutricionales de la caña de azúcar cultivada con carbonatito fosfático y microorganismos biossolubilizadores del fósforo

RESUMO: A dependência do Brasil por fertilizantes importados e a baixa disponibilidade de fósforo em solos tropicais intensificam a busca por alternativas sustentáveis para a nutrição de culturas agrícolas. Objetivou-se avaliar o estado nutricional da cana-de-açúcar submetida a diferentes fontes de fósforo associadas a microrganismos biossolubilizadores. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições. Avaliaram-se três fontes de fósforo (pó de rocha de carbonatito fosfático, superfosfato simples e a combinação de ambos) associadas à inoculação/coinoculação de *Bacillus* spp., *Cladosporium cladosporioides* e *Trichoderma harzianum*. Aos 95 dias após o plantio, foram determinados os teores foliares de macro e micronutrientes. Os resultados evidenciaram que o uso do remineralizador proporcionou teores de fósforo semelhantes ao fertilizante solúvel, além de contribuir para o fornecimento de potássio. A combinação das fontes favoreceu o aumento de zinco. Quanto aos microrganismos, *Trichoderma harzianum* destacou-se por promover incrementos em fósforo, enxofre e micronutrientes, independentemente da fonte utilizada, enquanto *Bacillus* spp. e *Cladosporium cladosporioides* apresentaram maior eficiência quando associados a fontes pouco solúveis. Conclui-se que o uso de remineralizadores associado a microrganismos biossolubilizadores constitui uma estratégia promissora para aumentar a eficiência nutricional da cana-de-açúcar, reduzir a dependência de fertilizantes importados e promover sistemas produtivos sustentáveis.

Palavras-chave: cana-de-açúcar; fósforo; remineralizador; microrganismos; sustentabilidade.

ABSTRACT: Brazil's dependence on imported fertilizers and the low availability of phosphorus in tropical soils intensify the search for sustainable alternatives for crop nutrition. The objective was to evaluate the nutritional status of sugarcane subjected to different phosphorus sources associated with biosolubilizing microorganisms. The experiment was carried out in a greenhouse, in a randomized block design with four replications. Three phosphorus sources

were evaluated (phosphate carbonatite rock powder, single superphosphate, and a combination of both) associated with inoculation/co-inoculation of *Bacillus* spp., *Cladosporium cladosporioides*, and *Trichoderma harzianum*. Ninety-five days after planting, foliar macro- and micro-nutrient levels were determined. The results showed that the use of the remineralizer provided phosphorus levels like soluble fertilizer, in addition to contributing to potassium supply. The combination of sources favored an increase in zinc. Regarding microorganisms, *Trichoderma harzianum* stood out by promoting increases in phosphorus, sulfur, and micronutrients, regardless of the source used, while *Bacillus* spp. and *Cladosporium cladosporioides* showed greater efficiency when associated with poorly soluble sources. It is concluded that the use of remineralizers associated with biosolubilizing microorganisms constitutes a promising strategy to increase the nutritional efficiency of sugarcane, reduce dependence on imported fertilizers, and promote sustainable production systems.

Keywords: sugarcane; phosphorus; remineralizer; microorganisms; sustainability.

RESUMEN: La dependencia de Brasil de los fertilizantes importados y la baja disponibilidad de fósforo en los suelos tropicales intensifican la búsqueda de alternativas sostenibles para la nutrición de los cultivos. El objetivo fue evaluar el estado nutricional de la caña de azúcar sometida a diferentes fuentes de fósforo asociadas con microorganismos biosolubilizantes. El experimento se realizó en un invernadero, con un diseño de bloques aleatorizados con cuatro repeticiones. Se evaluaron tres fuentes de fósforo (polvo de roca de carbonatita de fosfato, superfosfato simple y una combinación de ambos) asociadas con la inoculación/coinoculación de *Bacillus* spp., *Cladosporium cladosporioides* y *Trichoderma harzianum*. Noventa y cinco días después de la siembra, se determinaron los niveles foliares de macro y micronutrientes. Los resultados mostraron que el uso del remineralizador proporcionó niveles de fósforo similares a los del fertilizante soluble, además de contribuir al aporte de potasio. La combinación de fuentes favoreció un aumento de zinc. En cuanto a los microorganismos, *Trichoderma harzianum* destacó por promover incrementos de fósforo, azufre y micronutrientes, independientemente de la fuente utilizada, mientras que *Bacillus* spp. y *Cladosporium cladosporioides* mostraron mayor eficiencia al asociarse con fuentes poco solubles. Se concluye que el uso de remineralizadores asociados con microorganismos biosolubilizantes constituye una estrategia prometedora para aumentar la eficiencia nutricional de la caña de azúcar, reducir la dependencia de fertilizantes importados y promover sistemas de producción sostenibles.

Palabras clave: cana de açúcar, ósforo, remineralizador, microorganismos, sustentabilidade.

4 INTRODUÇÃO

Por suas características edafoclimáticas, relevo e extensão territorial, o Brasil ocupa posição de destaque no agronegócio mundial, configurando-se como um dos maiores produtores e exportadores de alimentos do planeta. Esse protagonismo, no entanto, contrasta com a dependência estrutural crítica de fertilizantes importados. Em 2024, o país importou 41,34 milhões de toneladas de adubos, registrando aumento de 4,8% em relação ao ano anterior, sendo aproximadamente 60% dos fertilizantes fosfatados consumidos provenientes do mercado externo (ANDA, 2025). Considerando que as projeções oficiais indicam crescimento da produção brasileira de grãos de 2,7% ao ano até 2032 (MAPA, 2022), com consequente expansão da demanda por fertilizantes, essa dependência tende a acentuar caso não sejam desenvolvidas alternativas tecnológicas viáveis.

Nesse cenário, a cana-de-açúcar destaca-se no Brasil, pois está entre os maiores produtores mundiais, com produção estimada em 673,25 milhões de toneladas na safra 2025/26 (CONAB, 2026), e responde por aproximadamente 23% da produção global de açúcar (USDA, 2025). A soja, o milho e a cana-de-açúcar são responsáveis por mais de 73% do consumo nacional de fertilizantes (Brasil, 2021). A cana-de-açúcar tem elevada demanda nutricional: extrai por hectare, em média, 191,8 kg de N, 49,1 kg de P e 441,7 kg de K, exportando via colmo 124,7 kg de N, 36,9 kg de P e 332,6 kg de K (Salviano *et al*, 2017). Essa exigência, somada ao caráter perene da cultura, que mantém a área produtiva por cinco a sete anos, impõe pressão contínua sobre a aplicação de fertilizantes, com destaque para os fosfatados.

A situação é agravada pela natureza intrinsecamente limitante dos solos brasileiros quanto ao fósforo (P). Solos tropicais fortemente intemperizados, predominantes nas regiões agrícolas do país, apresentam baixa fertilidade natural e elevada capacidade de fixação desse nutriente em razão dos altos teores de óxidos de ferro e alumínio (Rengel e Marschner, 2005). Como consequência, parte da expressiva aplicação do P aplicado é rapidamente convertida em formas de baixa solubilidade, por meio de precipitação com Al^{3+} , Fe^{3+} e Ca^{2+} ou adsorção em argilominerais e óxidos (Havlin *et al*, 1999). Pavinato *et al*. (2020) estimam que mais de 70% do fertilizante fosfatado aplicado nas áreas agrícolas brasileiras permanece retido em formas indisponíveis às plantas, configurando o chamado “fósforo legado”. Esse paradoxo de solos com altos teores de P total, mas baixa disponibilidade, perpetua o ciclo de aplicação de elevadas doses de fertilizantes químicos solúveis e a consequente dependência das importações.

Diante desse contexto, torna-se relevante a busca por estratégias que reduzam a dependência externa e maximizem o aproveitamento dos nutrientes já presentes no solo. Duas linhas destacam-se: o uso de remineralizadores de solo, obtidos a partir de rochas finamente moídas (Moraes, 2021); e a inoculação de microrganismos solubilizadores, capazes de disponibilizar P retido por meio da produção de ácidos orgânicos e enzimas (Oliveira-Paiva *et al.*, 2022). Quando combinadas, essas estratégias podem potencializar mutuamente a eficiência, uma vez que os microrganismos aceleram a liberação dos nutrientes contidos nos minerais primários. Nesse contexto, iniciou-se em 2022 a extração de um carbonatito fosfático no município de Mundo Novo – GO, rocha cuja composição química é rica em CaO, MgO, K₂O e, particularmente, P₂O₅, conforme análise mineralógica do Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), apresentando elevado potencial agrônomico. Comercializado sob a nomenclatura “GOFOS”, esse material pode ser aplicado por produtores regionais, porém, ainda carece de validação científica quanto aos efeitos sobre a nutrição e o desenvolvimento das plantas, especialmente quando associado a microrganismos solubilizadores.

Embora a cana-de-açúcar apresente interações reconhecidamente positivas com a microbiota do solo (Vasconcelos *et al.*, 2023), são escassos os estudos que avaliam o uso combinado de remineralizadores e biossolubilizadores nessa cultura (Nascimento, 2020; Soave, 2023), o que configura clara lacuna científica e tecnológica. Diante desse cenário, hipotetiza-se que a aplicação do carbonatito fosfático associada à inoculação de microrganismos solubilizadores de fósforo proporcione melhor estado nutricional e desenvolvimento à cana-de-açúcar do que cada estratégia isoladamente. Para testar essa hipótese, objetivou-se avaliar o estado nutricional da cana-de-açúcar cultivada com diferentes fontes de fósforo associadas ao uso de microrganismos biossolubilizadores, buscando identificar interações promissoras que contribuam para a nutrição das plantas e para a sustentabilidade dos processos produtivos.

5 MATERIAL E METODOS

Este trabalho foi desenvolvido em condições de casa de vegetação na fazenda escola do IF Goiano Campus Iporá. Cada unidade experimental foi constituída por vaso plástico com capacidade volumétrica de 10 L. O experimento foi montado em um delineamento de blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições. Testou-se o uso do carbonatito fosfático (GOFOS) e superfosfato simples (SSP) como fonte de fósforo (3 tratamentos), equivalente a 350 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sendo: 1 – 100% na forma pó de rocha (PR); 2 – 50% na forma pó de rocha (PR) + 50%

na forma de superfosfato simples (SSP); 3 – 100% na forma SSP, associado ao uso de microrganismos solubilizadores (9 tratamentos), sendo: 1 – testemunha (sem inoculação); 2 – *Bacillus amyloliquefaciens* (Amy); 3 – *Bacillus aryabhattai* (Ary); 4 – *Cladosporium cladosporioides* (Cla); 5 – Amy + Ary; 6 – Amy + Cla; 7 – Ary + Cla; 8 – Amy + Ary + Cla; e 9 – produto comercial "Trichodermil® SC" com *Trichoderma harzianum* (T. Har.), totalizando 108 unidades experimentais.

Lembrando que o Trichodermil® SC, fornecido pela empresa Koppert, está registrado no MAPA sob nº 22318, como fungicida e nematicida microbiológico composto pela cepa ESALQ-1306 de *Trichoderma harzianum*, com concentração mínima de $2,0 \times 10^9$ conídios viáveis mL⁻¹. Foi o primeiro fungicida biológico registrado no Brasil, sendo recomendado para o controle de fungos fitopatogênicos de solo e nematoides, incluindo *Fusarium* spp. (podridão-radicular-seca), *Rhizoctonia* spp. (podridão-radicular), *Sclerotinia sclerotiorum* (mofo-branco), *Thielaviopsis paradoxa* (podridão-abacaxi) e *Pratylenchus zae* (nematóide-das-lesões), em todas as culturas com ocorrência dos alvos biológicos, incluindo cana-de-açúcar (Koppert, 2024). Enquanto os demais microrganismos utilizados foram multiplicados e fornecidos pelo Laboratório de Microbiologia do IF Goiano Campus Iporá (CEBIO), mantendo para cada inoculante, a concentração mínima de $2,0 \times 10^8$ UFC mL⁻¹.

Vale ressaltar que o *Cladosporium cladosporioides*, trata-se de um fungo cosmopolita reconhecido como habitante típico da filosfera, embora possa ocorrer como endófito e na rizosfera (Bensch *et al*, 2010). Considerando que, neste experimento, o *C. cladosporioides* foi inoculado no solo, em contato com o sistema radicular, é plausível que a adaptação a esse nicho, distinto de seu habitat preferencial na parte aérea, tenha influenciado o desempenho, e pode explicar a resposta mais modesta quando inoculado isoladamente, em comparação com a contribuição em determinadas coinoculações. Essa hipótese, contudo, demandaria estudos de colonização e sobrevivência do fungo na rizosfera para ser confirmada.

Para enchimento dos vasos foi utilizado material coletado na camada de 0,0 – 0,20 m de profundidade de um Latossolo Vermelho escuro, cujo laudo da análise química revelou pH em CaCl₂ de 5,8; teores de 2,7 cmolc/dm³ de Ca²⁺ e 0,6 cmolc/dm³ de Mg²⁺, 214 mg/dm³ de K⁺, 2,0 mg/dm³ de P, 6,0 mg/dm³ de S, 0,23 mg/dm³ de B, 1,9 mg/dm³ Cu, 103 mg/dm³ de Fe, 114 mg/dm³ de Mn, 0,8 mg/dm³ de Zn, 0,0 cmolc/dm³ de Al³⁺, 12 g kg⁻¹ de matéria orgânica e CTC total de 5,35 cmolc/dm³. Quanto a composição granulométrica, apresentou 550 g kg⁻¹ de argila, 130 g kg⁻¹ de silte e 320 g kg⁻¹ de areia. Após a coleta, o material de solo foi destorroado e passado em peneira com malha de 4,00 mm para padronização. Na sequência, utilizando o método da estufa, também foi determinada a umidade residual do solo, utilizada para quantificação

da massa de solo seco adicionada em cada vaso, que foram montados mantendo-se uma densidade do solo de 1,1 Mg m³.

Foi determinada a massa exata de solo adicionada em cada unidade experimental, sendo na sequência, conforme cada tratamento de cada unidade experimental, adicionadas as fontes de fósforo (100% PR; 50% PR + 50% SSP e 100% SSP), misturando-as de forma homogênea ao solo utilizado no preenchimento de cada vaso. Deste modo, nos vasos com 100% PR, foram adicionados 23,3 g de GOFOS em cada vaso; nos vasos com 50% PR + 50% SSP, adicionaram 11,65 g de GOFOS + 3,80 g de SSP; e, nos vasos com 100% de SSP, adicionaram 7,60 g de SSP. Na sequência, efetuou-se a homogeneização das fontes de P com a massa de solo de cada unidade experimental, colocando-o posteriormente nos vasos, previamente identificados de 1 a 108, dispostos em quatro linhas na casa de vegetação, considerando cada linha como um bloco.

O carbonatito fosfático/pó de rocha utilizado, é proveniente da mina localizada no município de Mundo Novo – GO, comercializado como fertilizante natural "GOFOS". Conforme análise mineralógica realizada pelo Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), possui na composição química 28,2% de SiO₂, 2,48% TiO₂, 11,04 Al₂O₃, 20,84 % de Fe₂O₃, 1,2% MnO, 4,34% MgO, 12,27% CaO, 0,13 % de Na₂O, 4,93 % de K₂O e 8,21 % de P₂O₅. tendo como minerais primários biotita e annita (35,06%), sanidina (25,7%), fluorapatita (19,01%), goethita (14,6%), calcita (3,89%), rutilo (0,93%) e diopsídio (0,80%). Quanto a granulometria, para as classes de partículas > 2,00 mm; 1,00 a 2,00 mm; 0,500 a 1,00 mm; 0,250 a 0,500 mm; 0,160 a 0,250 mm e fundo, obteve-se respectivamente em % 0,1; 1,9; 12,2; 25,5; 27,4 e 32,9, caracterizando-o como de granulometria fina, uma vez que 85,9% das partículas possuem tamanho inferior a 0,5 mm (MAPA, 2018).

No dia 18 de outubro de 2024 realizou-se o plantio manual das mudas de cana-de-açúcar, cultivar CTC 4. Foram abertas pequenas covas no centro de cada vaso, plantando uma muda pré-brotada (MPB) com 45 dias de formação. As mudas foram obtidas de viveiro comercial certificado, que atua na produção e comercialização de mudas de cana. Durante o plantio das mudas, adotaram-se cuidados para garantir o bom pegamento e o desenvolvimento adequado das plantas, selecionando-se mudas que apresentassem o mesmo padrão de desenvolvimento, acondicionando solo junto às mesmas. Sete dias após o plantio (em 25/10/2024) realizou-se a inoculação dos tratamentos biológicos com os organismos biossolubilizadores.

A inoculação foi realizada manualmente, com o auxílio de uma seringa graduada, distribuindo-se o inoculante diretamente sobre a base de cada planta, seguindo a dose recomendada e conforme seu respectivo tratamento. Deste modo, por causa do baixo volume de cada inoculante a ser adicionado por vaso, a alíquota total de cada produto biológico utilizada em todo o

experimento foi diluída em 150 mL de água destilada, aplicando-se 10 mL desta solução diluída. Posteriormente, visando garantir melhores condições para que estes microrganismos entrassem em contato com o sistema radicular das plantas, adicionando mais 1,0 kg de solo na superfície de cada vaso, formando assim uma camada de aproximadamente 1,0 cm de espessura.

Durante todo o período experimental, a irrigação foi realizada via gotejamento. Utilizando mangueiras com gotejadores espaçados de 0,50 m entre si e vazão de 1,6 L min⁻¹. Assim, cada vaso ficou localizado embaixo de cada um dos gotejadores, permitindo irrigar com uniformidade todo o experimento de uma única vez quando o sistema era acionado. Após dada a montagem dos vasos, como o solo estava praticamente seco, objetivando proporcionar melhores condições para dissolução do carbonato fosfático e o SSP, efetuou-se a irrigação dos vasos, deixando o solo com a umidade próxima a capacidade de campo, mantendo-os nesta condição por 30 dias, até o plantio das MPB, que ocorreu no dia 18 de outubro de 2024, dando continuidade na irrigação dos vasos logo após o plantio.

Na data de 25 de outubro de 2024, dia da inoculação dos microrganismos nas unidades experimentais, efetuou-se a irrigação após a inoculação, garantindo desta forma proteção contra o estresse térmico e condições hídricas adequadas para sobrevivência dos microrganismos inoculados. Nas semanas iniciais de desenvolvimento das plantas, devido à baixa demanda hídrica, as irrigações foram pouco frequentes (2 a 3 vezes por semana). Porém, nos últimos 30 dias de condução, como as plantas estavam bem desenvolvidas, tornou-se necessário irrigar duas vezes por dia, sendo as irrigações realizadas no início da manhã e no final da tarde.

Como tratamentos fitossanitários, foi necessário realizar no dia 4 de novembro de 2024 à aplicação do acaricida Abamex (dosagem de 200 mL ha⁻¹ do produto comercial) e do inseticida Engeo Pleno (dosagem de 200 mL ha⁻¹ do produto comercial). Utilizando-se um pulverizador costal, com bico cônico com indução de ar para evitar perdas por deriva. Além disso, durante o período em que as plantas estavam desenvolvendo-se, elas começaram a apresentar discreto amarelecimento das folhas mais velhas, indicando possível deficiência de nitrogênio. Para suprir a demanda deste nutriente, bem como de enxofre, uma vez que a cana é bastante exigente neste elemento, realizou-se em 29 de novembro de 2024 (41 dias após o plantio) a aplicação de sulfato de amônio, na dose de 100 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Quanto à adubação potássica, em razão do elevado teor de K⁺ apresentado pelo solo na análise química inicial (214 mg dm⁻³, classificado como muito alto segundo a interpretação de Brasil e Cravo, 2020), não foi necessária a aplicação de cloreto de potássio (KCl) em cobertura, uma vez que a disponibilidade natural do nutriente foi considerada suficiente para atender à demanda da cultura durante

o período de condução do experimento.

A coleta do experimento foi realizada 95 dias após o plantio, e foi feito a separação de parte aérea e sistema radicular a partir de um corte próximo a superfície do solo em cada unidade experimental. Efetuando uma amostragem das folhas para realização da análise bromatológica do tecido vegetal, visando avaliar o estado nutricional das plantas. Para isso, coletaram-se 10 a 12 folhas de cada unidade experimental. Na sequência, removeu-se a nervura principal, sendo o limbo foliar acondicionado em saco de papel em estufa com circulação forçada de ar a 65°C. Após completamente secas, as amostras foliares foram trituradas em moinho de facas tipo Willey, sendo o material acondicionado em embalagens plásticas para realização das análises químicas.

Inicialmente as amostras foram digeridas em solução nitroperclórica e, posteriormente determinados os teores dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), sendo os resultados expressos em g kg^{-1} , bem como dos micronutrientes cobres (Cu), boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), com resultados expressos em mg kg^{-1} . Após coleta e tabulação, os dados foram submetidos à análise de variância com aplicação do Teste F a 5% e, quando detectado efeito significativo dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, utilizando-se o programa SASM-Agri.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As fontes de fósforo e os microrganismos biossolubilizadores de P promoveram variações nos teores foliares de macro e micronutrientes da cana-de-açúcar, decorrentes tanto de efeitos isolados, quanto da interação entre os fatores. Ao analisar isoladamente as fontes de P, verificou-se efeito significativo sobre os teores foliares de potássio e zinco (Tabela 1).

Para o potássio, maior teor foliar foi observado nas plantas cultivadas com 100% PR ($11,2 \text{ g kg}^{-1}$), ao comparar os dados deste tratamento, com os obtidos com 50% PR + 50% SSP e 100% SSP, o uso exclusivo do GOFOS promoveu incremento de respectivamente, 3,2% e 5,4% nos teores foliares de K. Esse resultado sugere que o GOFOS, por apresentar aproximadamente 4,9% de K_2O em sua composição química (laudo CRTI), além de fontes minerais de K como a biotita/annita (35,06%) e a sanidina (25,7%) podem ter contribuído como fontes complementares desse nutriente para a cultura.

Considerando que não foi realizada adubação potássica de cobertura no decorrer do experimento, justificada pelo elevado teor inicial de K no solo, de modo que o aporte adicional de K ao sistema dependeu exclusivamente das fontes de P utilizadas, no caso, apenas o GOFOS,

uma vez que o SSP não contém K na composição. Esse menor teor foliar de K observados nos tratamentos com 100% SSP e 50% PR + 50% SSP pode ser atribuída à elevada mobilidade deste elemento no solo, uma vez que o K^+ apresenta fraca adsorção eletrostática aos colóides do solo. Assim sob as irrigações frequentes, o K^+ disponível no solo pode ter sido facilmente lixiviado para além da zona radicular (Xu *et al*, 2025), uma vez que o experimento foi irrigado diariamente, mantendo o solo próximo à capacidade de campo, e nestes tratamentos, favorecendo perdas por deslocamento além da zona radicular (Gomes *et al*, 2022). Por outro lado, pode ter favorecido para dissolução gradual dos minerais que possuem potássio na composição química, tais como biotita, annita e sanidina presentes no carbonatito fosfático.

Xu *et al*. (2025) destacam que a eficiência no manejo do potássio depende fortemente da disponibilidade do nutriente no solo e das condições de umidade, fatores determinantes para a absorção e o aproveitamento do K pelas plantas. Logo, o maior teor foliar de K observado nas plantas cultivadas com GOFOS, reforça a capacidade de liberação lenta de K ao longo do ciclo da cultura, que pode ter contribuído para minimizar perdas por lixiviação, proporcionando a liberação gradual deste nutriente no decorrer de todo período experimental. Ressalta-se, contudo, que para confirmação dessa interpretação, demanda da determinação dos teores de K disponível e trocável no solo ao final do ciclo experimental, bem como ensaios específicos sobre a cinética de liberação do K a partir do carbonatito, o que constitui perspectiva relevante para estudos subsequentes.

Para o zinco (Zn), independente da fonte de fósforo utilizada, os teores obtidos (43,1 a 45,1 $mg\ kg^{-1}$) ficaram acima da faixa considerada adequada para a cana-de-açúcar, que é de 10 a 30 $mg\ Kg^{-1}$ (Cantarella *et al*, 2022). No entanto, mesmo com os teores acima do recomendado, nos vasos em que se utilizou como fonte de P a combinação de 50%PR + 50%SSP (45,1 $mg\ kg^{-1}$), as plantas apresentaram maior teor deste elemento nas folhas (Tabela 1), sendo 4,3% superior ao observado nas plantas adubadas com 100% PR e 4,6% superior ao das adubadas com 100% SSP.

Tabela 1. Efeito isolado das fontes de fósforo (100% PR – pó de rocha de carbonatito fosfático; 100% SSP - superfosfato simples e 50% PR + 50% SSP) para o teor dos macronutrientes e micronutrientes nas folhas de cana-de-açúcar aos 95 dias após o plantio. Iporá-GO, 2025. Médias seguidas da mesma letra minúscula (na linha) e ausência de letras indica não haver diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5,0 de probabilidade.

	100% PR	50% PR + 50% SSP	100% SSP
Macronutrientes	-----g Kg ⁻¹ -----		
Nitrogênio (N)	18,5	18,9	18,7
Fósforo (P)	1,5	1,5	1,5
Potássio (K)	11,2 a	10,8 ab	10,6 b
Cálcio (Ca)	7,2	7,2	7,2
Magnésio (Mg)	1,6	1,5	1,6
Enxofre (S)	2,4	2,4	2,5
Micronutrientes	-----mg Kg ⁻¹ -----		
Boro (B)	6,3	6,4	5,7
Cobre (Cu)	12,4	12,6	11,9
Ferro (Fe)	146	153	154
Manganês (Mn)	355	346,6	347
Zinco (Zn)	43,3 b	45,1 a	43,1 b

Fonte: Elaborado pelos autores.

Strithaworn *et al.* (2023) salientam que o zinco é um micronutriente essencial para as plantas, atuando na atividade de enzimas, síntese proteica e regulação hormonal, sendo sua deficiência comum em muitos solos agrícolas, fato que tem afetado produtividade e qualidade nutricional das plantas. A absorção de Zn pela cana-de-açúcar é influenciada por múltiplos fatores, com destaque para a interação com o fósforo, amplamente reportada na literatura. Santos *et al.* (2024), avaliando solos brasileiros, demonstraram que doses crescentes de P solúvel podem reduzir o Zn trocável e aumentar a fração de Zn ligada a óxidos de Fe e Al (frações de menor disponibilidade), caracterizando o conhecido efeito antagônico entre P e Zn.

Logo o maior teor foliar de Zn observado com a combinação 50% PR + 50% SSP pode estar relacionado a possível efeito de amenizado desse antagonismo. Enquanto o tratamento com 100% SSP fornece todo o P de forma solúvel, condição em que a literatura aponta maior potencial de redução da disponibilidade de Zn, a combinação parcial com o GOFOS introduz um componente de liberação gradual de P, e pode resultar em dinâmica química do solo distinta daquela proporcionada pela fonte exclusivamente solúvel. Adicionalmente, é importante

considerar que o próprio GOFOS, por se tratar de uma rocha com matriz mineralógica complexa (biotita, sanidina, fluorapatita, goethita), pode conter Zn associado a esses minerais, embora essa informação não conste explicitamente do laudo mineralógico apresentado.

Contudo, tais interpretações não foram diretamente comprovadas neste estudo. A confirmação dos mecanismos envolvidos demanda da determinação dos teores de Zn disponível, trocável e ligado a frações minerais no solo ao final do experimento, bem como a quantificação do teor de Zn nas próprias fontes de fertilizante utilizadas. Do ponto de vista agrônomo, os incrementos numéricos observados (na ordem de 4 a 5%) ocorreram em condições de teor foliar acima da faixa adequada, de modo que não representam ganho nutricional efetivo para a cultura, embora sejam relevantes para compreender a dinâmica química do sistema.

Para o manganês (Mn), também foram observados teores elevados, independente da fonte de P testada, em média, 3 vezes superior ao recomendado por Cantarella *et al.* (2022) para a cana-de-açúcar, que é entre 25 e 100 mg Kg⁻¹. Este comportamento, possivelmente está associado aos diversos ciclos de umedecimento e secagem dos vasos, que, devido ao tamanho das plantas e a elevada demanda hídrica no final do ciclo, rapidamente exauriam a água disponível no solo, favorecendo mais de um ciclo de umedecimento e secagem diários, aumentando a disponibilidade de manganês para as plantas, principalmente por promover a redução de óxidos de manganês insolúveis (Mn⁴⁺) para formas solúveis e trocáveis (Mn²⁺), que são absorvíveis pelas raízes (Rengel, Cakmak e White, 2023).

Em contrapartida, ao analisar os microrganismos biossolubilizadores de P testados, verificou-se efeito significativo não apenas sobre os teores foliares, de potássio e zinco, mas também sobre os de enxofre, boro e manganês (Tabela 2). Para o K, maior teor foliar foi observado com a coinoculação de *Bacillus amyloliquefaciens* + *Cladosporium cladosporioides* (Amy. + Cla.), com 11,2 g kg⁻¹, diferindo estatisticamente do tratamento com *B. aryabhatai* + *C. cladosporioides* (Ary. + Cla.), que apresentou o menor valor (10,3 g kg⁻¹), enquanto os demais tratamentos apresentaram valores semelhantes entre si e à testemunha.

O resultado superior obtido com a coinoculação Amy. + Cla. está em consonância com literaturas recentes, que reconhece tanto o gênero *Bacillus* spp. quanto o *Cladosporium* spp. entre os principais grupos de microrganismos solubilizadores de potássio, atuando na disponibilização de K a partir de minerais primários como feldspatos, micas (biotita e muscovita), illita e outros silicatos (Etesami *et al.*, 2017; Sattar *et al.*, 2019; Damathia *et al.*, 2025). Especificamente, *Cladosporium* spp. têm sido reportado como gênero fúngico relevante para a solubilização de K, atuando por meio de mecanismos complementares aos das bactérias

(Damathia *et al*, 2025). Tal característica é particularmente relevante no contexto deste experimento, em que o GOFOS apresenta na composição mineralógica 35,06% de biotita/annita e 25,7% de sanidina (minerais ricos em K), mas de lenta dissolução natural, cuja liberação do nutriente pode ter sido potencializada pela ação combinada dos dois grupos microbianos, embora a quantificação da solubilização *in situ* não tenha sido realizada neste estudo.

Os mecanismos pelos quais esses microrganismos atuam na liberação de K incluem a excreção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (cítrico, oxálico, tartárico, glucônico, succínico e málico), a acidificação rizosférica via liberação de prótons (H⁺), a quelação de cátions adjacentes ao K nas estruturas minerais (Ca²⁺, Mg²⁺, Si⁴⁺, Al³⁺ e Fe³⁺) e a produção de exopolissacarídeos (EPS) e sideróforos que promovem o intemperismo biológico dos silicatos potássicos (Etesami *et al*, 2017; Damathia *et al*, 2025). Esses mecanismos são similares e atuam na solubilização do fósforo, explicando porque muitos gêneros, incluindo *Bacillus* spp. e *Cladosporium* spp., são funcionalmente classificados como solubilizadores duplos.

Apesar da resposta estatística pouco expressiva entre a maioria dos tratamentos, os incrementos numéricos observados em relação à testemunha de 2,7% (Amy. + Cla.), 1,8% (Amy. + Ary.), 1,8% (*B. aryabhatai*) e 0,91% (*C. cladosporioides*), sugerem um potencial promissor para o uso desses microrganismos na cultura da cana-de-açúcar. Cabe destacar, que a magnitude da resposta pode ter sido limitada pelo elevado teor inicial de K no solo (214 mg dm⁻³), condição na qual a contribuição relativa da solubilização biológica de K tende a ser proporcionalmente menor do que em solos com baixa disponibilidade natural do nutriente.

Quanto ao teor foliar de enxofre, menor teor foi observado nas plantas com a coinoculação de Ary. + Cla. com 2,3 g kg⁻¹ (Tabela 2). Considerando que essa mesma combinação (Ary. + Cla.) também apresentou o menor teor foliar de K na Tabela 2, é plausível supor que a interação específica entre *B. aryabhatai* e *Cladosporium cladosporioides* possa não ter resultado em complementaridade funcional na rizosfera, podendo inclusive ter ocorrido competição por nicho ou por substratos carbonados entre os dois microrganismos. Essa hipótese é coerente com o comportamento ecológico distinto desses organismos, considerando que o *C. cladosporioides* é fungo predominantemente associado à filosfera (Bensch *et al*, 2010) e, ao ser inoculado no solo, pode estabelecer interações imprevistas com microrganismos rizosféricos como *B. aryabhatai*. Esse tipo de antagonismo em coinoculações bactéria-fungo, modulado pela compatibilidade específica entre cepas, é amplamente reportado na literatura (Poveda e Eugui, 2022).

Contudo, no tratamento que foi adicionado o *B. amyloliquefaciens* (Amy.) a esse consórcio (Amy. + Ary. + Cla.), e até mesmo substituído o Cla. por Amy. (Amy. + Ary.), houve

melhora da interação entre microrganismos, favorecendo um ambiente mais ativo, resultando incremento de 7,6% nos teores de S destes tratamentos, quando comparado com a testemunha. Espécies de *B. amyloliquifaciens* têm sido reportadas como promotoras de crescimento vegetal, com capacidade de produzir ácidos orgânicos, modular o pH rizosférico, secretar enzimas e produzir fitohormônios, características que, em conjunto, podem favorecer a ciclagem do S orgânico do solo e a absorção do nutriente pelas raízes (Etesami *et al*, 2017).

A inoculação com *Trichoderma harzianum* (T. Har.) também se destacou entre os maiores teores de S, com incremento de 7,6% em relação a testemunha. O *T. harzianum* é conhecido por promover alterações expressivas no sistema radicular, aumentando o volume de raízes finas e à área de absorção, além de estimular rotas fisiológicas associadas ao transporte de nutrientes. Mendes *et al.* (2022) relatam que fungos rizosféricos desse gênero podem intensificar a ciclagem de nutrientes no solo e conferir maior eficiência nutricional à planta, o que explica o incremento observado no teor foliar de S. Assim os resultados indicam que, inoculações contendo *Trichoderma harzianum* e coinoculações contendo *Bacillus* spp. podem atuar de forma sinérgica para aumentar a absorção desse nutriente essencial. Contudo, tais interpretações tem base na literatura, uma vez que neste estudo não foram quantificadas a atividade enzimática rizosférica, a produção de ácidos orgânicos pelos microrganismos, a colonização radicular, nem o S disponível no solo ao final do experimento.

Para o micronutriente boro (B), também foi verificado comportamento diferenciado entre os tratamentos microbiológicos (Tabela 2). Os maiores teores foliares foram observados nas plantas inoculadas, foram com T. Har., e nas coinoculações de Amy. + Ary. + Cla. e Ary. + Cla., com incrementos de 19,4, 18,3 e 17,1% em relação à testemunha, respectivamente. Por outro lado, os tratamentos Amy. + Ary., Amy. + Cla. e Ary. apresentaram os menores teores foliares de B, com reduções de 18,4, 3,5 e 3,5%, respectivamente, quando comparados à testemunha, evidenciando que diferentes combinações vêm a exercer efeitos contrastantes sobre a absorção desse micronutriente pela cana-de-açúcar.

Porém cabe destacar, que os teores foliares observados representam o resultado integrado de múltiplos processos atuantes no sistema solo-microrganismo-planta, não permitindo, isoladamente, identificar qual mecanismo prevaleceu em cada tratamento. Os microrganismos utilizados, atuam tanto como promotores de crescimento vegetal, quanto como solubilizadores de nutrientes, exercendo efeitos por vias complementares (Etesami *et al*, 2017; Pang *et al*, 2024), seja por promover diretamente o crescimento radicular ou até modificar a química da rizosfera, por causa desses dois mecanismos atuarem de forma sinérgica e

simultânea, tornando indistinguível, com base apenas nos teores foliares isolados, a contribuição relativa de cada um.

Tabela 2. Efeito isolado dos microrganismos no teor de nutrientes nas folhas de cana-de-açúcar aos 95 dias, após o plantio com inoculações de *Bacillus amyloliquefaciens* (Amy), *Bacillus aryabhattai* (Ary.), *Cladosporium cladosporioides* (Cla) e *Trichoderma harzianum* (T. Har.), das coinoculações Amy. + Ary.; Amy. + Cla.; Ary. + Cla., Amy. + Ary. + Cla. e testemunha (Test.). Médias seguidas da mesma letra minúscula (na linha) e ausência de letras indica não haver diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5,0 de probabilidade.

	Test.	Amy.	Ary.	Cla.	Amy. + Ary.	Amy. + Cla.	Ary. + Cla.	Amy. + Ary. + Cla.	T. Har.
	-----g Kg ⁻¹ -----								
N	18,8	18,6	18,4	18,9	18,2	18,9	18,6	19,1	19,0
P	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,5
K	10,9 ab	10,9 ab	11,1 ab	11,0 ab	11,1 ab	11,2 a	10,3 b	10,7 ab	10,6 ab
Ca	7,4	7,4	7,0	7,2	6,8	7,1	7,0	7,4	7,5
Mg	1,9	1,6	1,5	1,4	1,5	1,5	1,4	1,7	1,5
S	2,4 ab	2,4 ab	2,4 ab	2,4 ab	2,6 a	2,5 ab	2,3 b	2,6 a	2,6 a
	-----mg Kg ⁻¹ -----								
B	5,8 ab	6,2 ab	5,6 b	5,8 ab	4,9b	5,6 b	7,0 a	7,1 a	7,2 a
Cu	12,2	11,9	12,7	13,2	11,8	12,0	12,6	12,6	11,9
Fe	143,8	150,4	152,6	155,1	151,1	145,9	150,2	161,6	154,9
Mn	368,6 a	337,6 ab	295,0 b	354,8 ab	339,3 ab	364,3 ab	334,4 ab	365,2 ab	386,8 a
Zn	43,6 ab	41,7 b	45,3 a	42,4 b	45,6 a	43,2 b	42,1 b	44,1 ab	46,4 a

Fonte: Elaborado pelos autores.

No caso específico do B, a dinâmica no solo é particularmente sensível a variações no ambiente radicular, sendo fortemente influenciada por alterações de pH, conteúdo de matéria orgânica, umidade e equilíbrio de cátions e ânions na solução do solo (Shireen *et al*, 2018). Logo essas variações podem ser induzidas tanto pela atividade do microrganismo, por meio da decomposição da matéria orgânica e da liberação de B associados a complexos orgânicos, tanto quanto indiretamente, em razão do maior fluxo de massa promovido por um sistema radicular mais desenvolvido. Dado isso, é plausível supor que os incrementos de B nas plantas tenham,

resultado de uma combinação desses efeitos, embora os dados aqui apresentados não permitam quantificar a contribuição individual.

Visando os resultados que apresentaram redução dos teores de B, surge a hipótese de que, seja possível que esses microrganismos tenham promovido maior competição iônica ou modificado a dinâmica de adsorção e dessorção de B no solo. Contudo, cabe ressaltar que à avaliação restrita aos teores de foliares não permite separar os efeitos atribuíveis à promoção direta do crescimento radicular dos efeitos atribuíveis à solubilização biológica de nutrientes.

Os microrganismos inoculados também influenciaram de forma diferenciada o teor de manganês (Mn) nas folhas de cana-de-açúcar (Tabela 2), com menor teor observado nas plantas inoculadas com *Bacillus aryabhattai* (295,0 mg kg⁻¹), valor estatisticamente inferior ao obtido com *Trichoderma harzianum* (386,8 mg kg⁻¹) e à testemunha (368,6 mg kg⁻¹), representando reduções de 23,7 e 19,9%, respectivamente.

Os mecanismos envolvidos na dinâmica do Mn no sistema solo–planta são complexos. Rengel, Cakmak e White (2023) ressaltam que a disponibilidade desse micronutriente depende fortemente do estado redox do solo, uma vez que a forma absorvível Mn²⁺ pode ser oxidada a Mn³⁺ e Mn⁴⁺, presentes em óxidos de menor solubilidade, sendo modulada por fatores como pH, ciclos de umedecimento e secagem, conteúdo de matéria orgânica e atividade microbiana. Em condições de pH mais baixo, a fração de Mn²⁺ tende a predominar, aumentando a disponibilidade do nutriente, enquanto em condições de pH mais elevado prevalecem as formas oxidadas, de menor disponibilidade. O solo utilizado no presente experimento apresentou pH em CaCl₂ de 5,8, condição em que o equilíbrio entre as formas de Mn é particularmente sensível à atividade biológica e à oxirredução microbiana.

Diante desse panorama, o menor teor foliar de Mn observado com *B. aryabhattai* pode estar associado a possível modificação do equilíbrio redox na rizosfera induzida pela atividade desse microrganismo, com favorecimento da oxidação do Mn²⁺ para formas menos disponíveis. De forma similar, a literatura alega que o *T. harzianum* pode produzir ácidos orgânicos e quelantes capazes de solubilizar Mn de óxidos minerais, contribuindo para a disponibilidade. Porém para a testemunha (sem inoculação), apresentou teor semelhante ao tratamento inoculado com *T. harzianum*, sugerindo que o efeito desse fungo sobre a dinâmica do Mn nas condições do presente experimento foi limitado. A elevada disponibilidade inicial de Mn no solo (114 mg dm⁻³), aliada à acidificação rizosférica natural decorrente da extrusão de H⁺ pelo sistema radicular da cana, pode ter mantido o suprimento de Mn em níveis elevados independentemente da inoculação, dificultando a observação de efeitos atribuíveis exclusivamente ao microrganismo.

Contudo, tendo em vista que este presente trabalho apresenta somente avaliação dos teores foliares dos macros e micronutrientes, faz-se necessário avaliações em função da determinação dos teores de Mn disponível e suas frações no solo ao final do experimento, avaliação do potencial redox da rizosfera e a quantificação do conteúdo total acumulado de Mn pela planta, análises que constituem perspectiva relevante para estudos futuros.

Quanto ao teor de zinco (Zn), os menores valores foliares foram observados nas plantas inoculadas com *Bacillus amyloliquefaciens* e *Cladosporium cladosporioides* isoladamente, bem como nas coinoculações com Amy. + Cla. e Ary. + Cla. (Tabela 2). Cabe ressaltar, contudo, que esses microrganismos são reconhecidos na literatura como produtores de ácidos orgânicos e capazes de solubilizar formas pouco disponíveis de Zn na rizosfera (Srithaworn *et al*, 2023; Pang *et al*, 2024). Dessa forma, devido a produção de ácidos orgânicos e a atividade solubilizadora não ter sido quantificadas neste estudo. Esses menores teores de Zn podem ser interpretados por meio de hipóteses alternativas. A primeira, em um cenário em que o tratamento tenha proporcionado maior produção de matéria seca, e o Zn absorvido venha a ser distribuído em maior massa vegetal, reduzindo a concentração foliar sem necessariamente implicar menor absorção total. A segunda hipóteses, no cenário que a solubilização de P é favorecida, tendo o aumento da disponibilidade de fósforo na solução do solo, podendo reduzir a absorção e o transporte de Zn pela planta, fenômeno amplamente reportado em solos tropicais (Santos *et al*, 2024). E por fim, o cenário em que alterações no pH e no equilíbrio de cátions promovidas pela atividade microbiana podem ter modificado a dinâmica de adsorção e dessorção do Zn no solo.

Para o B e Zn, observou-se também efeito significativo da interação das fontes de P e dos microrganismos inoculados (Tabela 3). Deste modo, com o uso de uma fonte pouco solúvel P como o GOFOS (100%PR), maior teor foliar de B foi observado nas plantas coinoculadas com Ary. + Cla. e inoculadas com *Trichoderma harzianum*. No entanto, quando houve somente o uso de uma fonte solúvel com o superfosfato simples (100 % SSP), as plantas inoculadas com *T. harzianum* também apresentaram maior teor foliar de B. Em contrapartida, ao utilizar a mistura destas duas fontes de P (50%SSP + 50%PR), teores mais elevados de B foram observados com a inoculação de *Bacillus amyloliquefaciens* (Amy.) e a coinoculação de Amy. + Ary. + Cla, indicando que os microrganismos responderam de forma diferenciada quanto disponibilidade de boro para as plantas em função da fonte de fósforo testadas.

O boro (B) é um micronutriente essencial para plantas, envolvido na integridade da parede celular, divisão e alongamento celulares, transporte de açúcares e no desenvolvimento reprodutivo. A forma dominante disponível no solo é o ácido bórico (H_3BO_3), cuja mobilidade

depende fortemente da umidade do solo e das propriedades físico-químicas do ambiente (Shireen *et al.*, 2018; Rengel, Cakmak e White, 2023). Neste contexto Shireen *et al.* (2018), destacam que os microrganismos da rizosfera e do solo podem influenciar a disponibilidade no solo por diversos mecanismos, tais como à alteração do pH local, produção de ácidos orgânicos, exoenzimas, mineralização/degradação de matéria orgânica, alteração da estrutura da rizosfera e competição/sorção de íons, facilitando ou limitando a absorção pela planta.

Tabela 3. Teor de boro (B) e zinco (Zn) nas folhas da cana-de-açúcar “cultivar CTC 4” aos 95 dias, após o plantio em função da interação das fontes de fósforo (100% PR – pó de rocha derivado de carbonatito fosfático, 100% SSP – superfosfato simples e 50% PR + 50% SSP) e dos microrganismos inoculados no momento do plantio. Para cada nutriente, letras maiúsculas comparam o efeito de cada fonte de fósforo entre os microrganismos inoculados (colunas) e letras minúsculas comparam o efeito das fontes de fósforo em cada tratamento microbiológico testado (linhas). Test.: testemunha, Amy.: *B. amyloliquefaciens*, Ary.: *B. aryabhattai*, Cla.: *C. cladosporioides*, T. Har.: *T. harzianum*.

	----- B (mg Kg ⁻¹) -----			----- Zn (mg Kg ⁻¹) -----		
	100 %PR	50%PR + 50%SSP	100% SSP	100 %PR	50%PR + 50%SSP	100% SSP
Test	6,0 BCa	5,7 BCa	5,7 BCa	44,7 ABa	43,0 Da	43,0 BCa
Amy	6,0 BCa	7,7 ABa	5,0 Cb	46,7 Aa	40,0 Eb	38,3 Db
Ary	6,3 BCa	5,3 Ca	5,0 Ca	45,0 ABb	48,3 Ba	42,7 Cb
Cla	5,7 BCa	6,3 BCa	5,3 Ca	41,7 Ca	43,7 CDa	42,0 Ca
Amy+Ary	4,3 Ca	5,7 BCa	4,7 Ca	42,3 BCb	52,7 Aa	41,7 Cb
Amy+Cla	5,3 Cab	6,7 Ba	4,7 Cb	42,3 BCa	43,0 Da	44,3 BCa
Ary+Cla	8,3 Aa	6,0 BCb	6,7 Bb	41,0 Cb	44,3 CDa	41,0 Cb
Amy+Ary+Cla	6,7 Bb	8,3 Aa	6,3 BCb	41,7 Cb	45,7 Ca	45,0 Ba
T. Har	7,7 ABa	5,7 BCb	8,3 Aa	44,0 Bb	45,3 Cb	50,0 Aa

Fonte: Elaborado pelos autores.

Elhaisoufi *et al.* (2022) ressaltam que diversas bactérias e fungos do solo podem exsudar ácidos orgânicos e outros ligantes na rizosfera que alteram a solubilidade de minerais que contêm boro ou ligados a superfícies de argila/óxidos, liberando-o para a solução do solo, isso por meio de dois mecanismos complementares e simultâneos, sendo a acidólise e a quelação. Na acidólise, a excreção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ácidos glucônico, cítrico, oxálico e málico) libera prótons que reduzem o pH do ambiente rizosférico, promovendo a dissolução das ligações que mantêm o nutriente retido em minerais primários ou adsorvido a argilominerais e a óxidos de Fe e Al. Já na quelação, os grupos carboxílicos (–

COO⁻) desses mesmos ácidos formam complexos estáveis com os cátions metálicos que aprisionam o nutriente na fase sólida, deslocando-o da estrutura mineral e liberando-o para a solução do solo. Elhaissoufi *et al.* (2022), complementa que a produção de sideróforos, a atividade de exoenzimas e a mineralização da matéria orgânica também contribuem para a disponibilização de nutrientes. Embora esses mecanismos tenham sido caracterizados majoritariamente para o fósforo, processos análogos de acidificação e de alteração das reações de adsorção/dessorção podem influenciar a dinâmica do ácido bórico na solução do solo, o que ajudaria a explicar a maior disponibilização de B observada em determinados tratamentos.

Diante disso, os dados obtidos sugerem que o *T. harzianum* demonstrou ser um organismo versátil, proporcionando maiores teores de B para as plantas, tanto com a fonte solúvel de P (SSP), bem como, com a fonte pouco solúvel de P (GOFOS). Comportamento que não foi observado de forma consistente nos *Bacillus* spp. e nem no *Cladosporium cladosporioides* isoladamente, estes apresentaram desempenho dependente da fonte de P presente. Embora o Trichodermil seja registrado no MAPA primariamente como agente de controle biológico (fungicida e nematicida microbiológico), a literatura demonstra que o *T. harzianum* exerce funções que extrapolam o biocontrole. Li *et al.* (2015) confirmaram que o *T. harzianum* solubiliza fitato, Fe₂O₃, CuO e Zn metálico via produção de ácidos orgânicos, atividade de fitase, quelação por sideróforos e redução enzimática, atuando tanto na disponibilização de nutrientes no solo quanto na estimulação direta do desenvolvimento radicular pela liberação de metabólitos análogos a fitohormônios. O que ajuda a explicar por que o *T. harzianum* manteve desempenho favorável independentemente da fonte de P, sugerindo maior plasticidade funcional em relação aos demais microrganismos avaliados isoladamente.

Por outro lado, a coinoculação de Ary. + Cla. demonstrou ser eficiente apenas quando na presença de uma forma pouco solúvel de P como GOFOS. Já a inoculação de *B. amyloliquefaciens* e a coinoculação de Amy. + Ary. + Cla. favorecem para maior disponibilidade de B quando há a mistura destas duas fontes de P. Logo resultados restritos aos teores foliares não permitem distinguir se houve necessariamente sinergismo ou antagonismo quando coinoculados, uma vez que a combinação de bactérias (*Bacillus* spp.) e fungos (*Cladosporium*) em um mesmo consórcio envolve interações complexas, que podem ser tanto cooperativas quanto antagônicas. Conforme Poveda e Eugui (2022), *Bacillus* spp. produzem lipopeptídeos antifúngicos (surfactina, fengicina e bacilomicina), que são capazes de inibir o crescimento de fungos quando aplicados juntos. Assim, a resposta diferenciada de cada combinação frente às fontes de P sugere que o resultado não decorre apenas da capacidade

individual de solubilização de cada microrganismo, mas também do balanço entre cooperação e competição estabelecido na rizosfera, o qual pode ser modulado pela fonte de fósforo presente.

Estes resultados evidenciam a necessidade de conhecer melhor o comportamento destes microrganismos frente as fontes de fertilizantes utilizadas, seja através de ensaios de solubilização *in vitro*, quantificação dos ácidos orgânicos produzidos na rizosfera, contagem de unidades formadoras de colônias e técnicas moleculares. Tais abordagens permitiriam confirmar quais microrganismos podem ser alternativas promissoras para melhorar a disponibilidade de macro e micronutrientes para a cana-de-açúcar, e conseqüentemente, proporcionar melhores condições para o desenvolvimento e produtividade das plantas.

Para o Zn, também se verificou que o uso de GOFOS (100% PR) associado à inoculação de *Amy* resultou em maior teor foliar deste elemento pelas plantas de cana-de-açúcar (Tabela 3). Quando comparado o teor de Zn deste tratamento com o observado nas plantas adubadas com 50%PR + 50%SSP e 100% SSP, houve incremento de 16,7 e 21,9%, respectivamente, indicando ser promissor o uso de *B. amyloliquefaciens* quando forem utilizados fertilizantes naturais como fonte de P para as plantas. Já quando houve a mistura das fontes (50%PR + 50%SSP), maiores teores de zinco foram obtidos com a coinoculação de *Amy.* + *Ary.* No entanto, ao utilizar uma fonte totalmente solúvel de P (100% SSP), o uso de *Trichoderma harzianum* novamente demonstrou ser promissor, favorecendo para maior teor foliar de Zn pelas plantas de cana-de-açúcar.

Singh *et al.* (2024) mencionam que nos últimos anos o interesse dos pesquisadores tem se voltado para o uso de estratégias ecologicamente corretas e econômicas que possam melhorar a disponibilidade de nutrientes (especialmente Zn) sem prejudicar o meio ambiente. Estes autores destacam que o uso de bactérias solubilizadoras de Zn é uma técnica alternativa e de baixo custo para a biofortificação de Zn, proporcionando condições que contribuam para uma agricultura ecologicamente correta.

Rengel, Cakmak e White (2023) enfatizam que, devido ao acúmulo de ácidos orgânicos e enzimas produzidos por estes microrganismos na rizosfera das plantas, há maior produção de hormônios vegetais e desenvolvimento radicular, favorecendo a absorção de micronutrientes. Para Meena *et al.* (2020), o uso destes microrganismos como inoculantes na cultura da cana poderia vir a ser uma alternativa sustentável e ecologicamente correta de melhorar a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Schütz *et al.* (2018) destacam que conforme a capacidade e multiplicação destes microrganismos na rizosfera, podem imobilizar nutrientes do solo em sua massa microbiana, fixar o nitrogênio atmosférico e promover a solubilização de nutrientes complexados como o zinco. No entanto, torna-se necessário melhor entender as

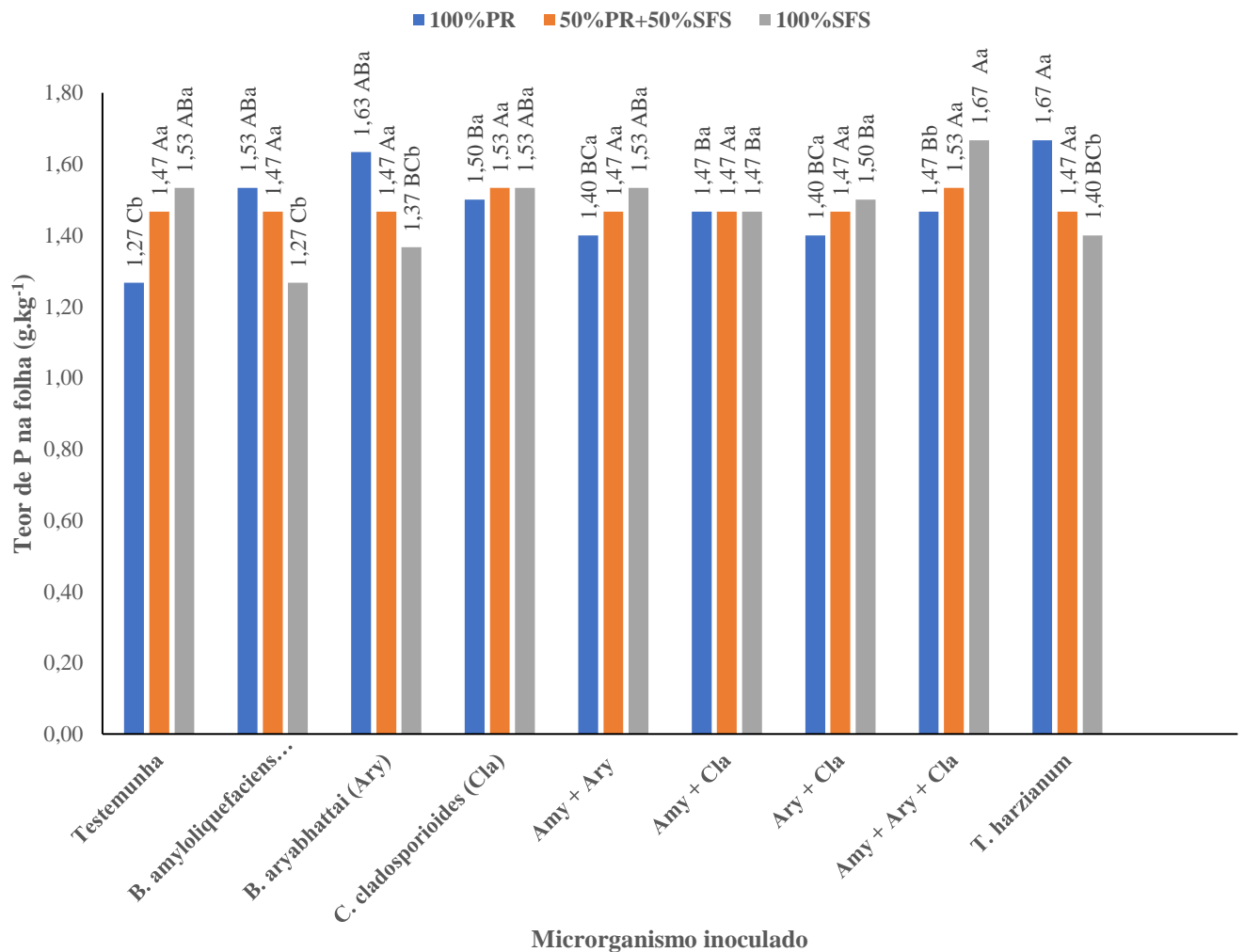
interações destes microrganismos com as plantas e fontes de fertilizantes utilizadas, para obter maior eficiência dos produtos biológicos utilizados como inoculantes.

Quanto ao teor de P nas folhas da cana-de-açúcar, ao utilizar apenas o superfosfato simples (100% SSP) como fonte de fósforo, maior teor foi observado nas plantas coinoculadas com Amy. + Ary. + Cla. (Figura 1), sugerindo possível efeito sinérgico destes organismos, proporcionando maior disponibilidade deste elemento para as plantas. Por outro lado, ao utilizar uma fonte pouco solúvel como o GOFOS (100% PR), maior teor de P foliar foi obtido com a inoculação de *T. harzianum*, sendo estatisticamente superior aos valores encontrados nas plantas em que houve à aplicação de 50%PR + 50%SSP e 100% SSP. Já quando utilizado 50%PR + 50%SSP, não houve efeito significativo dos microrganismos no teor foliar de P.

Estes resultados enfatizam a importância de conhecer o comportamento dos microrganismos inoculados ou coinoculados, pois a eficiência pode ser influenciada pela natureza química da fonte fosfatada utilizada. Neste contexto, na presença de uma fonte pouco solúvel como o GOFOS, a inoculação de *T. harzianum*, *B. amyloliquefaciens*, *B. aryabhatai* demonstrou ser mais promissora. Cabe destacar que, quando inoculados isoladamente, os dois *Bacillus* (Amy. e Ary.) não diferiram estatisticamente do *T. harzianum*, entretanto, quando coinoculados, os teores foliares de P foram estatisticamente inferiores, sugerindo que a combinação desses microrganismos não potencializou e em alguns casos pode ter reduzido a disponibilização de P em relação às inoculações individuais, comportamento coerente com a possibilidade de competição por nicho e por substratos entre bactérias e fungos em consórcio (Poveda e Eugui, 2022).

Quando comparando com a testemunha (sem inoculação), o uso destes microrganismos inoculados proporcionou incrementos de respectivamente 20,5; 28,3 e 31,5% no teor foliar de P, corroborando com os dados publicados por Nascimento (2020), Soave, (2023) e Vasconcelos (2023), que obtiveram aumento da absorção de P em culturas como cana, milho e soja, quando associadas a microrganismos solubilizadores. Considerando que o fósforo é um dos nutrientes que mais tem limitado a produtividade nas áreas agricultáveis, o uso destes microrganismos associados a fontes pouco solúveis de P pode vir a ser uma alternativa viável, quando se visa melhorar a disponibilidade deste elemento pelos fertilizantes naturais, vindo estimular seu uso pelos produtores e contribuir para redução do uso de fertilizantes fosfatados importados.

Figura 1. Teor de fósforo na folha da cana-de-açúcar “cultivar CTC 4” aos 95 dias, após o plantio em função das fontes de fósforo testadas (100% PR – pó de rocha derivado de carbonatito fosfático, 100% SSP – Superfosfato Simples e 50% PR + 50% SSP) e dos microrganismos inoculados no momento do plantio. Iporá, Goiás. 2025. Letras maiúsculas comparam o efeito de cada fonte de fósforo entre os microrganismos inoculados e letras minúsculas comparam o efeito das fontes de fósforo dentro de cada tratamento microbiológico testado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os microrganismos solubilizadores de fosfato possuem diversos mecanismos para aumentar a disponibilidade desse elemento no solo, principalmente quando na presença de fontes pouco solúveis como o GOFOS. Dentre os principais mecanismos utilizados para a solubilização de P, Sharma *et al.* (2013), destacam a liberação de enzimas extracelulares (mineralização bioquímica), a liberação de P durante a degradação do substrato (mineralização biológica) e a secreção de complexos ou compostos dissolventes de minerais (sideróforos,

prótons, íons hidroxila, ácidos orgânicos), que podem ter favorecido para maior disponibilidade deste elemento para as plantas.

Quanto ao enxofre, seu teor foliar também foi influenciado para interação das fontes de P e dos microrganismos inoculados (Figura 2). Cabe destacar, contudo, uma particularidade importante para a interpretação destes resultados, o carbonatito GOFOS não contém S em sua composição química, conforme o laudo mineralógico (CRTI). Portanto, o suprimento de S no presente experimento foi proveniente exclusivamente do S nativo do solo ($6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ na análise química inicial, do S associado à matéria orgânica, com teor de 12 g kg^{-1}) e do S aportado pelo superfosfato simples (SSP), que contém aproximadamente 10% de S em sua composição, altamente solúvel em água.

Ao utilizar exclusivamente uma fonte solúvel de fósforo (100% SSP), maiores teores de S foram obtidos nas plantas coinoculadas com Amy. + Ary. + Cla. ($2,87 \text{ g kg}^{-1}$) e inoculadas com *T. harzianum* ($2,67 \text{ g kg}^{-1}$), teores superiores ao da testemunha sem inoculação ($2,53 \text{ g kg}^{-1}$). Considerando que o S do SSP já é solúvel e prontamente disponível, o incremento observado nesses tratamentos tende a depender menos da solubilização biológica de uma matriz mineral, do que outros mecanismos, como o estímulo ao crescimento e desenvolvimento radicular promovido pelos microrganismos, que ampliam a área de exploração do solo e o contato com o S em solução. A produção de ácidos orgânicos pelos microrganismos, embora reconhecidamente associada à solubilização de P em minerais pouco solúveis, também pode contribuir indiretamente para a absorção de S por meio da alteração do pH rizosférico e da mineralização da matéria orgânica do solo, processos que disponibilizam o S orgânico do solo (Havlin *et al*, 1999; Rengel e Marschner, 2005).

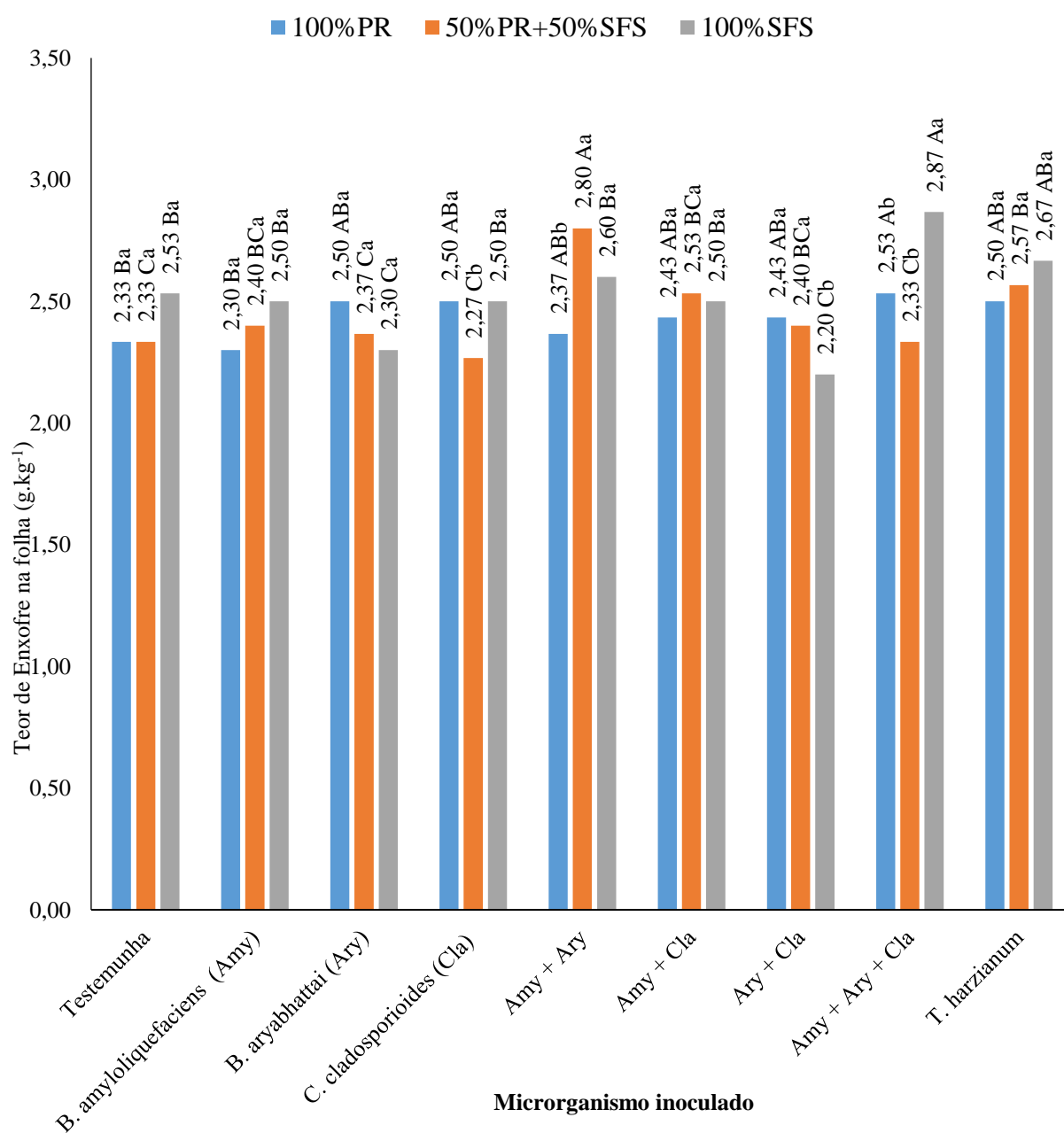
Porém, quando aplicado uma fonte pouco solúvel de fósforo (100% PR), observou-se maiores teores de S para as coinoculações de Amy. + Ary. + Cla., Ary. + Cla., Amy. + Cla. e Ary. + Amy. e para as inoculações de *T. harzianum*, *B. aryabhatai* e *C. Cladosporioides*. Nesse cenário, em que o S provém exclusivamente do solo, o efeito dos microrganismos pode ter sido mais expressivo devido a mineralização biológica da matéria orgânica, que libera S-orgânico para formas inorgânicas absorvíveis (sulfato) e a maior exploração radicular do solo, que aumenta o contato das raízes com o S já disponível. No entanto, esses processos não foram quantificados no presente estudo. Diante disso, é notório que *T. harzianum*, obteve resultados consistentes tanto com a fonte de P solúvel (100% SSP) quanto com a fonte pouco solúvel (100% PR) foi possível obter elevados teores de S foliar, indicando a potencial capacidade de solubilização mineral, mineralização da matéria orgânica e promoção do crescimento radicular amplamente reconhecida (Li *et al*, 2015), atributos estes que se manifestam de forma

complementar e tende a favorecer a absorção de diferentes nutrientes, independentemente da fonte de fertilizante utilizada.

Já quando aplicada como adubação fosfatada a combinação de 50% PR + 50% SSP, teores mais elevados foram observados no tratamento com a coinoculação de Amy. + Ary. (2,80 g kg⁻¹), atingindo o valor de 7,7% superior ao obtido com a fonte de 100% SSP e 18,1% superior a fonte de 100% PR, no mesmo tratamento biológico. Logo estes resultados sugerem que, em um ambiente de fontes combinadas, a coinoculação de *B. amyloliuefaciens* e *B. aryabhatai* tende a favorecer tanto a absorção de S aportado pelo SSP, quanto a mineralização do S orgânico do solo. Por outro lado, quando acrescentado o *C. Cladosporioides* nessa coinoculação (Amy. + Ary. + Cla.), houve a redução de 20,2% no teor de S nas folhas das plantas, comportamento semelhante a discussão anterior, como possível indício de competição por nicho entre os três microrganismos (Poveda e Eugui, 2022), embora os dados disponíveis não permitam essa confirmação.

De forma geral, os resultados indicam que os microrganismos inoculados atuaram de maneira diferenciada no suprimento de S à cana-de-açúcar, sendo a coinoculação tripla (Amy. + Ary. + Cla.) promissora na presença de uma fonte solúvel de P, e a coinoculação dupla (Amy. + Ary.) eficiente na combinação 50% PR + 50% SSP. Cabe ressaltar, contudo, que apenas à avaliação de teor foliar de S, não permite isolar a contribuição da solubilização biológica, da mineralização da matéria orgânica e da promoção de crescimento sobre os resultados observados. A elucidação desses mecanismos demanda de análises complementares, como a determinação dos teores de S disponível e total no solo ao final do experimento; a quantificação da atividade da arilsulfatase, enzima diretamente envolvida na mineralização do S orgânico; a avaliação morfométrica do sistema radicular; e a determinação do conteúdo total acumulado de S na planta (teor × massa seca), eliminando eventuais efeitos de diluição.

Figura 2. Teor de enxofre na folha da cana-de-açúcar “cultivar CTC 4” aos 95 dias, após o plantio em função das fontes de fósforo testadas (100% PR – pó de rocha derivado de carbonatito fosfático, 100% SSP – Superfosfato Simples e 50% PR + 50% SSP) e dos microrganismos inoculados no momento do plantio. Iporá, Goiás. 2025. Letras maiúsculas comparam o efeito de cada fonte de fósforo entre os microrganismos inoculados e letras minúsculas comparam o efeito das fontes de fósforo dentro de cada tratamento microbiológico testado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

7 CONCLUSÃO

O uso do remineralizador fosfático GOFOS (100%PR), isoladamente ou associado a microrganismos solubilizadores, demonstrou ser uma alternativa promissora para o fornecimento de P na cultura da cana-de-açúcar, proporcionando teores foliares de fósforo semelhantes aos obtidos com fontes solúveis (100% SSP) ou a mistura destas fontes (50% PR + 50% SSP). O GOFOS contribuiu também para o fornecimento de potássio à cultura, sendo essa contribuição agronomicamente relevante por se tratar de subproduto da matriz mineralógica da rocha, característica que o diferencia das fontes fosfatadas solúveis convencionais. Além disso, também contribuiu para o fornecimento de zinco, quando associado a uma fonte solúvel.

Os microrganismos biossolubilizadores apresentaram respostas específicas, tanto em função do nutriente avaliado, quanto da fonte de fósforo utilizada. A inoculação com *Trichoderma harzianum* destacou-se pela elevada versatilidade metabólica, promovendo incrementos nos teores foliares de fósforo, enxofre, boro, manganês e zinco, independentemente da solubilidade da fonte fosfatada. Já as bactérias *B. amyloliquefaciens*, *B. aryabhatai* e o fungo *Cladosporium cladosporioides*, bem como as coinoculações demonstraram potencial quando associadas a fontes fosfatadas pouco solúveis, promovendo incrementos nos teores foliares de fósforo, zinco e enxofre.

A adoção de fontes fosfatadas alternativas associadas a microrganismos biossolubilizadores constitui uma estratégia promissora para aumentar a eficiência e suprir a demanda de nutrientes na cultura da cana-de-açúcar, porém torna-se necessário a realização de mais trabalhos de pesquisa para melhor compreender como podem contribuir para otimizar a absorção de macro e micronutrientes e avançar em sistemas de produção mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA). **Relatório sobre o mercado de fertilizantes – janeiro a dezembro/2024**. São Paulo: ANDA, 2025. Disponível [Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management](#) Acesso em 12 set. 2025.

BENSCH, Konstanze et al. Species and ecological diversity within the *Cladosporium cladosporioides* complex (Davidiellaceae, Capnodiales). v. 67, p. 1-94, 2010.

BRASIL, Edilson Carvalho; CRAVO, M. da S. Interpretação dos resultados da análise do solo. VIÉGAS, I. de J. M. (Ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 61-70.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil**. Brasília: SAE, 2021. 195 p. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2026.

CANTARELLA, H *et al.* van (ed.). **Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2025/26**. V. 13, n. 4, p 63. Brasília: Conab, 2026.

DAMATHIA, Bhavna *et al.* Emergence of potassium solubilizing microbes-assisted crop processing for sustainable food production and microbial complexities. **Food and Bioproducts Processing**, 2025.

ELHAISSOUFI, W. *et al.* Phosphate bacterial solubilization: A key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. **Journal of Advanced Research**. n. 38, p. 13 – 28. 2022. DOI: 10.1016/j.jare.2021.08.014.

ETESAMI, Hassan; EMAMI, Somayeh; ALIKHANI, Hossein Ali. Potassium solubilizing bacteria (KSB):: Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects A review. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, n. 4, p. 897-911, 2017. DOI: 10.4067/S0718-95162017000400005.

GOMES, M.P. *et al.* Lixiviação de potássio em um Latossolo cultivado com café. **Irriga**, v.27, n.3, p. 597-606. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2022v27n3p597-606>.

HAVLIN, J.L. *et al.* Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. 6. ed. **New Jersey**: Prentice Hall, 1999. 499 p.

KOPPERT DO BRASIL HOLDING S.A. *Bula do produto Trichodermil® Super SC 1306 — Registro MAPA nº 22318*. Piracicaba: Koppert, 2024. Disponível em: <https://www.koppert.com.br/content/brasil/Produtos/Trichodermil/>. Acesso em: 20 abril 2026.

LI, H. *et al.* A critical review on the multiple roles of manganese in stabilizing and destabilizing soil organic matter. **Environmental science & technology**. v. 55, n. 18, p. 12136-12152, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00299>.

LI, Rui-Xia *et al.* Solubilisation of phosphate and micronutrients by *Trichoderma harzianum* and its relationship with the promotion of tomato plant growth. **PloS one**, v. 10, n. 6, p. e0130081, 2015.

MEENA, M. *et al.* PGPR-mediated induction of systemic resistance and physiochemical alterations in plants against the pathogens: Current perspectives. **Journal of Basic Microbiology**, v. 60, n. 10, p. 828 - 861, 2020. DOI: 10.1002/jobm.202000370.

MENDES, T. D. *et al.* Rock phosphate solubilization by abiotic and fungal-produced oxalic acid: reaction parameters and bioleaching potential. **Microbial Biotechnology**, v. 15, n. 6, p. 1576 - 1591, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13792>.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Projeções do agronegócio: Brasil 2021/2022 a 2031/2032**. Brasília, DF: MAPA, 2022.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução normativa N° 39, de 8 de agosto de 2018. 49 p. 2018.

MORAES, L.N.D. Uso de pó de rocha na agricultura brasileira. **Universidade de Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (UNB)**, Brasília, 2021. 40 p.

NASCIMENTO, F.C.D. Absorção de nitrogênio e fósforo em milho, soja e cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas em diferentes níveis de adubação. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, **Universidade Estadual Paulista (UNESP)**, 2020, 89 p.

OLIVEIRA-PAIVA, C.A. *et al.* Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. IN: **Meyer, Mauricio Conrado**. Bioinsumos na cultura da soja. Embrapa. Brasília-DF. 2022.

PANG, Fei *et al.* Soil phosphorus transformation and plant uptake driven by phosphate-solubilizing microorganisms. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1383813, 2024. art. 1383813 DOI: 10.3389/fmicb.

PAVINATO, P.S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 15615, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-72302-1.

POVEDA, Jorge; EUGUI, Daniel. Combined use of Trichoderma and beneficial bacteria (mainly Bacillus and Pseudomonas): Development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable agriculture. **Biological Control**, v. 176, p. 105100, 2022.

RENGEL, Z.; CAKMAK, I; WHITE, P.J. **Marschner-s – Mineral nutrition of plants**. Fourth Edition, Academic Press, 795 p. 2023.

RENGEL, Z., & MARSCHNER, P. Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. **New Phytologist**, v. 168, n. 2, p. 305-312, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01558.x>.

SALVIANO, A.M. *et al.* Acúmulo e exportação de macronutrientes pela cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Científica Intelletto**. v. 2, n. 2, p. 16 - 27. 2017. ISSN 2525-9075.

SANTOS, Elcio Ferreira *et al.* Low zinc availability limits the response to phosphorus fertilization in cotton. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 187, n. 3, p. 375-387, 2024. DOI: 10.1002/jpln.202300453.

SATTAR, Annum *et al.* Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: A review. **Applied soil ecology**, v. 133, p. 146-159, 2019. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.09.012.

SCHÜTZ, L. *et al.* Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization - A global meta-analysis. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 2204, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>.

SHARMA, S.B. *et al.* Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v. 2, n. 1, p. 587, 2013.

SHIREEN, F. *et al.* Boron: functions and approaches to enhance its availability in plants for sustainable agriculture. **International Journal of Molecular Sciences**. v. 19, n. 7, p. 1856, 2018. DOI: 10.3390/ijms19071856.

SINGH, S. *et al.* Harnessing the power of zinc-solubilizing bacteria: a catalyst for a sustainable agrosystem. **Bacteria**, v. 3, n. 1, p. 15-29, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/bacteria3010002>.

SOAVE, J.M. **Bacillus spp. e a promoção de crescimento vegetal: um enfoque na solubilização e mineralização de fosfato durante interação com cana-de-açúcar.** Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2023, 127 p.

SRITHAWORN, M. *et al.* Zinc solubilizing bacteria and their potential as bioinoculant for growth promotion of green soybean (*Glycine max* L. Merr.). **PeerJ**. n. 11. e15128. 2023. DOI: 10.7717/peerj.15128.

United States Department of Agriculture, (USDA). *Sugar: World Markets and Trade*. Washington, DC: **Foreign Agricultural Service**, December. 7 p. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/sugar.pdf>. Acesso em: 02 maio 2026.

VASCONCELOS, F.I.C. **Fertilizantes Organominerais em interação com microrganismos e a produção de biomassa da cana-de-açúcar.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2023, 34 p.

XU, Z. *et al.* Gestão eficaz do potássio para a produção agrícola sustentável com base na disponibilidade de potássio no solo. **Field Crops Research**, Amsterdam: Elsevier, v. 325, p. 109865, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109865>.