

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS URUTAÍ**

OTÁVIO SILVA TOMAZINI

**CONSÓRCIOS MICROBIANOS NO TRATAMENTO DE
SEMENTES: EFEITOS NO ENCHIMENTO DE GRÃOS E
PRODUTIVIDADE DO MILHO**

**URUTAÍ - GOIÁS
2025**

OTÁVIO SILVA TOMAZINI

**CONSÓRCIOS MICROBIANOS NO TRATAMENTO DE
SEMENTES: EFEITOS NO ENCHIMENTO DE GRÃOS E
PRODUTIVIDADE DO MILHO**

Trabalho de Curso apresentado ao IF Goiano
Campus Urutaí como parte das exigências do
Curso de Graduação em Agronomia para
obtenção do título de Bacharel em
Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Igor de
Azevedo Pereira.

URUTAÍ - GOIÁS
2025

OTÁVIO SILVA TOMAZINI

**CONSÓRCIOS MICROBIANOS NO TRATAMENTO DE
SEMENTES: EFEITOS NO ENCHIMENTO DE GRÃOS E
PRODUTIVIDADE DO MILHO**

Monografia apresentada ao IF
Goiano Campus Urutaí como parte
das exigências do Curso de
Graduação em Agronomia para
obtenção do título de Bacharel em
Agronomia.

Aprovada em 22 de dezembro de 2025



Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira
(Orientador e Presidente da Banca Examinadora)
Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí.



Profª. Drª. Carmen Rosa da Silva Curvêlo
Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí



Dr. João Batista Coelho Sobrinho
Bolsista Pós-Doc
Centro de Excelência em Bioinsumos
CEBIO

URUTAÍ - GOIÁS
2025

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

T655	<p>TOMAZINI, OTÁVIO SILVA CONSÓRCIOS MICROBIANOS NO TRATAMENTO DE SEMENTES: EFEITOS NO ENCHIMENTO DE GRÃOS E PRODUTIVIDADE DO MILHO / OTÁVIO SILVA TOMAZINI. Urutai 2025.</p> <p>28f. il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira. Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0120024 - Bacharelado em Agronomia - Urutai (Campus Urutai). I. Título.</p>
------	--

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

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

OTÁVIO SILVA TOMAZINI

Matrícula:

2021101200240026

Título do trabalho:

CONSÓRCIOS MICROBIANOS NO TRATAMENTO DE SEMENTES: EFEITOS NO ENCHIMENTO DE GRÃOS E PRODUTIVIDADE DO MILHO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 31 / 01 / 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.



Urutaí, Goiás

Local

13 / 01 / 2026

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO**

Campus Urutaí - Código INEP: 52063909

Rodovia Geraldo Silva Nascimento, Km 2.5, CEP 75790-000, Urutaí (GO)

CNPJ: 10.651.417/0002-59 - Telefone: (64) 3465-1900

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulada **Consórcios microbianos no tratamento de sementes: efeitos no enchimento de grãos e produtividade do milho**, sob orientação de Alexandre Igor de Azevedo Pereira, apresentada pelo aluno **Otávio Silva Tomazini (2021101200240026)** do Curso **Bacharelado em Agronomia (Campus Urutaí)**. Os trabalhos foram iniciados às 13:30 pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Alexandre Igor de Azevedo Pereira** (Presidente)
- **Carmen Rosa da Silva Curvelo** (Examinadora Interna)
- **João Batista Coelho Sobrinho** (Examinador Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

[X] Aprovado

[] Reprovado

Nota (quando exigido): 9,0

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Alexandre Igor de Azevedo Pereira** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Carmen Rosa da Silva Curvelo

URUTAÍ / GO, 22 de dezembro de 2025.

Alexandre Igor de Azevedo Pereira

João Batista Coelho Sobrinho

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e família, que me apoiaram e me deram suporte no decorrer do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder saúde e força para superar os desafios enfrentados. Meu reconhecimento vai também para meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira, pelo apoio nas correções e pelos incentivos recebidos. Ao IF Goiano pelo suporte institucional e acadêmico que foi crucial durante o meu percurso. A todos professores pelos valiosos ensinamentos compartilhados. A minha família pelo amor, apoio e encorajamento incondicional; sem vocês, esta conquista não teria sido possível. Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUÇÃO.....	10
MATERIAL E MÉTODOS.....	15
RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
CONCLUSÃO.....	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

CONSÓRCIOS MICROBIANOS NO TRATAMENTO DE SEMENTES: EFEITOS NO ENCHIMENTO DE GRÃOS E PRODUTIVIDADE DO MILHO

Otávio Silva Tomazini¹

⁽¹⁾ Instituto Federal Goiano Campus Urutaí, Rodovia Prof. Geraldo Silva Nascimento, Km 2,5, CEP 75790-000 Urutaí, GO, Brasil. E-mail: tomaziniotavio@gmail.com

RESUMO - O uso de bioinsumos no tratamento de sementes tem se destacado como estratégia para melhorar o desempenho fisiológico e produtivo do milho, especialmente em sistemas de alta produtividade. O objetivo foi avaliar os efeitos de combinações de *Trichoderma asperellum* e *Bacillus subtilis* aplicados via tratamento de sementes e aplicação foliar sobre características agronômicas, componentes de rendimento e produtividade. O experimento foi instalado em delineamento em blocos casualizados com cinco tratamentos: padrão químico (ST1); padrão + *T. asperellum* (ST2); padrão + *B. subtilis* (ST3); padrão + ambos os microrganismos (ST4); e ST4 acrescido de aplicações foliares de *B. subtilis* (ST5). As análises estatísticas incluíram modelos mistos via REML, estimativas BLUP, regressão LASSO e o Índice de Distância ao Ideótipo (IDI). A maioria das variáveis estruturais apresentou baixa resposta aos manejos, enquanto massa de mil sementes (TSW) e produtividade (YLD) foram altamente sensíveis aos tratamentos. O tratamento ST4 mostrou o melhor desempenho multivariado, associado ao maior enchimento de grãos e rendimento, enquanto ST5 foi o mais distante do ideótipo. Conclui-se que consórcios microbianos aplicados via sementes têm potencial para melhorar o desempenho fisiológico do milho, especialmente em atributos diretamente relacionados à produtividade.

Palavras-chave: Massa de mil sementes, modelos lineares mistos, rendimento, *Zea mays*.

MICROBIAL CONSORTIA IN SEED TREATMENT: EFFECTS ON GRAIN FILLING AND MAIZE YIELD

Otávio Silva Tomazini¹

⁽¹⁾ Instituto Federal Goiano Campus Urutaí, Rodovia Prof. Geraldo Silva Nascimento, Km 2,5, CEP 75790-000 Urutaí, GO, Brasil. E-mail: tomaziniotavio@gmail.com

ABSTRACT - The use of bioinputs in seed treatment has emerged as a strategy to improve the physiological and productive performance of maize, especially in high-yielding systems. This study aimed to evaluate the effects of combinations of *Trichoderma asperellum* and *Bacillus subtilis* applied through seed treatment and foliar application on agronomic traits, yield components, and productivity. The experiment was established in a randomized complete block design with five treatments: chemical standard (ST1); standard + *T. asperellum* (ST2); standard + *B. subtilis* (ST3); standard + both microorganisms (ST4); and ST4 supplemented with foliar applications of *B. subtilis* (ST5). Statistical analyses included mixed models via REML, BLUP estimates, LASSO regression, and the Ideotype Distance Index (IDI). Most structural variables showed low responsiveness to the management strategies, whereas thousand-seed weight (TSW) and grain yield (YLD) were highly sensitive to the treatments. Treatment ST4 showed the best multivariate performance, associated with greater grain filling and yield, while ST5 was the farthest from the ideotype. It is concluded that microbial consortia applied via seed treatment have the potential to improve maize physiological performance, particularly for attributes directly related to productivity.

Key-words: Thousand-seed weight, linear mixed models, income, *Zea mays*.

INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas de maior importância econômica e estratégica no mundo, sustentando cadeias produtivas de alimentação humana, nutrição animal, biocombustíveis e insumos industriais. Em sistemas de alta produtividade, o desempenho da cultura depende fortemente da eficiência fisiológica e da capacidade das plantas em converter recursos ambientais em biomassa e grãos, especialmente na fase de enchimento. Nesse contexto, tratamentos de sementes e o uso de bioinsumos têm ganhado destaque como estratégias viáveis para melhorar o vigor inicial, otimizar a absorção de nutrientes e contribuir para maior estabilidade produtiva. Estudos recentes demonstram que a adoção de microrganismos promotores de crescimento pode alterar positivamente a fisiologia da planta, favorecendo parâmetros ligados à produtividade. Cano Camacho et al. (2023) mostraram que tratamentos biológicos de sementes podem melhorar o desempenho inicial da cultura e, em determinados ambientes, incrementar o rendimento. Resultados semelhantes são apresentados por Fātu et al. (2025), que destacam a eficácia de tratamentos químicos e biológicos na proteção da semente e no estabelecimento das plantas.

Entre os microrganismos mais utilizados, espécies dos gêneros *Trichoderma* e *Bacillus* têm se destacado pelo potencial de promover crescimento, melhorar a absorção de nutrientes e atuar no controle biológico de patógenos. Araújo et al. (2023) relataram que a inoculação de sementes com *Trichoderma harzianum* aumentou altura, biomassa e acúmulo de nutrientes em milho, enquanto Pérez-Álvarez et al. (2024) observaram que *T. asperellum* contribuiu para maior assimilação de nitrogênio e rendimento. Em paralelo, *Bacillus subtilis* tem sido associado a melhorias na produtividade e na qualidade do solo, como demonstrado por Díaz-Chuquizuta et al. (2025). Esses efeitos positivos refletem a capacidade dos microrganismos de modular o microbioma rizosférico, estimular rotas metabólicas e influenciar atributos fisiológicos essenciais especialmente aqueles ligados ao enchimento de grãos.

Apesar dos avanços, a literatura mostra alta variabilidade nos resultados de campo. Lamichhane et al. (2022), em meta-análise global, destacam que o desempenho de bioinsumos depende fortemente de fatores ambientais, da compatibilidade entre estirpes microbianas e da interação com práticas de manejo. Estudos como o de Araújo et al. (2023) reforçam que oscilações hídricas e diferenças de solo podem levar a respostas inconsistentes entre experimentos. Além disso, embora vários trabalhos demonstrem

efeitos positivos no rendimento, poucos exploram simultaneamente variáveis estruturais, componentes de produtividade e métricas integrativas, como abordagens multivariadas capazes de identificar os principais atributos fisiológicos modificados por esses tratamentos.

Surge, portanto, uma lacuna importante: ainda é pouco compreendido como consórcios microbianos aplicados via tratamento de sementes influenciam, de forma integrada, os componentes do rendimento, a eficiência fisiológica e o desempenho multivariado da cultura do milho em condições de Cerrado. Há carência de estudos que combinem estimativas BLUP, modelos penalizados e índices multivariados para identificar quais atributos são realmente determinantes da resposta produtiva aos bioinsumos especialmente quando diferentes vias de aplicação são comparadas.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de combinações de *Trichoderma asperellum* e *Bacillus subtilis* aplicados via tratamento de sementes e aplicação foliar sobre características agronômicas, componentes de rendimento e produtividade do milho, utilizando ferramentas univariadas e multivariadas para identificar os principais determinantes fisiológicos do desempenho produtivo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na Fazenda Morro do Peão (17° 17' 59" S latitude, 48° 16' 46" W longitude e 758 m de altitude), pertencente ao Grupo Agrícola Santinoni na zona rural de Urutaí, sudeste do estado de Goiás, Brasil. A temperatura média durante o período experimental foi de $26,5 \pm 2^{\circ}\text{C}$, com umidade relativa do ar de $65 \pm 10\%$.

Os tratamentos foram dispostos em blocos casualizados, com quatro repetições. Cada parcela experimental foi constituída por oito linhas de 5 metros de comprimento, espaçadas em 0,45 m entre si, totalizando uma área de 18 m² de área útil por parcela. Os tratamentos foram compostos por cinco tratamentos de sementes com diferentes combinações de produtos classificados como capacitores de rizosfera.

O tratamento ST1 corresponde ao padrão, constituído por uma mistura comercial contendo piraclostrobina (25 g/L), tiofanato metílico (225 g/L) e fipronil (250 g/L), aplicado na dose de 2,5 mL por quantidade de semente utilizada. O tratamento ST2 associou o padrão ao produto biológico Trichoplus, contendo *Trichoderma asperellum* (isolado BLF 1296, 2×10^9 UFC g⁻¹), na dose de 2,5 mL do padrão mais 5 g de Trichoplus por semente. O tratamento ST 3 combinou o padrão com BS10, à base de *Bacillus subtilis*

(cepa CBMAI 2479, 1×10^8 UFC mL⁻¹), aplicando-se 2,5 mL do padrão mais 5 mL de BS10 por semente. No tratamento ST4, utilizou-se a combinação tripla, unindo o padrão, o Trichoplus e o BS10, nas doses de 2,5 mL, 5 g e 5 mL por semente, respectivamente. Já o tratamento ST5 incluiu todos os produtos do ST4 e, adicionalmente, uma aplicação foliar de BS10, na dose de 300 mL ha⁻¹. Em todos os tratamentos, o manejo de doenças foliares baseou-se na aplicação padrão de fungicida, e no ST5 essa aplicação foi complementada com BS10 foliar realizado nas fases V4, V8 e pré-pendão.

A adubação de base consistiu na aplicação de 280 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 14-14-10 no sulco de semeadura. Posteriormente, foi realizada a adubação de cobertura, com aplicação de 50 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl) e 170 kg ha⁻¹ de ureia. Durante o ciclo da cultura, o manejo de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado de forma preventiva e/ou curativa, sempre que necessário, seguindo as boas práticas agrícolas e os princípios do manejo integrado.

Ao final do experimento, foram coletadas 10 plantas aleatoriamente na área útil de cada parcela para a avaliação dos atributos agronômicos de interesse. Cada parcela foi avaliada quanto a um conjunto de características agronômicas: altura de planta (PH), diâmetro de caule (SD), número de fileira por espiga (NRE), número de grãos por fileira (NGR), número de grãos por espiga (NGE), massa de mil sementes (TSW), número de espiga por planta (ANE) e produtividade (YLD).

A análise estatística foi realizada por meio de modelos lineares mistos, ajustados via Máxima Verossimilhança Restrita (REML) utilizando a função lmer() do pacote lme4. Para cada variável quantitativa ajustou-se o modelo geral:

$$Y_{ijk} = \mu + u_i + b_j + \varepsilon_{ijk}$$

em que:

- Y_{ijk} representa a observação da unidade experimental submetida ao tratamento i e bloco j ;
- μ é a média geral;
- u_i é o efeito aleatório do tratamento i , assumindo $u_i \sim N(0, \sigma_{\text{TRAT}}^2)$;
- b_j é o efeito aleatório do bloco j , com $b_j \sim N(0, \sigma_{\text{BLOCO}}^2)$;
- ε_{ijk} é o erro residual, independente e normalmente distribuído, $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$.

A estimativa dos componentes de variância (σ_{TRAT}^2 , σ_{BLOCO}^2 , σ^2) foi obtida diretamente do ajuste REML. A proporção relativa de cada componente em relação à variância total foi calculada segundo:

$$p_{\text{TRAT}} = \frac{\sigma_{\text{TRAT}}^2}{\sigma_{\text{TRAT}}^2 + \sigma_{\text{BLOCO}}^2 + \sigma^2}, p_{\text{BLOCO}} = \frac{\sigma_{\text{BLOCO}}^2}{\sigma_{\text{TRAT}}^2 + \sigma_{\text{BLOCO}}^2 + \sigma^2}$$

A partir do modelo misto ajustado, foram obtidas as predições BLUP (Best Linear Unbiased Predictors) dos tratamentos para cada variável. As estimativas BLUP são calculadas conforme:

$$\hat{u} = GZ'(ZGZ' + R)^{-1}(Y - X\hat{\beta})$$

onde:

- G representa a matriz de covariância dos efeitos aleatórios, $G = \sigma_{\text{TRAT}}^2 I$;
- Z é a matriz de incidência dos efeitos aleatórios;
- $R = \sigma^2 I$ é a matriz de covariância residual;
- X é a matriz de incidência dos efeitos fixos;
- $\hat{\beta}$ corresponde à estimativa dos efeitos fixos (neste caso, a média geral).

As estimativas BLUP foram apresentadas com seus erros-padrão e intervalos de confiança de 95%, permitindo caracterizar o desempenho predito de cada tratamento. Também foram calculadas estatísticas descritivas e a correlação de Pearson entre produtividade (YLD) e as demais variáveis agronômicas. A visualização dos BLUPs foi realizada em painéis facetados no R, utilizando o pacote ggplot2, com intervalos de 95% e linha de referência em zero para facilitar a comparação entre tratamentos. Posteriormente, as estimativas BLUP foram organizadas em uma matriz (tratamentos \times variáveis) e submetidas à regressão LASSO, considerando YLD como variável resposta e as demais características como preditoras.

O modelo LASSO é representado pela seguinte função de minimização:

$$\min_{\beta_0, \beta} \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - x_i' \beta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right\}$$

em que:

- y_i é a observação de produtividade (YLD) para o tratamento i ;
- β_0 é o intercepto;
- $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)'$ são os coeficientes das p variáveis preditoras;
- λ é o parâmetro de penalização (tuning parameter);

- $\sum_{j=1}^p |\beta_j|$ é a penalidade L1 que força alguns coeficientes para zero.

A regressão LASSO foi ajustada utilizando o pacote glmnet, com validação cruzada de 10 pastas para seleção do parâmetro de penalização ótimo (λ_{\min} e λ_{1se}). Variáveis com coeficientes diferentes de zero no modelo final foram consideradas relevantes para a predição da produtividade, sendo apresentados os coeficientes selecionados e a curva de validação cruzada para visualização da trajetória de penalização.

Com base nos BLUPs, realizou-se uma síntese multivariada por meio do Índice de Distância ao Ideótipo (IDI). O ideótipo foi representado pelo maior desempenho simultâneo em cada variável padronizada, estabelecendo um padrão de referência para avaliação dos tratamentos.

A distância euclidiana entre cada tratamento e o ideótipo foi calculada conforme a equação:

$$IDI_i = \sqrt{\sum_{j=1}^p (Z_{ij} - Z_j^{\text{ideal}})^2}$$

Onde:

- IDI_i = Índice de Distância ao Ideótipo do tratamento i
- Z_{ij} = valor padronizado da variável j no tratamento i
- Z_j^{ideal} = valor ideal padronizado da variável j
- p = número de variáveis

Todas as análises foram realizadas no ambiente R, versão 4.4.2 (R Core Team, 2024). Foram utilizados, entre outros, os pacotes nasapower para obtenção das variáveis climáticas, lme4 para ajuste dos modelos lineares mistos, glmnet para regressão LASSO, ggplot2, dplyr, tidyr, ggridges, viridis e patchwork para organização, análise exploratória e visualização gráfica dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos componentes de variância (Tabela 1) revelou que a maioria das características avaliadas especialmente PH, SD, NRE, NGR e ANE não respondeu aos tratamentos, apresentando variância de tratamentos praticamente nula e elevada proporção de variância residual ($p_r > 80\%$). Esse padrão indica alta estabilidade dessas variáveis e baixa capacidade de discriminar diferenças entre os manejos. Em particular, SD e NGR concentraram 100% da variância no componente residual, enquanto PH e SD apresentaram baixos coeficientes de variação, reforçando seu comportamento estruturalmente estável.

Em contraste, duas variáveis se destacaram pela sensibilidade aos tratamentos: TSW e YLD. A massa de mil sementes apresentou a maior variância de tratamentos ($\sigma^2T = 572,09$; $p_t = 15,5\%$) e forte correlação positiva com a produtividade ($r = 0,81$), demonstrando que diferenças no enchimento de grãos foram determinantes para o desempenho produtivo. A produtividade também apresentou variância expressiva de tratamentos ($\sigma^2T = 75,82$; $p_t = 16,93\%$), embora acompanhada de elevada variância residual. A participação dos blocos em YLD ($\sigma^2B = 40,42$; $p_b = 9,03\%$) indica sensibilidade moderada a pequenas heterogeneidades do campo.

A variável ANE mostrou correlação positiva e moderada com YLD ($r = 0,58$), sugerindo que o aborto de estruturas pode refletir ajustes fisiológicos favoráveis ao enchimento de grãos. As variáveis NGE e YLD exibiram p_r superior a 70%, destacando a heterogeneidade experimental e a importância de abordagens complementares, como BLUP e LASSO, para detectar padrões consistentes.

Em síntese, os resultados mostram que a maior parte das características estruturais e reprodutivas iniciais foi pouco responsiva aos tratamentos, enquanto TSW e YLD se destacaram como indicadores-chave do desempenho fisiológico e produtivo, sendo os principais componentes capazes de discriminar os manejos avaliados.

Tabela 1. Estatísticas descritivas, componentes de variância (σ^2) e proporções relativas (p) estimadas por modelos lineares mistos ajustados via REML para as variáveis agronômicas avaliadas no experimento

Variável	Média	Min	Max	SD	CV(%)	CorYLD	σ^2T	σ^2B	σ^2R	$T(\sigma^2)$	$p_t(\%)$	$p_b(\%)$	$p_r(\%)$
PH	2.43	2.27	2.57	0.10	3.98	-0.39	0.00	0.00	0.01	0.01	43.32	0.00	56.68
SD	17.38	15.20	19.10	0.95	5.47	0.08	0.00	0.00	0.90	0.90	0.00	0.00	100.00
NRE	15.39	14.00	16.58	0.86	5.62	0.23	0.00	0.12	0.65	0.77	0.00	15.71	84.29
NGR	31.42	27.30	35.10	2.23	7.10	-0.17	0.00	0.00	4.97	4.97	0.00	0.00	100.00
NGE	484.41	388.48	579.15	52.34	10.80	0.01	0.00	48.94	2700.42	2749.35	0.00	1.78	98.22
TSW	301.41	205.55	468.20	59.99	19.90	0.81	572.09	6.97	3112.09	3691.15	15.50	0.19	84.31
ANE	1.13	1.00	1.40	0.15	12.87	0.58	0.00	0.00	0.02	0.02	15.46	0.00	84.54
YLD	132.30	94.83	166.83	20.67	15.62	—	75.82	40.42	331.51	447.75	16.93	9.03	74.04

PH – altura de planta; SD – diâmetro do colmo; NRE – número de fileiras por espiga; NGR – número de grãos por fileira; NGE – número de grãos por espiga; TSW – massa de mil sementes; ANE – número de espigas por planta; YLD – produtividade; SD – desvio-padrão; CV(%) – coeficiente de variação; CorYLD – correlação de Pearson com a produtividade; σ^2T – variância de tratamentos; σ^2B – variância de blocos; σ^2R – variância residual; $T(\sigma^2)$ – variância total; $p_t(\%)$ – proporção da variância atribuída aos tratamentos; $p_b(\%)$ – proporção da variância atribuída aos blocos; e $p_r(\%)$ – proporção da variância residual.

As estimativas BLUP (Figura 1) indicaram que a maior parte das variáveis agronômicas apresentou estabilidade entre os tratamentos, com diferenças mínimas ou nulas após o ajuste dos efeitos de blocos e da variância residual. As variáveis PH, SD, NRE, NGR e NGE exibiram BLUPs próximos ou iguais a zero, confirmando a ausência de resposta aos tratamentos e corroborando os valores de variância de tratamentos praticamente nulos observados na análise REML.

Em contraste, TSW e YLD foram as únicas variáveis que responderam de forma consistente aos manejos. TSW apresentou ampla variação entre tratamentos, com destaque para ST4, que exibiu o maior efeito positivo predito, enquanto ST5 apresentou o menor valor. Esse padrão confirma a elevada sensibilidade fisiológica do enchimento de grãos ao manejo. A variável ANE apresentou variação moderada e comportamento compatível com sua correlação positiva com YLD, sugerindo ajustes fisiológicos associados ao vigor das plantas.

A produtividade também apresentou forte diferenciação entre tratamentos, com ST4 expressando o maior desempenho predito e ST5 o menor, comportamento alinhado à resposta observada para TSW. A forte convergência entre os padrões de TSW e YLD reforça que o enchimento de grãos foi o principal componente determinante do rendimento no experimento.

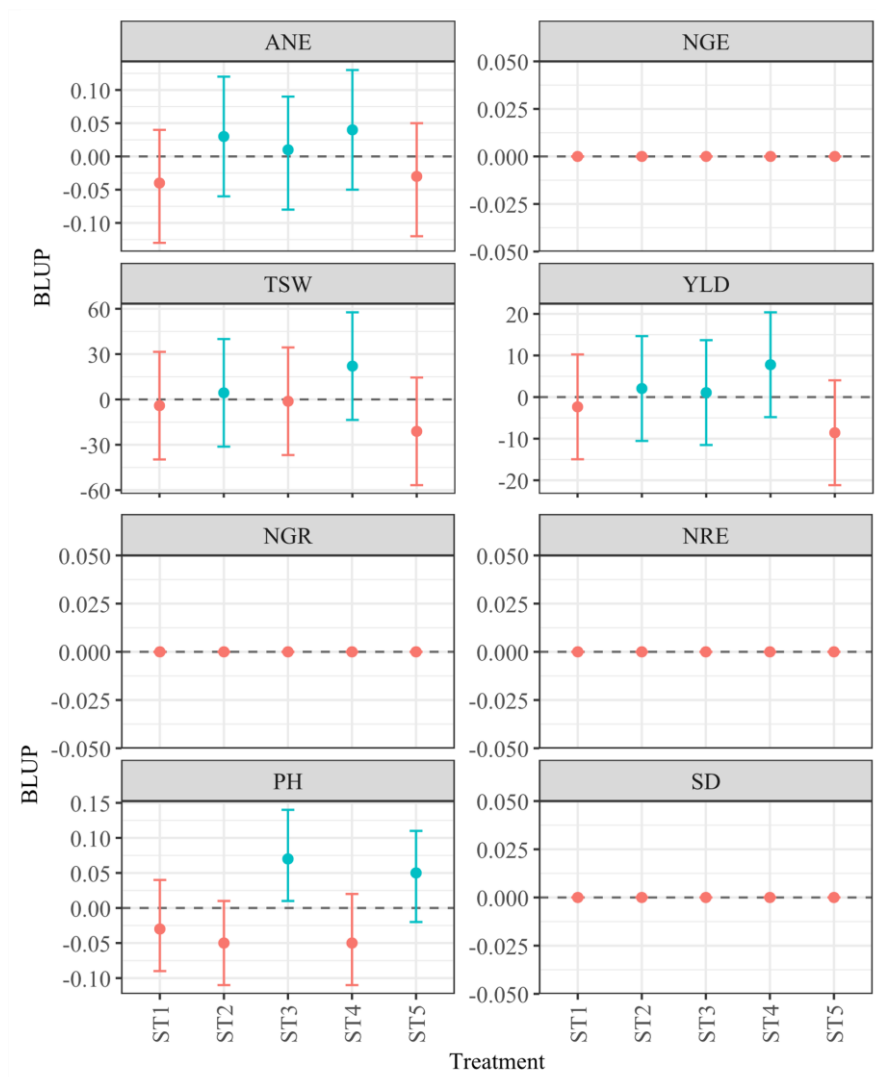


Figura 1. Efeito predito dos tratamentos sobre as características agrônômicas, estimado via BLUPs. BLUPs estimados via modelos lineares mistos (REML). Barras representam IC95%. PH – altura de planta; SD – diâmetro do colmo; NRE – número de fileiras por espiga; NGR – número de grãos por fileira; NGE – número de grãos por espiga; TSW – massa de mil sementes; ANE – número de espigas por planta; YLD – produtividade.

A regressão LASSO (Figura 2) identificou TSW e ANE como as únicas variáveis derivadas dos BLUPs capazes de prever a produtividade (YLD), após a remoção dos efeitos de tratamentos e blocos. A curva de validação cruzada mostrou boa estabilidade do modelo e indicou que apenas essas duas variáveis apresentaram contribuição estatística relevante, enquanto todas as demais foram penalizadas para zero.

TSW apresentou coeficiente positivo (0,31), evidenciando uma relação direta entre o maior enchimento de grãos e o aumento da produtividade, resultado coerente com a forte correlação observada entre essas variáveis ($r = 0,81$). Já ANE exibiu o maior

coeficiente (21,45), indicando que diferenças no aborto de estruturas reprodutivas tiveram grande influência na explicação da produtividade. Esse comportamento, embora contraintuitivo, é compatível com a associação positiva entre ANE e YLD encontrada na análise REML e pode refletir mecanismos fisiológicos de compensação, nos quais plantas mais vigorosas abortam estruturas menos viáveis para favorecer o enchimento das demais.

A retenção exclusiva de TSW e ANE pelo modelo penalizado confirma que os processos finais do desenvolvimento — especialmente o enchimento e os ajustes fisiológicos reprodutivos — foram os principais determinantes do rendimento. Variáveis morfológicas e reprodutivas iniciais, como PH, SD, NRE, NGR e NGE, mostraram-se pouco informativas, em concordância com suas baixas variâncias de tratamento observadas nas análises REML.

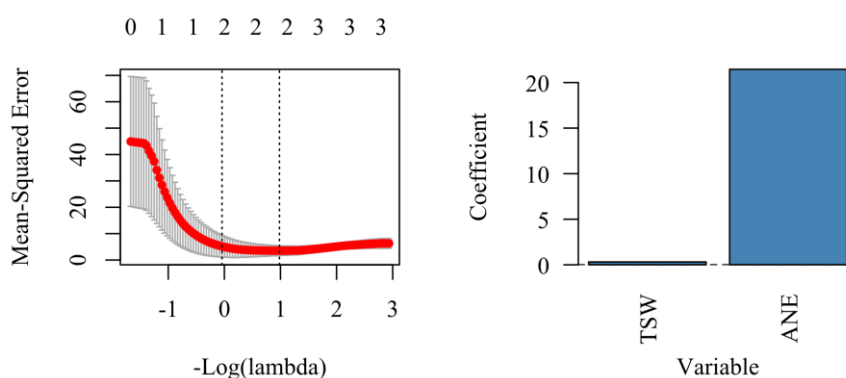


Figura 2. Curva de validação cruzada para o modelo LASSO (à esquerda) e coeficientes das variáveis selecionadas (à direita) na predição da produtividade (YLD) com base nos BLUPs. Curva de validação cruzada do LASSO (à esquerda) e coeficientes das variáveis selecionadas (à direita). TSW = massa de mil sementes; ANE = número de espigas por planta; YLD = produtividade.

O índice de distância ao ideótipo (IDI) sintetizou as variáveis TSW, YLD e ANE, permitindo comparar o desempenho global dos tratamentos. O tratamento ST4 apresentou o melhor resultado ($\text{IDI} = 2,24$), impulsionado pelos maiores valores preditos de massa de mil sementes e produtividade, indicando maior eficiência no enchimento de grãos. ST3 também mostrou bom desempenho, com respostas positivas moderadas (Figura 4). Os tratamentos ST1 e ST2 tiveram desempenho intermediário, sem ganhos expressivos nas variáveis produtivas. Já ST5 foi o manejo mais distante do ideótipo ($\text{IDI} = 3,89$),

refletindo efeitos negativos acentuados em TSW e YLD, o que confirma seu baixo potencial produtivo no experimento.

Assim, o IDI reforça consistentemente as análises anteriores: as diferenças entre os tratamentos são determinadas principalmente pelo enchimento de grãos e pela produtividade, com ST4 se destacando como o manejo mais eficiente.

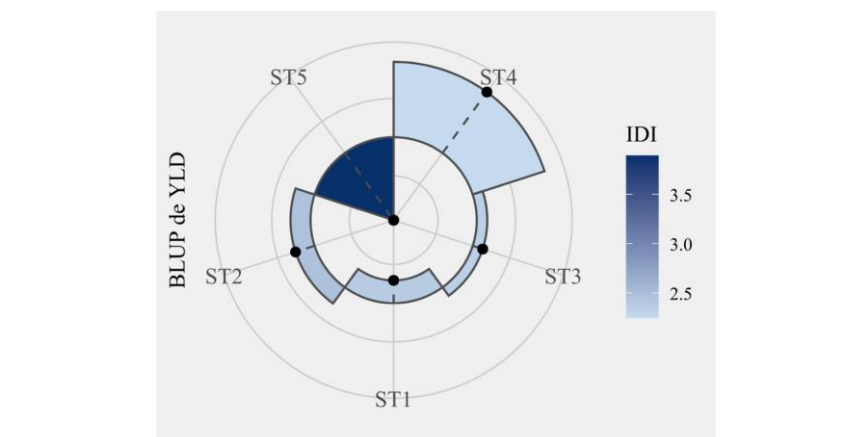


Figura 3. Desempenho multivariado dos tratamentos segundo o Índice de Distância ao Ideótipo IDI.

A análise integrada do experimento mostrou que a maioria das variáveis morfológicas e reprodutivas iniciais apresentou baixa sensibilidade aos tratamentos, com variância de tratamentos praticamente nula e forte predominância da variância residual (>80%). PH, SD, NRE, NGR e NGE permaneceram estáveis entre os manejos, resultado confirmado pelos BLUPs próximos ou iguais a zero para todos os tratamentos.

Em contraste, TSW (massa de mil sementes) e YLD (produtividade) foram as únicas variáveis que responderam de forma consistente ao manejo. TSW apresentou os maiores desvios preditos entre tratamentos, com destaque para ST4, que exibiu o maior efeito positivo, enquanto ST5 apresentou o pior desempenho. Esse comportamento refletiu a elevada variância de tratamentos para essa variável, indicando forte sensibilidade do enchimento de grãos ao manejo aplicado. A produtividade seguiu o mesmo padrão, com ST4 novamente apresentando o maior valor predito e ST5 o menor, evidenciando influência moderada, porém consistente, dos tratamentos sobre o rendimento.

A análise LASSO reforçou esses resultados ao selecionar exclusivamente TSW e ANE como variáveis preditoras relevantes para explicar a produtividade, após o controle

dos efeitos aleatórios por BLUPs. TSW mostrou associação direta com YLD, enquanto ANE, apesar de apresentar pequenas variações absolutas, exibiu forte coeficiente no modelo, sugerindo que o aborto de estruturas pode estar relacionado a mecanismos fisiológicos de compensação que favorecem o enchimento de grãos.

Em síntese, a combinação das abordagens estatísticas indica que os tratamentos exerceram pouca influência sobre características estruturais da planta, mas tiveram efeito marcante sobre atributos ligados ao enchimento de grãos e ao rendimento final, com destaque para o desempenho superior do tratamento ST4.

Os resultados deste estudo mostram que a maior parte das variáveis estruturais do milho como altura de plantas (PH), diâmetro de colmo (SD) e componentes primários da espiga (NRE, NGR, NGE) apresentou elevada estabilidade fenotípica e baixa sensibilidade aos tratamentos, comportamento amplamente compatível com a literatura recente. Cano Camacho et al. (2023) relatam que tratamentos biológicos de sementes tendem a exercer efeitos reduzidos sobre características vegetativas, ainda que possam alterar biomassa e produtividade em alguns ambientes. De modo semelhante, Fātu et al. (2025) destacam que tratamentos de sementes, sejam químicos ou biológicos, frequentemente não modificam substancialmente a morfologia inicial do milho, reforçando o papel desses manejos como tecnologias de proteção e vigor, e não como promotores diretos de alterações estruturais.

Em contraste, as variáveis massa de mil sementes (TSW) e produtividade (YLD) se mostraram altamente responsivas aos tratamentos, indicando que os microrganismos testados atuam predominantemente sobre processos fisiológicos tardios, associados ao enchimento de grãos. Essa interpretação é amplamente sustentada pela literatura. Ruiz et al. (2022) demonstram que a massa de grãos é um dos componentes mais sensíveis de resposta às práticas de manejo, sendo frequentemente mais determinante para o rendimento do que o número de grãos por espiga. Capo et al. (2023) também observaram que biostimulantes aplicados às sementes favoreceram a produtividade do milho, enquanto características estruturais permaneceram estáveis, indicando que ganhos fisiológicos podem ocorrer independentemente de mudanças morfológicas expressivas. Esse padrão também aparece em estudos envolvendo bactérias promotoras de crescimento. Katsenios et al. (2022) mostraram que diferentes estirpes de *Bacillus* aumentam significativamente a massa e o rendimento de espigas de milho doce, sem modificar de forma relevante a arquitetura das plantas. Da mesma forma, Díaz-Chuquizuta et al. (2025) observaram que a inoculação de *B. subtilis*, associada ao biochar,

aumentou produtividade e qualidade do solo, reforçando o papel desse organismo na eficiência de uso de recursos e no enchimento de grãos.

Entre os tratamentos avaliados no presente estudo, ST4 se destacou como o manejo de melhor desempenho multivariado, exibindo maiores valores preditos de TSW e YLD. Resultados semelhantes são descritos por Ocwa et al. (2024), que relataram incremento significativo de produtividade quando *Bacillus* spp. foi usado no tratamento de sementes, embora tenham ressaltado que a magnitude da resposta depende da interação entre estirpe, ambiente e regime nutricional. Lamichhane et al. (2022) reforçam essa visão ao demonstrar, em meta-análise global, que bioinsumos apresentam alta variabilidade de desempenho, sendo fortemente modulados pelo ambiente.

A resposta positiva observada em ST4 encontra respaldo também em estudos sobre fungos do gênero *Trichoderma*. Araújo et al. (2023) mostraram que a inoculação com *T. harzianum* promoveu maior altura, biomassa e acúmulo de nutrientes em plantas de milho, contribuindo para melhor desempenho vegetativo. Em condições de campo, Nascimento et al. (2025) verificaram que o uso de *Trichoderma* associado à adubação orgânica aumentou comprimento e massa de espigas. Pérez-Álvarez et al. (2024) também identificaram melhora na assimilação de nitrogênio e na produtividade de híbridos de milho quando *T. asperellum* foi empregado como biofertilizante.

Do ponto de vista mecanístico, Contreras-Cornejo et al. (2024) demonstram que *Trichoderma* spp. ativam rotas de crescimento vegetal por meio de metabólitos que mimetizam hormônios e compostos orgânicos voláteis, favorecendo maior eficiência no uso de nutrientes, característica coerente com o aumento de TSW e YLD observado neste estudo. Além disso, o papel de *Trichoderma* na proteção fitossanitária é amplamente reconhecido. Ahmed et al. (2025) evidenciaram que agentes de biocontrole à base do fungo reduziram a incidência de murcha tardia em milho e aumentaram a produtividade. Mitrović et al. (2025) reforçam que *T. harzianum* reduz doenças fúngicas e micotoxinas no campo, contribuindo para maior rendimento efeito que, embora não diretamente mensurado aqui, pode ter atuado na resiliência fisiológica das plantas tratadas com ST4. Outro ponto importante nos resultados é o comportamento da variável ANE (número de espigas por planta), que apresentou correlação positiva com YLD e foi selecionada pelo modelo LASSO. Isso sugere que pequenos ajustes fisiológicos na formação e manutenção de espigas podem amplificar ganhos de rendimento quando combinados a maior eficiência de enchimento, como discutido por Ruiz et al. (2022), que defendem que componentes do rendimento devem ser analisados de forma integrada, pois mesmo

pequenas variações podem se tornar relevantes quando associadas a grandes diferenças em massa de grãos.

A literatura também aponta forte interação entre microrganismos e manejo nutricional. Galindo et al. (2024) verificaram que a coinoculação com *Azospirillum brasilense* e *B. subtilis* aumentou a eficiência de uso de nitrogênio e a produtividade, reforçando a relevância de consórcios microbianos. Araújo et al. (2023) mostraram que, sob condições de variação de umidade, estirpes específicas de bactérias promotoras de crescimento aumentaram biomassa, área foliar e rendimento, embora alguns tratamentos apresentassem efeitos negativos comportamento que ajuda a explicar o desempenho inferior de ST5, onde a intensificação da aplicação foliar de *B. subtilis* pode não ter favorecido o equilíbrio fisiológico da cultura.

Sínteses amplas, como a meta-análise de Barbosa et al. (2022), mostram que *Azospirillum* tende a aumentar massa de raiz, absorção de nitrogênio e produtividade do milho, reforçando que bioinsumos atuam por vias que envolvem melhoria da nutrição e eficiência fisiológica, exatamente o que nosso experimento indica ao identificar TSW como principal variável discriminante entre os tratamentos. Da Silva Oliveira et al. (2023) confirmam que estirpes Ab-V5 e Ab-V6 de *A. brasilense* melhoram trocas gasosas, nutrição e desempenho produtivo, ainda que em sistemas de cultivo distintos. Além disso, Anđelković et al. (2025) mostraram que diversas estirpes bacterianas aumentam altura, comprimento de raiz e biomassa fresca e seca de milho e hortaliças, reforçando a ampla capacidade dos PGPB de modular o crescimento vegetal. Esses resultados complementam a interpretação de que os efeitos observados em ST4 derivam de uma sinergia microbiana funcional, enquanto ST5 pode ter sofrido interferência nas interações planta–microrganismo devido à aplicação foliar adicional.

Por fim, o uso de ferramentas estatísticas robustas modelos mistos REML, BLUPs, regressão LASSO e índice de distância ao ideótipo (IDI) acompanha tendência recente em experimentação agrícola. Cano Camacho et al. (2023) destacam a necessidade de considerar interações complexas entre ambientes e tratamentos ao avaliar respostas de bioinsumos, e Lamichhane et al. (2022) reforçam que análises integradas são fundamentais para interpretar a variabilidade inerente a esses produtos. O presente estudo confirma essa abordagem ao mostrar que TSW e YLD foram os principais discriminadores multivariados, colocando ST4 como o manejo mais próximo do ideótipo ideal para o sistema avaliado.

Assim, considerando o conjunto de evidências apresentadas, fica claro que os efeitos positivos de consórcios microbianos envolvendo *Trichoderma asperellum* e *Bacillus subtilis* se concentram nos processos fisiológicos associados ao enchimento de grãos, enquanto características estruturais permanecem estáveis sob condições adequadas de manejo. Essa interpretação é amplamente coerente com estudos recentes conduzidos em diferentes ambientes e sistemas de manejo, reforçando a robustez das conclusões deste trabalho.

CONCLUSÃO

Os tratamentos avaliados pouco alteraram as características vegetativas da cultura, mas influenciaram de forma consistente o enchimento de grãos e a produtividade. O tratamento ST4 foi o mais eficiente, apresentando maior massa de mil sementes, maior rendimento final e o menor valor do índice IDI, consolidando-se como o manejo de melhor desempenho multivariado. Dessa forma, práticas que favorecem o enchimento de grãos devem ser priorizadas para elevar a produtividade.

Novas pesquisas são importantes para confirmar essas recomendações em diferentes condições de cultivo e ampliar a compreensão dos mecanismos fisiológicos envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, A. A. et al. Evaluation of *Trichoderma* bio-control agents and pre-cultivation seed treatments for the control of *Cephalosporium maydis* causing late wilt in maize (*Zea mays* L.). BMC Plant Biology, v. 25, 2025.

ANĐELKOVIĆ, J. et al. Growth-promoting effects of ten soil bacterial strains on maize and vegetable crops. Plants, v. 14, n. 12, p. 1874, 2025.

ARAÚJO, T. B. de et al. Growth promotion in maize inoculated with *Trichoderma harzianum*. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v. 22, p. e1269, 2023.

ARAÚJO, V. L. V. P. et al. Potential of growth-promoting bacteria in maize (*Zea mays* L.) varies according to soil moisture. Microbiological Research, v. 271, p. 127352, 2023.

BARBOSA, J. Z. et al. Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum* inoculation: root growth, N uptake and grain yield. Rhizosphere, v. 22, p. 100530, 2022.

CANO CAMACHO, V. et al. Impact of biological seed treatments on maize (*Zea mays* L.) and soil: crop growth and yield. Agronomy Journal, v. 115, n. 6, 2023.

CAPO, L. et al. Agronomic strategies to enhance the early vigor and yield of maize. Part II: the role of seed applied biostimulant, hybrid, and starter fertilization on crop performance. Frontiers in Plant Science, v. 14, p. 1240313, 2023.

CONTRERAS-CORNEJO, H. A. et al. Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in cereals and other crops. Journal of Plant Physiology, 2024.

DÍAZ-CHUQUIZUTA, H. et al. Inoculation of *Bacillus subtilis* in acidic soil amended with eucalyptus biochar improves corn yield and soil quality. Scientific Reports, v. 15, p. 15485, 2025.

FĚTU, V. et al. Efficacy of biological and chemical seed treatments for sustainable maize crop protection. Scientific Papers. Series A. Agronomy, v. 68, n. 1, p. 349–356, 2025.

GALINDO, F. S. et al. Impact of nitrogen fertilizer sustainability on corn crop yield: the role of beneficial microbial inoculation interactions. *BMC Plant Biology*, v. 24, p. 268, 2024.

KATSENIOS, N. et al. Assessment of plant growth promoting bacteria strains on growth, yield and seed quality of sweet corn. *Scientific Reports*, v. 12, p. 11850, 2022.

LAMICHHANE, J. R. et al. Biological seed treatments promote crop establishment and yield: a global meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 42, p. 55, 2022.

MITROVIĆ, I. et al. *Trichoderma harzianum* in biocontrol of maize fungal diseases and relevant mycotoxins: from the laboratory to the field. *Journal of Fungi*, v. 11, n. 6, p. 416, 2025.

NASCIMENTO, L. S. et al. Organic fertilization strategies and use of *Trichoderma* in the agronomic performance of green maize. *Brazilian Journal of Biology*, v. 85, p. e287513, 2025.

OCWA, A. et al. Seed treatment with *Bacillus* bacteria improves maize production. *Acta Agraria Debreceniensis*, 2024.

PÉREZ-ÁLVAREZ, S. et al. Nitrogen assimilation, biomass, and yield in response to application of algal extracts, *Rhizobium* sp., and *Trichoderma asperellum* as biofertilizers in hybrid maize. *Nitrogen*, v. 5, n. 4, p. 1031–1047, 2024.

RUIZ, A. et al. Kernel weight relevance in maize grain yield response to nitrogen fertilization. *Field Crops Research*, v. 286, p. 108631, 2022.

SILVA OLIVEIRA, C. E. da et al. Inoculation with *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 improves gas exchange, nutrition, and yield in maize. *Plants*, v. 12, n. 17, p. 3107, 2023.